



**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica**

MARCUS EVANDRO TEIXEIRA SOUZA JUNIOR

**REFLEXÕES ACERCA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SUAS
IMPLICAÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO, NA SOCIEDADE E NO
MEIO AMBIENTE**

Uberlândia

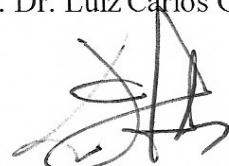
2018

MARCUS EVANDRO TEIXEIRA SOUZA JUNIOR

**REFLEXÕES ACERCA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SUAS
IMPLICAÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO, NA SOCIEDADE E NO
MEIO AMBIENTE**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação
na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso
de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes De Freitas



Assinatura do Orientador

Uberlândia

2018

MARCUS EVANDRO TEIXEIRA SOUZA JUNIOR

**REFLEXÕES ACERCA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E SUAS
IMPLICAÇÕES NO SISTEMA ELÉTRICO, NA SOCIEDADE E NO
MEIO AMBIENTE**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação
na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso
de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia.

Banca examinadora

Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes De Freitas

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Fernando Cardoso Melo

Dr. Fernando Cardoso Melo

Uberlândia

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o incentivo nos meus estudos e pelo apoio em todas as minhas decisões. Vem deles minha incansável busca por ser uma pessoa boa com os outros e com a natureza, que tanto se reflete neste trabalho. Nada disso teria sido pensado e muito menos realizado sem a ajuda incondicional dos meus pais. Sou eternamente grato por todo o amor que me deram e me dão.

Agradeço a Gabriela, pelo apoio, pela paciência, por não me deixar desesperar e por acreditar no meu trabalho e nos meus pensamentos. Com você, tudo fica mais fácil. Agradeço por todo o carinho, companheirismo e amor.

Agradeço também a todos os meus familiares e amigos. Devo a cada um deles vários ensinamentos e diversos momentos de alegria, fazendo todo esforço valer a pena. Cada um contribuiu de uma maneira para a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Luiz Carlos Gomes de Freitas, orientador deste trabalho, por sempre ter confiado em mim, em minhas pesquisas e meus estudos, dando máxima liberdade e apoiando os caminhos escolhidos. Agradeço pelas conversas e orientações.

Devo agradecer especialmente: ao meu professor, orientador de Iniciações Científicas e amigo Thiago Catalan pelos grandes ensinamentos sobre pesquisa, docência e matemática ao longo de toda a graduação; ao engenheiro Flávio Augusto dos Santos por proporcionar a oportunidade de fazer um excelente estágio com muito aprendizado; à minha professora de francês Michelle O'Connell que, além de me ensinar uma nova língua, foi fundamental para que eu fizesse meu intercâmbio.

“Para muitas pessoas, antes morrer do que pensar e é isso mesmo que fazem.”

(Bertrand Russell)

“Não acredito saber aquilo que não sei.”

(Sócrates)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é estudar a Geração Distribuída da maneira mais abrangente possível. Para isso, a pesquisa não se atreve somente à análise técnica de seus aparelhos, mas buscou mais do que isso. Reflexões sobre as suas implicações no sistema elétrico e também no meio ambiente e na sociedade são propostas. A Geração Distribuída é entendida aqui como um conceito amplo que engloba diversas tecnologias de produção de energia elétrica e, para compreendê-la, as discussões vão desde suas origens até os resultados de seu emprego em várias frentes ambientais e sociais. Em um primeiro momento foi feito um estudo histórico sobre a geração de energia elétrica e o sistema elétrico desde seus primórdios até os últimos anos. Em seguida, o texto tenta responder o que é Geração Distribuída. Para isso, os termos relacionados são abordados, uma revisão histórico-bibliográfica é feita e as definições encontradas na literatura são exploradas. Na terceira parte do trabalho, o conteúdo passa a ser estritamente técnico, sendo analisados os impactos positivos e negativos, os pormenores tecnológicos e os desafios da integração da Geração Distribuída no sistema elétrico. Por fim, no último capítulo, o estudo tenta compreender quais são as prováveis consequências do uso da Geração Distribuída para a natureza e para a humanidade.

Palavras-Chave: *Geração Distribuída; Energia Renovável; Sistema Elétrico; Sociedade; Meio Ambiente.*

ABSTRACT

The objective of this work is to study Distributed Generation in the most possible embracing way. For this, the research was not only based on the technical analysis of its apparatus, but sought more than that. Reflections on their implications in the power system and also in the environment and society are proposed. Distributed Generation is understood here as a broad concept that encompasses several technologies of power production and, to understand it, the discussions range from its origins to the results of its use on various environmental and social fronts. At first, a historical study was made on the electricity generation and the power system from its beginnings to the late years. Next, the text attempts to answer what is Distributed Generation. For this, the related terms are addressed, a historical-bibliographic revision is made and the definitions found in the literature are explored. In the third part of the work, the content becomes strictly technical, analyzing the positive and negative impacts, the technological details and the challenges of the integration of Distributed Generation into the power system. Finally, in the last chapter, the study attempts to understand what are the likely consequences for using Distributed Generation for nature and for humanity.

Keywords: *Distributed Generation; Renewable Energy; Power System; Society; Environment.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Gráficos de geração e consumo de energia elétrica na Inglaterra e no País de Gales entre 1895 e 1970. A. Capacidade líquida gerada (MW). B. Número de consumidores (Milhões). C. Unidades em GWh vendidas por ano.....	50
Figura 1.2 - Geração de eletricidade por energia nuclear e número de unidades. A. Geração líquida de energia elétrica (kWh) a partir da energia nuclear nos Estados Unidos entre 1950 e 2016. B. Número de unidades nucleares em funcionamento nos Estados Unidos entre 1957 e 2011.....	51
Figura 1.3 - Evolução do preço do barril de petróleo (óleo cru) em dólares (com inflação corrigida 2017-2018) entre janeiro de 1960 e julho de 2017 nos Estados Unidos com os principais eventos e preços da década de 1970.	53
Figura 2.1 - Evolução da aparição do termo "Geração Distribuída" (" <i>Distributed Generation</i> ") nas publicações de engenharia elétrica de 1990 até 2017 da biblioteca digital <i>IEEE Xplore</i>	64
Figura 2.2 – Gráfico do preço (dólares de 2002) dos módulos sobre o comportamento da curva de experiência (<i>experience curve</i>), posteriormente conhecida como lei de Swanson.....	74
Figura 2.3 – “Lei de Swanson”: Queda do preço das células fotovoltaicas de silício cristalino entre 1977 e 2012 (com previsão de 2013) em preço dado por dólar por watt (dólar de 2012).	76
Figura 2.4 – Melhores eficiências de conversão de diversas células fotovoltaicas pesquisadas entre 1976 e 2018.....	76
Figura 3.1 – Capacidades relativas dos setores atualmente, em um futuro com “negócios tradicionais” e em um futuro com aplicação do “gerenciamento ativo”. Aqui, “GD” é abreviatura de Geração Distribuída.	97
Figura 3.2 – A. Fluxo de Potência em um sistema de distribuição sem Geração Distribuída. B. Fluxo de Potência em um sistema de distribuição com Geração Distribuída.	99
Figura 3.3 – A. Curva característica I-V mostrando mudanças de corrente e tensão devido a alterações de, respectivamente, irradiância e temperatura. B. Curva característica P-V.....	110
Figura 3.4 – Curva simplificada da potência em função da velocidade do vento para uma turbina eólica.	112
Figura 3.5 – Possíveis trajetórias de uma turbina da energia eólica até a energia elétrica.....	113
Figura 3.6 – Representação genérica da operação de uma célula a combustível.	114
Figura 3.7 – Característica V-I de uma célula a combustível.....	116
Figura 3.8 – Fonte/Tecnologia de Geração Distribuída (GD) ligada ao sistema elétrico usando as principais interfaces e configurações com eletrônica de potência para saída CA adequada. Aqui, “GS” e “GI” são abreviaturas de gerador síncrono e gerador de indução, respectivamente. Já “SE” denota o sistema elétrico.	125
Figura 3.9 – Configuração de turbina eólica independente de eletrônica de potência.....	127
Figura 3.10 – Configuração de turbina eólica parcialmente dependente de eletrônica de potência com resistência variável.....	128
Figura 3.11 – Configuração de turbina eólica parcialmente dependente de eletrônica de potência <i>DFIG</i>	128
Figura 3.12 – Configuração de turbina eólica totalmente dependente de eletrônica de potência. ..	129
Figura 3.13 – Configurações para sistemas fotovoltaicos com eletrônica de potência. A. Inversor Central. B. Inversor de <i>Strings</i> ou Fileiras. C. Inversor de <i>Multi-Strings</i> . D. Módulos-CA ou Microinversores.	131
Figura 3.14 – Classificação de topologias pelo número de estágios de processamento de energia em cascata. A. Estágio único (somente um conversor CC-CA). B. Dois estágios com um conversor CC-CC e um conversor CC-CA. C. Dois estágios com vários conversores CC-CC e um conversor CC-CA.	132

Figura 3.15 – Principais configurações de dois estágios de eletrônica de potência usadas para células a combustível ligadas ao sistema elétrico.....	133
Figura 3.16 – Comparação entre a produção (normalizada) de quatro fontes diferentes em dois anos (2009-2010), hora por hora. A. Produção constante por cogeração a partir de biocombustíveis (despachável). B. Produção de uma fazenda eólica com 17 turbinas/34 MW. C. Produção de uma hidroelétrica de 5,4 MW regulada. D. Produção simulada de energia solar fotovoltaica baseada em medições de irradiação global.	137
Figura 3.17 – A. Cobertura (média) de nuvens em porcentagem da cidade de Ludvika na Suécia de Janeiro de 2009 até Dezembro de 2010. B. Horas de sol da cidade de Ludvika na Suécia de Janeiro de 2009 até Dezembro de 2010.....	138
Figura 3.18 – Variabilidade de uma mesma turbina eólica em um mesmo local em duas horas completas distintas.	139
Figura 3.19 – Variações da irradiação média por hora ao longo de uma semana completa (25 de dezembro de 2017 até 31 de dezembro de 2017).....	140
Figura 3.20 – Variações da máxima irradiação ao longo do ano completo de 2017.	141
Figura 3.21 – Variações da irradiação de um dia completo (27 de abril de 2017).....	141
Figura 3.22 – A. Mapa-múndi mostrando velocidades do vento (2,5 a 9,75 m/s ²). B. Mapa-múndi mostrando as somas diária (escala de 2 a 7,6 kWh/m ²) e anual (escala de 800 a 2700 kWh/m ²) de irradiação solar.....	142
Figura 3.23 – Variações da máxima irradiação ao longo do ano completo de 2014 para quatro cidades de estados diferentes dos Estados Unidos da América.	142
Figura 3.24 – Variabilidade de vazão diária ao longo de um mesmo ano (1977) para dois rios diferentes.	143
Figura 3.25 – Produção por hora de energia elétrica por cogeração no ano de 2008 na Suécia.	144
Figura 3.26 – Mitigação da variabilidade com dispersão geográfica para energia eólica apresentando produção de potência elétrica (kW) para uma única turbina eólica na Suécia e para todas as turbinas do mesmo país entre as horas 50 e 150 do ano de 2008.	145
Figura 3.27 – Mitigação da variabilidade com dispersão geográfica para energia solar fotovoltaica apresentando produção normalizada para diferentes configurações em quantidade e localização para a região do sul da Califórnia nos Estados Unidos, incluindo toda a região, em um dia parcialmente coberto por nuvens.	145
Figura 3.28 – Correlação entre produção por energia eólica e energia solar fotovoltaica.	146
Figura 3.29 – A. Índice de desempenho em função do nível de penetração da Geração Distribuída se alterando com investimento. B. Capacidade de hospedagem em função do investimento.	149
Figura 3.30 – Capacidade de hospedagem para alto índice de desempenho favorável.....	149
Figura 3.31 – Capacidade de hospedagem para baixo índice de desempenho favorável.	150
Figura 3.32– Situação com dois pontos de capacidade de hospedagem em que inicialmente há melhora do sistema elétrico para depois ocorrer deterioração dependendo do crescimento da quantidade de Geração Distribuída.	151
Figura 4.1 – Emissões de alguns poluentes por ciclo de vida para diferentes tecnologias.	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Dados gerais dos sistemas elétricos de Berlim, Chicago e Londres entre 1910 e 1912....	40
Tabela 2.1- Número aproximado de publicações encontradas em busca (em inglês) na ferramenta Google Acadêmico® no mês de Março de 2018 para as expressões discutidas: exclusivamente no título e em busca genérica.....	62
Tabela 3.1 – Resumo de métodos e técnicas e suas aplicações principais.....	105
Tabela 3.2 – Fatores F para fontes não-intermitentes (e não-variáveis).....	106
Tabela 3.3 – Fatores F para fontes intermitentes (e variáveis).....	106
Tabela 3.4 – Comparação das diferentes categorias de células a combustível.....	115
Tabela 3.5 – Comparação entre as características de mudança da rede elétrica convencional para a inteligente.	155
Tabela 4.1 – Emissões em $gCO2eq/kWh$ por ciclo de vida de algumas tecnologias.	176

SUMÁRIO

Introdução	14
1- História da Geração de Energia Elétrica	16
1.1 - O Período da Geração Experimental (1660-1831)	19
1.2 - A Evolução das Máquinas Elétricas (1831-1880)	21
1.3 - Os Primeiros Impulsos para a Geração: A Telegrafia Elétrica e a Iluminação Elétrica.....	24
1.4 - A <i>Eletrificação</i> (1880-1930).....	27
1.5 - O Período de <i>Crescimento Previsível</i> e a Energia Nuclear (1930-1970).....	49
1.6 - A Crise do Petróleo e as Energias Renováveis (1970-Atualmente).....	52
2- O que é Geração Distribuída? – Definições e Relação com Outras Áreas	55
2.1 – Geração Distribuída e Outras Expressões	55
2.1.1 – Energias Limpas	55
2.1.2 – Energias Verdes	56
2.1.3 – Energias Alternativas	57
2.1.4 – Energias Renováveis	60
2.1.5 – A Expressão “Geração Distribuída”	62
2.2 – O Termo “Geração Distribuída” ao Longo do Tempo	63
2.2.1 – As Previsões da Década de 1960 para o Futuro da Geração de Energia Elétrica.....	64
2.2.2 – O Renascimento da Geração Distribuída	67
2.3 – Definições de Geração Distribuída	78
2.3.1 – Definições de Geração Distribuída em Publicações Institucionais e Governamentais	78
2.3.2 – Definições de Geração Distribuída em Publicações Científicas	81
2.4 – O que é Geração Distribuída?	84
2.4.1 – Uma Definição para Geração Distribuída	84
2.4.2 - Fontes de Energia da Geração Distribuída por Definição	89
2.5 – A Relação de Geração Distribuída com Outras Áreas	92
3- Geração Distribuída e o Sistema Elétrico	94
3.1 – Pensando o Novo Sistema Elétrico.....	95
3.1.1 – Primeiro Passo: Pensando a Integração	96
3.1.2 – Transformações no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	96
3.1.3 – Alterações nos Fluxos de Potência	98
3.1.4 - Impactos no Sistema de Transmissão de Energia Elétrica	99
3.1.5 - Consequências nas Centrais Geradoras “Tradicionais” de Energia Elétrica	100
3.1.6 - Evitando Novas Grandes Construções	100

3.1.7 – Participação nos Serviços Anciliares.....	101
3.1.8 – Implicações para os Consumidores	102
3.1.8 - Reduzindo o Consumo e Aumentando a Eficiência Energética	103
3.1.10 – Maneiras de Planejar a Inserção da Geração Distribuída	103
3.1.11 - Quantificando a Entrada da Geração Distribuída: a Capacidade de Hospedagem.....	107
3.1.12 – Uma Nova Estrutura do Sistema Elétrico	108
3.2 – As Tecnologias de Geração Distribuída	108
3.2.1 – A Energia Solar Fotovoltaica.....	109
3.2.2 – A Energia Eólica	111
3.2.3 – As Células a Combustível.....	113
3.2.4 – As Pequenas Hidroelétricas.....	116
3.2.5 – A Cogeração.....	117
3.2.6 – A Energia de Biomassa	117
3.2.7 – Os Pequenos Geradores Térmicos	118
3.2.8 – As Energias Oceânicas	119
3.2.9 – A Energia Geotérmica.....	120
3.2.10 - A Energia Solar Térmica Concentrada.....	120
3.3 – A Interface com a Rede Elétrica	121
3.3.1 – As Máquinas Elétricas Rotativas.....	122
3.3.1.1 – Geradores Síncronos	122
3.3.1.2 – Geradores de Indução	123
3.3.2 – A Eletrônica de Potência	124
3.3.2.1 - Eletrônica de Potência e Energia Eólica	126
3.3.2.2 – Eletrônica de Potência e Energia Solar Fotovoltaica	129
3.3.2.3 – Eletrônica de Potência e Células a Combustível.....	133
3.3.2.4 – Eletrônica de Potência e Pequenas Hidroelétricas	134
3.3.2.5 – Eletrônica de Potência e Microturbinas	134
3.4 – Geração Distribuída, a Variabilidade e a Intermitência	135
3.4.1 – A “Geração Tradicional”, a Variabilidade, a Intermitência e o Despacho	136
3.4.2 – Um Exemplo Prático de Variabilidade e Intermitência de Geração Distribuída	137
3.4.3 – Dependência do Tempo e do Clima	138
3.4.4 - Dependência da Localização Geográfica.....	141
3.4.5 - Dependência da Localização Física	143
3.4.6 - Problemas com Geração Distribuída Variável e Intermitente	144
3.4.7 - Meios para Abrandar a Variabilidade e a Intermitência	144
3.5 – Geração Distribuída, a Qualidade da Energia e a Capacidade de Hospedagem	146

3.6 – Geração Distribuída e as Soluções Tecnológicas de Integração.....	151
3.6.1 – Recursos Energéticos Distribuídos (Geração Distribuída e Armazenamento de Energia)	151
3.6.2 – Microrredes (<i>Microgrids</i>)	153
3.6.3 – Redes Elétricas Inteligentes (<i>Smart Grids</i>)	154
4- Geração Distribuída, o Meio Ambiente e a Sociedade	157
4.1 – Pensando o Futuro da Humanidade e da Natureza com Geração Distribuída	160
4.1.1 – O Desenvolvimento Sustentável e a Geração Distribuída.....	160
4.1.2 – Planejando o Futuro com Geração Distribuída	165
4.2 – O Meio Ambiente e a Geração Distribuída	169
4.2.1 – O Ser Humano e as Preocupações Ambientais	169
4.2.2 – A Poluição e as Mudanças Climáticas.....	171
4.2.3 – A Relação entre a Natureza e a Geração Distribuída	174
4.3 – A Sociedade e a Geração Distribuída	178
4.3.1 – A Política e a Geração Distribuída	178
4.3.2 – A Economia e a Geração Distribuída	181
4.3.3 – A Desigualdade e a Geração Distribuída	183
4.3.4 – A Migração e a Geração Distribuída.....	185
4.3.5 – A Saúde e a Geração Distribuída	187
4.3.6 – A Educação e a Geração Distribuída.....	189
4.3.7 – O Trabalho e a Geração Distribuída	191
Conclusão	194
Referências.....	196

Introdução

A Geração Distribuída é tida atualmente como uma grande solução para os problemas energéticos. No entanto, ela raramente é enxergada como mais do que um conjunto de equipamentos para se produzir eletricidade. O que este trabalho tenta fazer é justamente buscar ampliar o campo de visão sobre a Geração Distribuída. Como qualquer outra tecnologia, ela altera profundamente a sociedade e a natureza e, na realidade, são estes os pontos centrais e não só as tecnicidades que, geralmente, são o foco. Assim, o que se tenta com este estudo é uma compreensão crítica (aqui no sentido amplo da palavra) das implicações técnicas da Geração Distribuída, mas também sociais e ambientais. Para tanto, o trabalho foi dividido em quatro capítulos trazendo abordagens diferentes sobre a Geração Distribuída e os temas relacionados a ela.

No primeiro capítulo é contada a história da geração de energia elétrica e da formação do sistema elétrico. O objetivo aqui não é mostrar simplesmente a cronologia das invenções. O que é feito é toda uma análise abrangente dos fatos históricos, tentando explicar como se passaram as escolhas pelas tecnologias empregadas e todas as forças sociais por trás delas. Como pode ser observado, a opção por um ou outro aparato tecnológico não se dá meramente por melhor operação, eficiência, aplicabilidade ou mesmo pelo que é melhor para toda a sociedade. Em grande parte, a tecnologia dominante é cercada e movida por toques políticos e econômicos.

O próximo capítulo tenta responder à questão “O que é Geração Distribuída?”. Para isso, uma ampla discussão é feita sobre os outros termos comumente usados para descrever as tecnologias de produção de energia elétrica em voga atualmente. Através de pesquisas bibliográficas e históricas, buscou-se descobrir e entender as origens não só da expressão “Geração Distribuída” e seu significado, mas também das razões que levaram ao retorno de uma geração de energia elétrica que não fosse de grande porte, centralizada e distante do consumidor. Uma revisão das definições encontradas na literatura é feita para se chegar a um conceito que possa ser usado no trabalho. Por fim, a partir da definição dada, é feita uma análise de quais fontes fazem parte da Geração Distribuída e como este conjunto pode se relacionar com outras áreas do conhecimento.

O terceiro capítulo é um estudo estritamente técnico, tratando da inserção da Geração Distribuída no sistema elétrico. Em primeiro lugar, é colocado em discussão as vantagens e as desvantagens que a Geração Distribuída pode trazer ao funcionamento de toda a rede elétrica, imaginando o que pode ser feito para que a integração seja a menos prejudicial possível. Em seguida, são apresentadas as tecnologias e interfaces da Geração Distribuída. Em outras palavras, é feita uma descrição dos diversos equipamentos do grupo usados para se gerar energia elétrica, assim como os meios para que se alcance este objetivo e que ele seja feito de forma compatível com o que exige o bem estabelecido sistema elétrico. Logo depois, as importantes e diferenciadas características de variabilidade e de intermitência da Geração Distribuída são discutidas. A seguir, a metodologia da capacidade de hospedagem é apresentada como uma abordagem para se medir a quantidade de Geração Distribuída que pode ser inserida no sistema elétrico sem afetá-lo em demasia, principalmente no que tange a qualidade da energia. Por fim, é delineada a nova estrutura que está sendo erguida do sistema elétrico para que se possa integrar a Geração Distribuída com todo seu potencial, sendo as

soluções tecnológicas o armazenamento de energia, as microrredes (*microgrids*) e as redes elétricas inteligentes (*smart grids*).

O último capítulo traz uma feição mais humana e ambiental para a Geração Distribuída ao tratar desta tecnologia e suas relações com a sociedade e a natureza. Antes de tratar especificamente cada tema ambiental e social, é feita uma discussão acerca do futuro da humanidade e da natureza, sendo a Geração Distribuída o ponto central discorrido. O desenvolvimento sustentável, a disputa pelos recursos comuns e a retrovisão são os assuntos relevantes neste ponto. Em seguida, o trabalho passa nas suas últimas duas seções a detalhar mais algumas reflexões sobre as implicações ambientais e sociais da Geração Distribuída. O tema da natureza é o primeiro tratado, sendo as ênfases dadas à poluição e às mudanças climáticas, os males mais perigosos para a humanidade e para o meio ambiente que estão diretamente relacionados à Geração Distribuída. Porém, o assunto não finaliza aí. É considerada também sobre a abordagem ambiental a avaliação por ciclo de vida, ou seja, uma análise crítica dos impactos ambientais de uma tecnologia em todo o seu processo, indo desde a extração da matéria-prima para sua produção até seu descarte e não se restringindo somente à sua operação. Finalmente, alguns temas sociais são postos em julgamento. O trabalho tenta colocar algumas questões sociais para se pensar de uma forma simples, de tal maneira que elas possam ser aprofundadas e as verdadeiras oportunidades para o bem-estar de todos possam ser alcançadas pela adoção da Geração Distribuída.

1- História da Geração de Energia Elétrica

“Se a história fosse vista como um repositório para algo mais do que anedotas ou cronologias, poderia produzir uma transformação decisiva na imagem de ciência que atualmente nos domina.”

(Thomas S. Kuhn)

A história raramente é objeto de pesquisa dentro da engenharia. No entanto, ela determina o presente e é a partir do passado que se constrói o futuro, mesmo no que concerne à tecnologia. Apesar de estar falando sobre política, Marx escreveu acertadamente que:

Os homens fazem sua própria história, mas não a fazem como querem; não a fazem sob circunstâncias de sua escolha e sim sob aquelas com que se defrontam diretamente, legadas e transmitidas pelo passado [134].

A técnica no geral não foge desta regra. Ela faz parte da cultura, se transforma de acordo com a sociedade e a modifica ao mesmo tempo. Assim, é parte inseparável da narrativa humana. Desta maneira, a História é uma excelente ferramenta de compreensão do desenvolvimento tecnológico, assim como um meio para análise do progresso científico contemporâneo e futuro. Ela pode fornecer, além de informações sobre os fatos do passado, reflexões profundas sobre o presente e propostas para o que se deve ou não fazer no amanhã. Olhar para o passado é dar novas chances para o que virá adiante e não permitir que o progresso traga consigo mais problemas do que soluções é fundamental para a vida humana e para a natureza, pois como bem alertou Benjamin:

Há um quadro de Klee que se chama *Angelus Novus*. Representa um anjo que parece querer afastar-se de algo que ele encara fixamente. Seus olhos estão escancarados, sua boca dilatada, suas asas abertas. O anjo da história deve ter esse aspecto. Seu rosto está dirigido para o passado. Onde nós vemos uma cadeia de acontecimentos, ele vê uma catástrofe única, que acumula incansavelmente ruína sobre ruína e as dispersa a nossos pés. Ele gostaria de deter-se para acordar os mortos e juntar os fragmentos. Mas uma tempestade sopra do paraíso e prende-se em suas asas com tanta força que ele não pode mais fechá-las. Essa tempestade o impele irresistivelmente para o futuro, ao qual ele vira as costas, enquanto o amontoado de ruínas cresce até o céu. Essa tempestade é o que chamamos progresso [14].

Estudar, portanto, a formação dos sistemas elétricos e, principalmente, da geração de energia elétrica ao longo dos anos é essencial para melhor entender e atuar sobre a “recente” Geração Distribuída, elemento principal deste trabalho. É preciso enxergar que esta nova face do sistema elétrico será erigida sobre uma já bem estruturada rede elétrica e que ela pode impactar a vida humana e a natureza muito mais do que é possível compreender agora.

O sistema elétrico com sua geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica que é empregado em todo o mundo não surgiu espontaneamente; foi preciso, além dos artefatos técnicos e das invenções, ações sociais, políticas, econômicas, etc. para sua arquitetura ser tal como é conhecida e utilizada hoje em dia. As escolhas entre o uso de corrente contínua ou alternada, das frequências, das interconexões, de pequenas centrais geradoras locais ou de grandes centrais geradoras distantes, das transmissões em baixa ou alta

tensão, dentre outras, fizeram parte de uma construção histórica sob intervenção humana não somente científica, mas também cultural.

Este capítulo tem como objetivo mostrar como se passou a constituição do sistema elétrico atual, sobretudo a época nomeada aqui como *Eletrificação*, ocorrida entre 1880 e 1930, que moldou toda sua composição contemporânea e que pouco foi alterada ao longo dos anos, mas que vem se modificando ligeiramente desde os anos 1970 e tende a mudar radicalmente nos anos que virão. Além disso, este capítulo também tem como proposta apelar para o fato de que, no futuro, as pessoas viverão sob um sistema elétrico desenvolvido atualmente e que isto determinará grande parte do cotidiano de todas elas, assim como ocorreu no passado não tão distante e que reverbera no presente. É preciso estar consciente de que as decisões tomadas no campo tecnológico implicarão em transformações sociais que podem ser boas ou ruins para a humanidade e que elas são traçadas pela história escrita agora. É necessário escolher conscientemente pelas primeiras consequências e não pelas últimas.

Para este estudo histórico, alguns textos principais foram adotados. O mais importante dentre eles foi o livro de Hughes, “*Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*” [97]. Nele, o autor detalha a história da formação dos sistemas elétricos nos anos fundamentais de 1880 até 1930. Para isso, ele analisa principalmente a Alemanha, os Estados Unidos e a Grã-Bretanha. Estes três países foram escolhidos porque foram os precursores. Os acontecimentos de maior importância se passaram nestes locais. Seguindo também esta linha, o texto de Lévy-Leboyer [127] serviu para a abordagem da França.

Outras duas referências de maior relevância foram o livro de Bowers [32] e o pequeno livro de di Cropani [49]. A primeira conta, de forma detalhada, as origens do sistema elétrico, o desenvolvimento das máquinas elétricas, da telegrafia e da iluminação elétrica, os primeiros fornecimentos de energia elétrica e os equipamentos consumidores. Grande ênfase é dada nos acontecimentos da Grã-Bretanha. Já o segundo, apesar do tamanho diminuto, traz diversas informações interessantes de forma simples sobre as origens do uso da eletricidade pelo homem. Além destes documentos principais, alguns trabalhos seminais e artigos foram usados e serão devidamente referenciados ao longo da seção.

Como qualquer outro feito histórico, a geração de energia elétrica não segue uma linearidade; os acontecimentos ocorrem de forma diversa no espaço e no tempo. Apesar disso, é possível determinar certa ordem para os eventos mais importantes. De acordo com Hughes, pode até ser compreendido um padrão evolutivo para grandes sistemas tecnológicos:

A história dos sistemas evolutivos ou expansivos podem ser apresentados passando por fases nomeadas a partir da predominância das seguintes atividades: *invenção, desenvolvimento, inovação, transferência e crescimento, competição e consolidação*. Com o amadurecimento do sistema, eles ganham *estilo e momentum*. As fases da história dos sistemas tecnológicos não são simplesmente sequenciais; eles se sobrepõem e retrocedem [98].¹

Neste capítulo, os períodos históricos são divididos parcialmente dessa maneira em seções para melhor compreensão de cada momento.

Entre 1660 e 1831, surgiram os primeiros geradores elétricos. Contudo, inicialmente nenhum deles podia produzir eletricidade de forma contínua. Todos funcionavam

¹ Neste trabalho, todas as citações de referências de língua estrangeira foram traduzidas livremente.

transitoriamente. Foi só em 1800 que isto mudou com a invenção da pilha de Volta. Não obstante seu funcionamento contínuo, a duração da geração era tão pequena e pouco eficiente que não servia para aplicações residenciais, comerciais ou industriais. Sendo assim, estes primeiros aparelhos eram utilizados somente para alguns experimentos científicos ou demonstrações e, portanto, este período será chamado aqui de *Geração Experimental*. Para ele, as referências estudadas foram [32] e [49].

O ano de 1831 foi decisivo para a engenharia elétrica, assim como para toda a humanidade. Apesar de ter construído aquilo que se pode chamar de primeiro motor elétrico da história em 1821, foi somente dez anos depois que Michael Faraday (1791-1867) descobriu o fenômeno físico da indução eletromagnética. Com este feito, foi possível o desenvolvimento das máquinas elétricas rotativas e estáticas. Entre 1831 e 1880, o mundo passou por um período de *evolução das máquinas elétricas*. Esse processo claramente não acabou depois destes anos, mas eles foram cruciais para o que viria em seguida. Os mesmos trabalhos, [32] e [49], foram utilizados para esta seção.

Simultaneamente ao desenvolvimento das máquinas elétricas, surgiram dois artefatos elétricos que mudaram radicalmente o modo de vida do ser humano. A geração de energia elétrica não teria evoluído tanto e tão rapidamente sem eles. A *telegrafia elétrica* e a *iluminação elétrica* foram o impulso para o avanço dos geradores elétricos, assim como para o sistema elétrico como um todo. Por esse motivo, eles devem ser analisados separadamente e isto é feito. Da mesma forma que nas outras duas seções, [32] e [49] foram consultados.

Nos anos 1880, o sistema elétrico de alimentação propriamente dito foi criado e implementado. O que antes não passava de experiências, finalmente se tornou realidade. Os 50 anos, chamados aqui de período da *Eletrificação*, que aconteceram dali em diante formaram todo o modelo ainda em voga. As invenções fundamentais, assim como as decisões principais para que o sistema elétrico se tornasse aquele em que a corrente alternada (CA) trifásica em frequência bem definida, com geração de energia elétrica em grandes estações centrais e transmitida em linhas quilométricas de alta tensão se tornasse o padrão mundial são datadas desta época. Por esse motivo, a maior parte deste capítulo está concentrado neste período. Como já assinalado, o livro de Hughes [97] embasa o estudo deste momento histórico na Alemanha, nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha. O livro de Bowers [32] também provê algumas ideias sobre este último. O texto de Lévy-Leboyer [127] serve para o caso da França.

Após esses anos iniciais, o sistema elétrico se estabeleceu em um modelo rígido e que teve poucas alterações após 1930. Depois desta data, os avanços não foram tão radicais a ponto de serem analisados minuciosamente. A única grande novidade até os anos 1970 foi a inserção das usinas nucleares na geração de energia elétrica após a Segunda Guerra Mundial. Assim, a introdução delas no sistema elétrico será estudada de forma simplificada no período que aqui toma o termo emprestado de Hughes [97] e que pode ser chamado de *crescimento previsível* com duração de 1930 até os anos 1970.

Os anos 1970 são muito importantes dentro da história da engenharia elétrica, porque depois desta década o sistema elétrico, pouco flexível em tantos anos, passou a absorver certas mudanças. A crise do petróleo de 1973 colocou em dúvida a composição da geração de energia elétrica estabelecida no fim do século XIX com uso de combustíveis fósseis e hidroelétricas e após a Segunda Guerra Mundial com energia nuclear. Acidentes nucleares

como aquele ocorrido em Three Mile Island e em Chernobil da mesma época também colocaram em julgamento esta última fonte de energia. Deste momento de mudanças até atualmente, a energia renovável entrou de vez no leque da produção de energia elétrica e a transição de fontes não-renováveis para as renováveis se estende até os dias de hoje, com a Geração Distribuída sendo ponto central nesta transformação tecnológica.

1.1 - O Período da Geração Experimental (1660-1831)

Os anos 1660 até 1831 formam a era da *invenção*; do uso da eletricidade basicamente para experimentação. Por este motivo, ela pode ser chamada de período da *Geração Experimental*. Foi a época em que a engenharia elétrica começava a engatinhar. Foi neste tempo que a energia elétrica iniciou a transição de fenômeno natural a recurso natural, ou seja, a eletricidade passava a ser algo útil para o ser humano.

O homem convive com as descargas elétricas atmosféricas desde seu próprio surgimento e as tem muitas vezes como fazendo parte das religiões e mitologias, bastando lembrar-se do deus da mitologia grega Zeus. Entretanto, a eletricidade só passou dos planos teológico e mitológico para o científico também (ou ao menos filosófico) quando, como conta a história escrita, o filósofo grego Tales de Mileto (sécs. VI e VII A.C.) em cerca de 600 A.C. observou e estudou o fenômeno hoje conhecido como eletricidade estática ou eletrostática. Ele notou que esfregando a resina fóssil âmbar, chamada *elektron* em grego antigo, poderia atrair fiapos de palha [49, 32].

Desde então, a eletricidade não passava de curiosidade entre as pessoas até que em 1600, o médico inglês William Gilbert (1540-1603) publicou o livro conhecido como *De Magnete*, um estudo sistemático que fez com leituras, vários experimentos e reflexões sobre magnetismo e eletricidade, inclusive separando os dois fenômenos (em termos de atração e repulsão) e cunhando a última palavra a partir do termo grego para âmbar [83].

Pouco tempo depois, por volta de 1660, aparecia o aparelho pioneiro na geração controlada de energia elétrica. O físico alemão Otto von Guericke (1602-1686) criou, provavelmente, o primeiro gerador eletrostático: uma máquina de fricção formada por um globo de enxofre que, quando girava em um eixo, podia ser esfregado por uma mão ou um pano em sua superfície. Carregado eletrostaticamente por este atrito, a esfera podia causar pequenas faíscas (arcos elétricos) e atrair pequenos pedaços de palha [32].

Os primeiros geradores de eletricidade eram, portanto, geradores por fricção, ou seja, por eletrostática. Além do primeiro de von Guericke, outros foram produzidos e eles eram feitos basicamente de discos ou esferas de vidro que girando entravam em atrito com pedaços de couro. Estes dispositivos rudimentares serviam apenas para observar alguns fenômenos elétricos, mas de nada eram úteis para a produção contínua de energia elétrica. Apesar disso, despertaram investigações científicas acerca da eletricidade, além da curiosidade das pessoas; mais esta última do que as primeiras.

O cenário mudou no ano de 1745 quando foi descoberto um meio de acumular ou armazenar carga elétrica. O nome deste primeiro gerador acumulador ficou conhecido como garrafa de Leyden, pois foi nesta cidade que foi desenvolvido pelos holandeses Pieter van

Musschenbroek (1692-1761) e Andreas Cunaeus (1712-1788). Seu princípio físico também é a eletrostática. Este aparelho é constituído de uma garrafa de vidro e placas metálicas no seu interior e exterior. Ao se ligar um gerador de fricção através de um fio metálico até o interior da garrafa, os elétrons livres se acumulam na lâmina interna. Entre esta e a placa externa há atração das cargas que são impedidas de circular pelo vidro e pelo ar entre elas, por serem isolantes. Assim surge uma diferença de potencial que, sob contato de um fio metálico, leva a uma descarga elétrica [32, 49]. Este era, portanto, também um dispositivo descontínuo de produção de energia elétrica. Porém, permitiu mais estudos sobre a eletricidade e surgiram mais interessados sobre o assunto. Além disso, este equipamento foi o precursor do atual capacitor, que inicialmente era chamado condensador.

Ao longo do tempo, outras máquinas acumuladoras foram criadas, incluindo uma chamada *electrophorus*, em 1775, pelo cientista italiano Alessandro Volta (1745-1827) [32]. Contudo, a maior contribuição deste homem não foi essa invenção, mas sim outra que revolucionou o mundo da eletricidade.

Arqueólogos descobriram nos anos 1930 no Iraque objetos, atualmente conhecidos como “baterias de Bagdá”, que são descritos como versões antigas das baterias e que, provavelmente, foram criados no Império Persa Sassânida entre os anos 225 e 640 D.C. [11]. Apesar disso, não há relatos do uso destes aparelhos e mesmo nos dias de hoje é um mistério a aplicação deles nos tempos remotos.

Todavia, a bateria e a pilha são reconhecidas como criações de Volta em 1800. Seu aparelho, diferentemente da garrafa de Leyden, foi o primeiro a produzir corrente elétrica de forma contínua quando se desejasse. Antes disso, os fenômenos elétricos experimentados pelo homem eram essencialmente transitórios. Estudando os trabalhos de Luigi Galvani (1737-1798) sobre os estímulos das pernas de sapos mortos com eletricidade, Volta desenvolveu sua invenção que consistia literalmente de uma pilha (daí o nome) de dois condutores diferentes de forma alternada (como prata e zinco ou cobre e zinco) em contato através de camadas de líquidos condutores, tais como água salgada e vinagre, ou pedaços de pano embebidos nestes líquidos [32, 49]. Foi este o objeto que permitiu finalmente os experimentos científicos mais profundos acerca da eletricidade e o consequente avanço em seus estudos também teóricos.

Obviamente as pilhas líquidas de Volta, também chamadas de células químicas, por transformarem energia química em elétrica, fizeram grande sucesso. Sua maneira única de produzir, mesmo que em pequena escala, e armazenar energia elétrica e poder utilizá-la de forma contínua foi uma verdadeira revolução no mundo da engenharia elétrica. O aparelho passou por evoluções e as primeiras baterias a serem fabricadas em massa e que fizeram parte das ferramentas dos eletricistas (assim eram chamadas todas as pessoas que trabalhavam com energia elétrica na maior parte dos séculos XVIII e XIX) em suas investigações científicas até 1830, foram aquelas inventadas pelo químico escocês William Cruickshank (?-1810 ou 1811). Estas consistiam de uma caixa de madeira com placas de zinco e cobre soldadas em seu interior e seladas com cera [32].

Outro avanço importante ocorreu pouco tempo depois. Foram inventadas as baterias secundárias, que funcionavam como as outras baterias, chamadas primárias, mas que podiam ser recarregadas. Estas, como será visto posteriormente, tiveram grande importância nos primeiros sistemas de fornecimento de corrente contínua (CC) [32].

1.2 - A Evolução das Máquinas Elétricas (1831-1880)

O cientista inglês Michael Faraday pode ser considerado o fundador da engenharia elétrica moderna. Foi graças a este homem que o poder do ser humano sobre a energia elétrica passou de meramente experimental para aplicável no cotidiano.

Em 1821, ele criou o primeiro motor elétrico da história da humanidade. Em 1831, ele descobriu a lei física da indução eletromagnética e ainda inventou o primeiro equipamento a gerar energia elétrica continuamente a partir de energia mecânica, ou seja, o primeiro gerador elétrico rotativo. Estes eventos iniciais levaram a uma época de *desenvolvimento*.

Antes de contar os feitos de Faraday, é preciso conhecer a grande descoberta do professor de física dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851). Ao fazer um experimento com uma corrente elétrica passando por um fio de cobre e uma bússola em sua proximidade, ele descobriu uma relação entre eletricidade e magnetismo. A corrente elétrica produzia magnetismo ao seu redor e fazia com que a bússola tivesse sua orientação modificada. Nascia aí o estudo do eletromagnetismo [32, 49].

No ano de 1821, enquanto produzia um trabalho sobre todo o desenvolvimento do eletromagnetismo até aqueles dias, Faraday reproduziu todos os grandes experimentos nesta ciência. A partir deste trabalho, seguindo as ideias de Oersted e curioso sobre a interação entre eletricidade e magnetismo, ele acabou realizando dois dispositivos que produziam movimento rotativo contínuo usando força circular magnética ao redor de um condutor energizado eletricamente, ou seja, os primeiros motores elétricos [32].

O resultado foi a construção de um aparato que fazia movimentos circulares a partir de uma bateria, fios, barras magnéticas de ferro e mercúrio. O objeto era composto de duas vasilhas de vidro colocadas lado a lado e preenchidas de mercúrio. Numa das vasilhas, uma barra magnética fica flutuando no mercúrio, mas preso no fundo por um fio. Ela gira quando passa corrente elétrica da bateria em um condutor de cobre suspenso fixo no centro da circunferência de seu movimento. Já na outra vasilha, uma barra magnética é afixada no interior do mercúrio, mas acima dela um condutor de cobre está preso e pendurado de tal maneira que está livre para girar ao redor desta barra assim que uma corrente elétrica da bateria passa por ele [73].

Dez anos depois, outra descoberta feita por Faraday mudaria o rumo da história da humanidade. Em 1831, ele apresentou a lei da indução eletromagnética. Ele se perguntou: se eletricidade gerava magnetismo, o oposto também não poderia acontecer? Para chegar nisso, o inglês fez alguns experimentos e os apresentou a Royal Society em 24 de novembro de 1831.

No primeiro, ele construiu um anel de ferro e enrolou nele duas bobinas de cobre separadas e em oposição. Em uma delas (A) ele ligou uma bateria e na outra (B) um galvanômetro (aparelho que acusa a passagem de corrente elétrica). Quando a bateria estava ligada e passava corrente pela bobina A, nada ocorria na bobina B. No entanto, no instante que a bateria era ligada, o galvanômetro indicava uma corrente elétrica na bobina B. Já no momento que a bateria era desligada, o galvanômetro também defletia, mas em sentido oposto, indicando uma corrente em direção contrária. Nos dois casos, a corrente cessava em

poucos segundos [73]. Era a descoberta da indução eletromagnética e o germe do transformador e tantos outros dispositivos.

No segundo experimento, Faraday pegou somente uma das bobinas com interior oco e ligou suas extremidades num galvanômetro com sua agulha parada no centro. Em seguida, ele introduziu uma pequena barra cilíndrica magnética no interior da bobina. Enquanto fazia isso, a agulha do galvanômetro se moveu para um lado. Deixando a barra parada no interior da bobina, a agulha retornou à sua posição inicial. Retirando a barra, a agulha do galvanômetro defletiu para o lado oposto de sua entrada na bobina [73]. A variação de um campo magnético causava o surgimento de uma corrente elétrica e esta podia ter direções diferentes. Em outras palavras, a taxa de variação do fluxo magnético produz uma tensão elétrica. Surgia assim a lei de Faraday.

No terceiro experimento, o cientista, fazendo uso de um poderoso ímã da Royal Society, ligou dois polos em forma de barra bem próximos um do outro e no meio deles colocou um disco de cobre preso em um eixo em seu centro permitindo que ele girasse. Faraday ligou então dois fios em um galvanômetro e no disco e, ao girá-lo, percebeu que a agulha do aparelho de medição defletia. Se girasse mais rápido, a agulha defletia ainda mais e se girasse no outro sentido, a deflexão era contrária à primeira [73]. Estava criado o primeiro gerador elétrico rotativo, o disco gerador de Faraday.

Michael Faraday deu os primeiros passos da longa caminhada da engenharia elétrica. Dali em diante, as máquinas elétricas evoluíram a passos largos. Bastou apenas um ano de seu trabalho para que aparecessem geradores mais avançados.

O fabricante de instrumentos francês Antoine Hippolyte Pixii (1808-1835) apresentou aquela que pode ser considerada a base dos geradores modernos em 1832. Ele colocou um grande ímã em forma de ferradura que girava por uma manivela sob duas bobinas de fio de cobre nas quais a corrente elétrica era gerada e estas eram ligadas em uma vasilha de mercúrio. Faíscas podiam ser vistas neste líquido, demonstrando a geração de energia elétrica. Naquela época, as maiores aplicações da eletricidade eram processos químicos, tais como a decomposição da água. Este foi o primeiro objetivo que Pixii buscava com seu aparelho. Ele aperfeiçoou sua máquina, aumentando o número de voltas da bobina e usando um ímã mais forte. No entanto, a saída era uma corrente alternada e o processo não se concretizava corretamente com a mistura de oxigênio e hidrogênio ocorrendo. O fabricante de instrumentos resolveu o problema ao, primeiramente, trocar o contato com mercúrio para pequenas placas de cobre e, em seguida, utilizar uma invenção e sugestão do também francês André-Marie Ampère (1775-1836) que funcionava como um comutador e retificava a corrente na saída, ou seja, transformava a corrente alternada em contínua pulsante, possibilitando definitivamente a decomposição da água [32].

A partir da invenção de Pixii, os geradores de corrente contínua (alguns poucos de corrente alternada) foram sendo aperfeiçoados de várias maneiras, todos eles usando ímãs permanentes e comutadores até cerca de 1850. É interessante observar que, baseado nas principais aplicações da época, em geral para os processos químicos, tais como a eletrólise, a saída procurada em geradores era em sua vasta maioria em corrente contínua. Em alguns casos, como para a telegrafia, eram procuradas ondas quadradas. A corrente alternada, principalmente as ondas senoidais, não era de grande relevância.

O próximo avanço dos geradores foi dado pelo italiano Antonio Pacinotti (1841-1913) e o belga Zénobe Théophile Gramme (1826-1901) que criaram de forma independente a armadura em anel por volta dos anos 1860 e possibilitaram a produção de geradores práticos. Com efeito, os geradores de Gramme foram bastante utilizados nos anos 1870, principalmente para as primeiras instalações de iluminação elétrica [32].

Um grande passo para que os geradores rotativos se firmassem como a maneira definitiva de produção de energia elétrica de forma contínua foi a criação dos geradores auto-excitados. Estes dispositivos fazem uso da corrente produzida pelo gerador para energizar seus próprios enrolamentos de campo. As ideias surgiram por volta dos anos 1850 e 1860 e várias pessoas participaram de sua invenção, tais como o dinamarquês Soren Hjorth (1801-1870), os irmãos alemães Siemens e os britânicos Samuel Alfred Varley (1832-1921) e Charles Wheatstone (1802-1875). As aplicações desenvolvidas de forma independente e depois em colaboração por Charles William Siemens (1823-1883) e Wheatstone em 1867 explicavam que “uma armadura girando entre os polos de um eletromagneto possuindo algum magnetismo residual gerará eletricidade e se a armadura está conectada por um comutador no enrolamento do eletromagneto então o magneto é reforçado e mais corrente é produzida [32]”. Varley pela mesma época tentou obter uma patente para um gerador auto-excitado. A grande importância destes dispositivos foi mostrar o potencial que as máquinas rotativas tinham para gerar enormes quantidades de energia elétrica. A iluminação elétrica foi estimulada por isso e as primeiras instalações de iluminação eram muitas vezes alimentadas por geradores auto-excitados [32].

As primeiras aplicações dos geradores entre os anos 1850 e 1870 eram fundamentalmente para processos químicos, para telegrafia elétrica, para explosões em minas e para iluminação elétrica. Os motores elétricos só foram ganhar importância depois. Ainda assim, eles evoluíram, mesmo que de forma menos expressiva, paralelamente aos geradores rotativos. Os detalhes desta evolução não serão mostrados aqui, mas o leitor pode consultar o capítulo 4 de [32].

Foram vários os motivos que não fizeram os motores elétricos progredirem da mesma forma que os geradores. Em primeiro lugar, eles eram de pequeno porte e não podiam realizar tarefas práticas para as atividades humanas, sejam residenciais, públicas ou industriais, sem que tivessem uma estrutura formada por vários aparelhos de grande dimensão ou fossem utilizados em grande quantidade. Em segundo lugar, eles funcionavam em corrente contínua e eram alimentados por baterias. Como estas não geravam potência elétrica em grande escala, os motores não poderiam funcionar por muito tempo, nem com torques elevados.

A dependência das baterias e a estrutura dos primeiros motores elétricos os fizeram fracassar em termos de eficiência e economia. Todo o aparato para funcionamento adequado dos motores tinha alto custo e as baterias eram muito caras. Além disso, algumas tentativas iniciais até foram feitas para locomoção por motores elétricos, tais como a primeira locomotiva elétrica (alimentada por baterias) criada pelo escocês Robert Davidson (1804-1894) em 1842. Apesar da novidade e do uso prático, Bowers [32] calcula que sua eficiência total era muito pequena, entre 10% e 16%. Ou seja, apenas mostraram o baixo rendimento destas máquinas.

1.3 - Os Primeiros Impulsos para a Geração: A Telegrafia Elétrica e a Iluminação Elétrica

Após o aparecimento dos primeiros geradores elétricos rotativos, começaram a surgir aplicações importantes da eletricidade. Como se viu, os motores elétricos, apesar de existirem desde 1821, não obtiveram grande êxito em um primeiro momento. Por outro lado, dentre as possibilidades do uso controlado da energia elétrica, duas tecnologias se destacaram no início e foram verdadeiros *impulsos* para a engenharia elétrica: a telegrafia elétrica e a iluminação elétrica. A geração e o consumo estão interligados e o crescimento de um leva certamente ao desenvolvimento do outro. Nesta seção, portanto, será visto como o progresso dos dois artefatos supracitados teve enorme influência na formação do sistema elétrico.

A telegrafia elétrica foi a primeira grande inovação a surgir graças à geração contínua de eletricidade. Para seu funcionamento, em termos de alimentação, uma grande bateria ou um pequeno gerador bastava. Por isso, ela não precisou esperar até a aparição das grandes usinas de energia elétrica para evoluir e rapidamente se disseminou [49].

Algumas invenções foram feitas desde 1816, todas experimentais, sendo que a maioria funcionava com um sistema que indicava em papeis letra por letra uma mensagem e fazia uso primeiramente da eletricidade estática e depois da contínua. Porém, nenhuma delas teve sucesso como aquela que surgiria em 1837, 6 anos após as grandes descobertas de Faraday.

Os ingleses William Fothergill Cooke (1806-1879) e Wheatstone, trabalhando em conjunto, criaram o primeiro telégrafo elétrico comercial em 1837. Ele podia enviar sinais em uma distância considerável. No ano de 1838 o sistema já estava instalado em uma ferrovia inglesa. Em seguida, eles desenvolveram um telégrafo aperfeiçoadão, o telégrafo “ABC”. Este dispositivo funcionava de tal maneira que sempre que se enviasse o sinal de uma letra, o aparelho receptor, através de um dial, mostrava a letra por um curto período de tempo. Uma pessoa anotava a mensagem obtida. Logo depois, outra melhora foi feita. No lugar do dial, o aparelho imprimia a mensagem. Para que seu telégrafo “ABC” funcionasse de maneira adequada, Wheatstone se envolveu enormemente no desenvolvimento dos geradores elétricos rotativos, criando ele próprio alguns de grande importância, como o gerador auto-excitado, conforme já citado. As invenções rapidamente se espalharam pela Europa [32].

Na mesma época, no lado Oeste do oceano Atlântico, nos Estados Unidos, o pintor e escultor americano Samuel Findlay Breeze Morse (1791-1872) também desenvolvia seu próprio telégrafo, um equipamento que emitia e recebia códigos de curtos e longos sinais, hoje conhecidos como “código Morse”. O aparelho receptor imprimia o código com seus sinais, mas logo os operadores perceberam que podiam anotar as mensagens simplesmente pelo som emitido na impressão. O sistema de Morse logo se expandiu pelo país da América do Norte [32].

O uso do telégrafo se alastrou por todo o Velho Continente, assim como pelas terras estadunidenses. Companhias ferroviárias, governos, imprensa e pessoas comuns, todos começaram a fazer uso desta nova tecnologia da comunicação. No ano de 1838, as primeiras instalações em ferrovias foram feitas na Grã-Bretanha. Em 1843, as linhas já tinham aumentado e neste ano o anúncio do nascimento do segundo filho da rainha inglesa Victoria foi transmitido de Windsor até Londres. Em 1868, havia cerca de 130 mil quilômetros de

cabos de telegrafia no Reino Unido e mais de 5,6 milhões de mensagens já tinham sido enviadas. Nos Estados Unidos, Morse convenceu o Congresso a ter uma linha telegráfica entre Baltimore e Washington e seu funcionamento teve início em 1843. Menos de 20 anos depois, em 1861, Nova Iorque estava ligada pela telegrafia a São Francisco, atravessando todo o país. Em 1866, a Europa e a América estavam ligadas entre si por cabos telegráficos e 800 mil mensagens foram enviadas nesta época entre os dois continentes [32].

Outro fato importante da telegrafia elétrica para o sistema de energia elétrica foi o envolvimento de seus pioneiros. Dentre eles, a família alemã Siemens juntamente com Johann Georg Halske (1814-1890), que formaram a empresa Siemens & Halske, e o inventor americano Thomas Alva Edison (1847-1931) se destacam. Ambos começaram suas carreiras no desenvolvimento, produção e comércio de telégrafos e componentes para estes equipamentos, indo de fios até geradores. Estas iniciativas deram os alicerces para estas personalidades avançarem futuramente na construção do sistema elétrico e são as origens das grandes indústrias da eletricidade.

Com a propagação da telegrafia surgiram técnicas, estudos, fábricas, organizações, reconhecimento do governo, etc. E toda experiência daria força para o avanço rápido do mundo da eletricidade. Assim, ela teve papel significativo no desenvolvimento da eletricidade e dos geradores elétricos rotativos e como avanço tecnológico por si só abrindo as portas das telecomunicações para a humanidade. A telegrafia, desta maneira, deu grande parte das bases materiais do sistema elétrico. Todavia, em sua estrutura, a telegrafia não teve o mesmo impacto que a iluminação elétrica. Esta sim mostrou o rumo que o sistema elétrico iria tomar.

Considera-se que as primeiras descobertas acerca da iluminação elétrica são devidas ao cientista inglês Humphry Davy (1778-1829), que demonstrou em 1802 que uma luz poderia ser produzida a partir de um arco elétrico entre pedaços de carbono ligados em alta tensão [32]. Ele não deu muita importância a este fenômeno, mas esta seria a base para a invenção das primeiras lâmpadas elétricas: as lâmpadas a arco voltaico.

Durante os anos seguintes, principalmente em torno dos anos 1840 e 1850, a lâmpada a arco voltaico foi sendo desenvolvida. Apesar disso, ela não era vista como uma solução adequada para iluminação artificial, principalmente pelo fato de fazer uso de baterias e, portanto, não era economicamente viável. Isto mostra quão importante foi a relação mútua de evolução entre a iluminação elétrica e a geração de energia elétrica.

O primeiro uso de geração de energia elétrica para iluminação artificial foi realizado pelo professor de física belga Floris Nollet (1794-1853) quando ele patenteou um gerador elétrico que funcionava a partir do vapor em 1850 para fazer eletrólise da água. O oxigênio e o hidrogênio resultantes eram usados em um aparelho chamado luz oxídrica (conhecida como luz da ribalta, do inglês *Limelight*), que a partir da combustão destes gases aquecia um cilindro de cal que, por sua vez, produzia uma iluminação intensa. Este dispositivo, desta maneira, não gera iluminação diretamente a partir da eletricidade, mas de maneira indireta. Sendo assim, a empresa anglo-francesa *Société de l'Alliance* fundada por Nollet para aplicar suas ideias surgiu em 1852 e foi provavelmente a primeira empresa instituída para estabelecer iluminação a partir da eletricidade [32].

O professor de química inglês Frederick Hale Holmes (1812-18?), trabalhando com Nollet, ficou convencido e mostrou que, fazendo uso da máquina criada por este último, era

possível alimentar com corrente contínua as lâmpadas a arco voltaico com geradores rotativos. Assim, ele procedeu nos anos 1850 e aplicou sua ideia instalando grandes geradores elétricos ligados a lâmpadas a arco voltaico em faróis [32].

A invenção que fez a iluminação elétrica se espalhar de vez foi a “vela elétrica” ou “vela de Jablochkoff” de 1876, assim batizada em referência ao seu inventor, o engenheiro de telegrafias russo Pavel Nikolayevich Yablochkov (também grafado Jablochkoff, 1847-1894). Suas grandes diferenças com as lâmpadas a arco voltaico precedentes eram seu baixíssimo custo, sua flexibilidade, podendo ser usada tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada, a possibilidade do uso de 16 delas em série com um gerador, além do brilho muito superior àquele da iluminação a gás. Seu maior problema era a durabilidade, que não passava de uma hora e meia. Para resolver isto, mecanismos automáticos de troca foram criados [32].

A primeira grande instalação de iluminação elétrica de rua e que chamou a atenção do público em geral foi a de Paris inaugurada em 1878. Fazendo uso das velas de Jablochkoff com mudança automática ligadas em dínamos (geradores de corrente contínua) Gramme operando por máquinas a vapor (cada um alimentando 16 lâmpadas), a *Avenue de l'Opéra* e a *Place de l'Opéra* eram diretamente iluminadas por eletricidade. Os geradores elétricos ficavam instalados em porões dos prédios vizinhos e da própria casa de ópera, sendo que os condutores até as lâmpadas ficavam em canos subterrâneos. Passando da meia noite, parte da iluminação elétrica era substituída pela a gás. O preço da primeira em relação à última era quatro vezes maior. No mesmo ano, outros locais da cidade também foram iluminados do mesmo modo, tais como o *Arc de triomphe*. Em seguida, outras cidades como Bruxelas, Madri e São Petersburgo receberam instalações similares [32].

Desde esta época, vantagens e desvantagens não somente técnicas, mas também sociais e ambientais dos sistemas elétricos já eram observadas. O engenheiro inglês G. H. Stayton, conforme citado por Bowers [32], via como um grande empecilho para o avanço das instalações iguais a de Paris, a inviabilidade da distribuição para distâncias maiores e a grande quantidade necessária de estações geradoras construídas para poucas lâmpadas. A expansão da iluminação elétrica só seria possível se estes obstáculos fossem ultrapassados. Por outro lado, como vantagem:

Cerca de uma hora e meia do consumo diário é pouparado em consequência da iluminação instantânea e extinção; a lâmpada é muito superior ao gás e não machuca; o calor em um cômodo, tantas vezes insuportável no caso do gás, é muito pouco sentido; as cores mais delicadas são preservadas; o ar não é consumido como no caso do gás; não há nenhuma chance de explosões e, apesar da lâmpada ser muito forte nas ruas, nenhum acidente com cavalos ocorreu [32].

Superados os problemas, a iluminação elétrica seria uma enorme conquista social e ambiental. As pessoas poderiam aproveitar a noite mais ainda, fazendo atividades raras para o período noturno, tais como o deslocamento pelas ruas de forma mais segura, trabalho, comércio, leitura, etc. Também a poluição diminuiria drasticamente comparada com a iluminação a gás. Sendo assim, o sistema elétrico deveria ter inovações que pudessem deslanchar o avanço das lâmpadas elétricas. Antes de ocorrerem estes progressos, porém, a própria iluminação elétrica passou por uma evolução das lâmpadas a arco voltaico para as lâmpadas de filamento ou incandescentes.

Os principais desenvolvedores de lâmpadas de filamento foram o físico inglês Joseph Swan (1828-1914) e Edison. Eles as fizeram de forma independente e satisfatória por volta de 1878 e 1879 após a possibilidade de se obter vácuo adequado em um bulbo fazendo uso da bomba de mercúrio criada pelo químico alemão Hermann Sprengel (1834-1906) em 1865 [32]. Em ambos os casos, a lâmpada de filamento era formada por um recipiente de vidro com um filamento de fio no vácuo em seu interior. Quando uma corrente elétrica passa por este filamento, ele esquenta de tal forma que produz luz: este é o processo denominado incandescência.

Várias razões fizeram com que esta lâmpada desbancasse a lâmpada a arco voltaico e se firmasse como o equipamento ideal para a iluminação elétrica. O primeiro era sua alta duração em relação à outra. Em segundo lugar, além de poder ser usada por mais tempo, ela não precisava de troca de peças, diferentemente da lâmpada a arco voltaico que precisava da substituição de suas barras de carbono sempre que estas acabavam. Outras vantagens das lâmpadas de filamento também ajudaram a fazer com que as primeiras formas de lâmpadas a arco voltaico já estivessem praticamente extintas por volta de 1910.

Efetivamente, o maior rival da lâmpada incandescente ainda era a iluminação a gás, principalmente porque seu preço era menor que a primeira. Mesmo assim, a invenção ganhou espaço no mercado e a iluminação elétrica agora poderia se abranger para uso residencial e comercial. Todavia, para que o meio definitivo de iluminação artificial fosse a elétrica foi preciso a visão de Edison. Suas invenções e ideias consagraram o início do período chamado *Eletrificação*.

1.4 - A *Eletrificação* (1880-1930)

A *Eletrificação*, período que durou dos anos 1880 até 1930, definitivamente marcou a formação do modelo do sistema elétrico tal como ainda é usado hoje em dia. Foi um momento de *inovação, transferência tecnológica, crescimento, competição e consolidação*.

A partir da invenção da lâmpada de filamento prática, a energia elétrica passou a ser vista como um fenômeno natural que poderia categoricamente ser utilizado em benefício do ser humano para diversas atividades diferentes do dia a dia e não como mera curiosidade ou restrito a laboratórios e experimentos. No entanto, para que isso fosse possível era preciso que ocorresse de forma economicamente viável. O avanço de uma tecnologia muitas vezes depende mais de suas características financeiras, sociais e culturais do que técnicas.

Com o sistema elétrico isso não é diferente. A arquitetura utilizada até os dias de hoje foi forjada por fatores sobretudo econômicos, sociais e políticos. Como será visto ao longo deste trabalho, foram estas qualidades que teceram o caminho percorrido na história pela tecnologia da energia elétrica.

Como se explicou, as primeiras lâmpadas elétricas enfeitavam as paisagens frequentadas pelas pessoas mais ricas, tais como os arredores de óperas e teatros. No outro lado do espectro social, as pessoas mais pobres raramente tinham dinheiro para velas ou gás.

De fato, fora a iluminação dos bairros ricos, as primeiras pessoas a se beneficiarem das lâmpadas elétricas faziam parte da aristocracia inglesa. Estas primeiras instalações são

descritas por Bowers [32]. O próprio Swan, conforme citado por este autor, afirma que a primeira casa iluminada por suas lâmpadas incandescentes em 1881 foi a de Lord Armstrong (1810-1900), rico industrialista dono da companhia Armstrong Whitworth, uma empresa de construção mecânica e de armamentos. Sua mansão, conhecida pelo nome de Cragside, foi também a primeira a ser alimentada por hidroeletricidade, com geradores instalados em lagos da própria propriedade. A instalação era composta por 45 lâmpadas.

Outra das primeiras casas mencionadas a serem iluminadas eletricamente foi a do político e dono de uma companhia de cerveja Octavius Coope (1814-1886). Em sua mansão foi construída uma estação de geração de energia elétrica movida a vapor com quatro geradores para alimentar as lâmpadas.

A casa do famoso cientista inglês Sir William Thomson ou Lord Kelvin (1824-1907) também possuía sua própria geração de energia elétrica, capaz de fornecer energia para 50 lâmpadas. A geração era composta por um gerador Siemens suprido por gás e uma bateria de 120 células para alimentar as lâmpadas quando as máquinas não estavam funcionando [32].

Dentre outras instalações particulares, vale destacar os navios, que se beneficiavam da segurança trazida pelas lâmpadas elétricas em relação à iluminação a gás. Também se destaca a corte judicial de Londres e a casa de ópera em Viena [32].

Como pôde ser observado, praticamente todas as primeiras instalações tinham suas próprias gerações, mesmo que fossem de diversas fontes diferentes, tais como vapor, gás ou hidroeletricidade, indo no sentido contrário do senso comum de que as primeiras formas de geração de energia elétrica também já eram em grandes usinas e de que a geração local é somente emergencial ou uma novidade para propriedades privadas. As primeiras gerações de energia elétrica eram, de fato, gerações locais, particulares e de pequena escala.

O fornecimento de energia elétrica, no entanto, se tornou público logo em seguida. Vários esquemas são proclamados pioneiros na alimentação por energia elétrica. Porém, as duas cidades que mais recebem este título são Godalming e Chesterfield, ambas na Inglaterra.

De acordo com Strange [170], vários locais no próprio país britânico também possuíam instalações de iluminação elétrica desde 1878, mas as duas citadas merecem reconhecimento por alguns motivos em particular. O primeiro motivo é que, com exceção de Godalming, todas foram planejadas de forma experimental somente. O segundo é que, por força das condições, as duas cidades se viram obrigadas a fazer uso exclusivo da eletricidade para iluminação pública. Isto porque, coincidentemente, em setembro de 1881 o contrato com a companhia de gás para iluminação de rua expirou em ambos os locais, pois os administradores públicos não concordaram com o preço alto do gás. Sendo assim, além de terem uma instalação pública de fornecimento de energia elétrica, esta era permanente, com contratos superiores a 12 meses. Outro motivo foi que, diferentemente do esquema estabelecido e já explicado de Paris de 1878, o suprimento de energia elétrica da cidade de Godalming servia tanto à iluminação pública quanto à privada de forma comercial. Os moradores poderiam usufruir da iluminação elétrica em suas casas ou nos comércios.

Para que os sistemas funcionassem, foram edificadas estações geradoras centrais. Em Godalming, foi aproveitada uma instalação já existente de uma roda d'água e foi construída uma pequena central hidroelétrica para a alimentação elétrica. No final de 1881, uma grande tempestade fez com que esta forma de geração fosse abandonada para ser substituída pela

geração a vapor. Já em Chesterfield, esta última maneira era a utilizada desde o início. Tanto lâmpadas a arco voltaico quanto incandescentes iluminavam a cidade e as propriedades.

As iniciativas acabaram falhando. Em 1884, ambas as cidades, por conflitos entre os governos locais com os fornecedores particulares de energia elétrica, Siemens em Godalming e Hammond em Chesterfield, pararam de ter iluminações elétricas e retornaram à iluminação a gás. Apesar disso, as duas experiências foram de grande relevância para o sistema elétrico em geral. Foram vários os problemas técnicos apresentados ao decorrer do período de iluminação elétrica, mas estes foram perseguidos e deram um conjunto de ideias para os sistemas posteriores. Os primeiros distúrbios na que seria futuramente chamada de qualidade da energia se apresentaram ali, tais como o fato de que o brilho das lâmpadas de filamento era menor quanto mais distante elas estivessem das centrais geradoras. Atualmente este empecilho é facilmente compreendido pelos engenheiros, mas na época exigia esforços para ser contornado. Com os problemas vieram as primeiras soluções.

Thomas Edison foi a pessoa por trás da fundação do sistema elétrico. Por volta de 1878, depois de obter conquistas no campo da telegrafia, ele decidiu se dedicar à iluminação elétrica. Ele estava certo de que teria grandes resultados e começou a investigar as lâmpadas incandescentes, tentando encontrar a melhor forma de produzi-las.

Seu diferencial em relação aos outros inventores era sua metodologia holística e sua predileção pela criação de sistemas e não meros componentes [97]. Edison, com efeito, acabou desenvolvendo uma das melhores lâmpadas incandescentes da época, possibilitando sua comercialização e uso prático. Mas ele não fez somente isso. Ele pesquisou, experimentou e elaborou um sistema completo para iluminação elétrica, criando desde o gerador até o filamento da lâmpada, do interruptor até os cabos, da topologia da conexão das lâmpadas até o sistema de distribuição de energia. Tudo isso sem falar em todo seu investimento financeiro, suas pesquisas econômicas e científicas, o envolvimento com aspectos políticos, legislativos, jurídicos, etc. Foi Edison, por exemplo, um dos primeiros a fazer uso do sistema elétrico em paralelo. Desta forma, o sistema como um todo tinha o melhor desempenho possível, tanto tecnicamente, quanto economicamente visto que, como ele mesmo explica em uma citação em [97], as partes seriam dependentes. Assim, a lâmpada precisa de certa corrente elétrica para operar bem e, portanto, o gerador deve produzir tal corrente. Vendo em outro sentido, o gerador pode produzir somente tal corrente e, desta forma, a lâmpada deve ser adequada para isso. Isto vale para todos os componentes e, assim, sua empresa teria um grande lucro.

Em 1878, com esboços de suas ideias em mente, Edison já fazia propaganda de seu sistema em entrevistas concedidas [97]. Ele organizou seu projeto com o objetivo de retirar a iluminação a gás de seu trono na área da iluminação artificial. Logo em seguida, ele começaria seu extenso trabalho. O sistema que ele desenvolveu seria construído de tal maneira que a iluminação elétrica fosse mais barata que a gás.

Sua meta final, porém, era a construção de uma estação central de fornecimento de energia elétrica. Ela distribuiria eletricidade para lâmpadas elétricas para uso do público em geral, qualquer que fosse, podendo ser composto de simples moradores que viviam nas proximidades até comércios e indústrias que não ficavam tão distantes. O que ele notou logo de início foi que estas estações centrais deveriam estar localizadas em lugares densamente povoados e que os consumidores que ali habitavam poderiam pagar pela eletricidade. Com isto, o sistema seria rentável e poderia rivalizar com a iluminação a gás. O inventor criou a

empresa *Edison Electric Light Company* e, a partir dela, também criou uma concessionária de energia elétrica para levar adiante seu empreendimento, a *Edison Electric Illuminating Company* de Nova Iorque [97].

Suas ideias inovadoras se solidificaram em 1882. Primeiro em um projeto inaugurado em Londres no começo daquele ano no Viaduto Holborn e, pouco tempo depois, naquele que acabaria sendo reconhecido por muitas pessoas como o primeiro sistema público de geração e distribuição de energia elétrica, a estação central de Pearl Street em Nova Iorque. De fato, este último projeto foi o primeiro a fornecer energia elétrica de forma pública nos Estados Unidos e foi o primeiro planejado por Edison.

Conforme já se explicou, Edison tinha em sua cabeça a edificação de um sistema como um todo e, assim, padrões faziam parte da sua elaboração. Os geradores de suas estações seriam aqueles desenvolvidos pelo próprio inventor. Eram máquinas de grande porte e, por isso, foram apelidadas de geradores “*Jumbo*”. Elas produziam uma enorme potência para alimentar um maior número de lâmpadas, funcionando a partir de máquinas a vapor com potência de 125 *horsepowers* (HPs). Este já era um avanço em relação às máquinas anteriores [97].

Outros padrões instaurados por Edison foram o uso de cabos subterrâneos para distribuição da energia elétrica, assim como a escolha rigorosa por somente alguns modelos de potências de lâmpadas incandescentes (obviamente todas produzidas pelo próprio inventor e sua equipe) e a definição de uma única tensão de fornecimento. Anteriormente a Edison, as lâmpadas eram produzidas e usadas nas mais variadas potências e tensões. De acordo com um exemplo de Bowers [32], a partir do catálogo da United Company (de Swan) publicado em 1883, as lâmpadas vendidas por esta empresa tinham 21 tamanhos diferentes com saídas de $2\frac{1}{2}$ até 100 luz de velas e tensões de 6 até 100 V, com vários valores entre estes dois para escolha. Edison definiu para suas estações centrais uma tensão de geração e consumo de 110 V (na verdade, a tensão geralmente era encontrada com este valor na produção, mas pela queda de tensão existente nas linhas, a diferença de potencial para o usuário era de cerca de 100 V), valor ainda hoje adotado em vários países no consumo residencial. Já suas lâmpadas eram na maioria de 8 e 16 luz de velas, escolhidas a partir das preferências dos consumidores.

As duas estações foram construídas embasadas nestes padrões. Ambas alimentavam cerca de 1000 lâmpadas inicialmente, sendo que em Pearl Street houve uma expansão para mais de 8000 logo no ano seguinte. Ambas forneciam energia elétrica para lâmpadas incandescentes instaladas nas próprias estações, nas ruas próximas, em hotéis, em restaurantes, em escritórios e até mesmo em uma igreja no caso do Viaduto Holborn, a City Temple em Londres, a primeira do mundo a fazer uso de iluminação elétrica de suprimento público [97, 32]. Estes feitos eram inéditos e trouxeram um enorme avanço para o sistema elétrico.

As duas fracassaram após certo tempo em suas próprias instalações, cada uma com seu motivo. Em 1886, a estação do Viaduto Holborn foi fechada devido a vários problemas políticos e legislativos que rondavam as empresas de eletricidade na Grã-Bretanha e, em 1890, a de Pearl Street sofreu um grande incêndio e logo em seguida foi fechada. Apesar destas falhas, o sistema de Edison foi amplamente aceito e explorado.

Rapidamente, o modelo se espalhou nos Estados Unidos e na Europa. Uma demonstração do sistema foi feito anteriormente às construções e inaugurações das duas estações na Exibição Internacional de Eletricidade, em 1881, em Paris e empolgou todos que participaram do evento. A transferência tecnológica ocorreu primeiramente para a Inglaterra, conforme já se contou sobre a estação do Viaduto Holborn que foi construída e entrou em operação em 1882. Logo depois, o sistema de Edison conquistou também a Alemanha.

O engenheiro alemão Emil Rathenau (1838-1915) estava na Exibição de Paris e impressionado com o sistema, comprou as patentes de Edison para uso em seu país em 1882. Inicialmente, ele fez várias pequenas instalações em clubes privados e teatros em Berlim, Munique e Stuttgart e na Exibição de Munique de 1882, similar àquela de Paris. Nela, Oskar von Miller (1855-1934), engenheiro também alemão e organizador do evento, conheceu e se juntou a Rathenau na empresa. Em 1883, foi criada por eles com financiamento de bancos uma nova companhia, a *Deutsche Edison-Gesellschaft für angewandte Elektrizität* (a Edison Alemã), mais tarde chamada *Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft* (AEG). No mesmo ano, a empresa passou das instalações isoladas para o planejamento de duas centrais elétricas em Berlim, uma servindo alguns prédios, incluindo o famoso Café Bauer e que promoveria o modelo, e outra no centro da cidade. Após alguns problemas políticos, em fevereiro de 1884, o governo municipal de Berlim e a Edison Alemã entraram em um acordo. A companhia obteve permissão para fornecer eletricidade e distribuí-la no centro da cidade para iluminação elétrica. Formou-se uma concessionária da mesma maneira que Edison fez em Nova Iorque, a *Städtische Elektrizitäts-Werke* (StEW), e rapidamente as duas centrais planejadas entraram em operação. É interessante observar como era a distribuição percentual dos consumidores de eletricidade para iluminação em 1886 em Berlim: “‘teatros’ (24%), bancos (20%), estabelecimentos para comer e beber (20%), lojas (17%), hotéis (8%), iluminação das ruas (7,5 %), indústria e comércio (2%), residências (1%) e outros (0,5%). Assim como em Nova Iorque e Londres, a iluminação elétrica em Berlim não era para os pobres [97].” A empresa alemã foi a mais bem sucedida de todas as companhias Edison (até mesmo mais que a Edison americana), alcançando uma instalação de 42000 lâmpadas incandescentes somente nos seus 2 primeiros anos. Fora isso, os alemães aprenderam e melhoraram as técnicas para os sistemas elétricos, ganhando maior independência do modelo básico de Edison [97].

O que Hughes [98] chama de “*reverse salient*” é um momento do desenvolvimento tecnológico onde se encontram problemas críticos que impedem o avanço da tecnologia. Estes não são somente técnicos, mas podem ser econômicos e de eficiência e envolvem todo o grupo de trabalho pro trás da invenção, desde os administradores até os cientistas. Alguns componentes do sistema podem estar fora do processo necessário para o crescimento e avanço. As invenções entram neste campo para resolver os problemas. Os profissionais tentam encontrar soluções e, neste processo, acabam fazendo até mesmo novas descobertas. No caso do sistema elétrico, a corrente contínua trouxe os grandes “*reverse salients*” da época.

Todos os sistemas citados até o momento, com a exceção rara de Goldaming, usavam corrente contínua e eram dois os principais empecilhos que impediam um maior crescimento deles. O primeiro e o mais importante era o alto custo para distribuição de energia elétrica em longas distâncias com uso da corrente contínua. Na verdade, o círculo de alimentação das centrais de Edison não passava de um raio de uma milha (1,6093 quilômetros) e o próprio

inventor reconhecia esta dificuldade econômica. Várias pessoas começaram a procurar soluções.

Uma delas foi o uso do “sistema a três fios” simultânea e independentemente criado por Edison, John Hopkinson (1849-1898) e William Siemens. De modo a diminuir o gasto com condutores, no lugar de se ligar dois cabos mais grossos, ligavam-se três mais finos. Dois eram ligados nos extremos dos dinâmos e dos sistemas de lâmpadas, enquanto isso, o terceiro retorna para a estação central o excesso de eletricidade da iluminação elétrica. Ainda assim, o preço da distribuição para locais mais longes que uma milha da estação central era alto [97].

Outra maneira encontrada para contornar este problema era ele próprio o segundo empecilho. Ela revela aplicações similares que hoje são largamente usadas como soluções em sistemas de Geração Distribuída e que antigamente foram descartadas. Já se sabia desde o início do desenvolvimento das estações centrais que um jeito para diminuir o custo e aumentar a distância da distribuição era aumentando a tensão. Assim, eram utilizadas subestações de armazenamento de baterias como meio para se alcançar este objetivo. Os dinâmos geravam uma alta tensão de corrente contínua por volta de 1000 V e a energia elétrica alimentava subestações de baterias em locais distantes pela cidade. No momento de carregar, estas baterias eram ligadas em série. Quando já estivessem totalmente carregadas, elas eram conectadas em paralelo de tal forma que tivessem como saída uma tensão menor, tal como 110 V, para alimentar as lâmpadas [97].

Alguns exemplos encontrados na Inglaterra são dados por Bowers [32]. A cidade de Colchester instalou um sistema deste tipo em 1884. Dois dinâmos em paralelo alimentavam a cidade em 1800 V em 6 estações, uma na própria estação e outras cinco em porões de comércios em tensões de consumo de 60 V. O sistema não obteve o consumo esperado de cerca de 2000 lâmpadas e as baterias tinham vários problemas, sendo em 1886 fechado. Em Londres, um sistema similar foi inaugurado em 1888 para diferentes bairros pela companhia Cadogan, mas ela logo foi substituída pela companhia Chelsea em 1893. Esta última obteve grande sucesso fazendo uso das baterias somente no momento que a carga era alta. Este sistema funcionou durante 40 anos até que em 1928 foi abandonado pela regulamentação inglesa imposta.

Como se vê, as dificuldades eram tecnológicas, mas, ao mesmo tempo, eram também econômicas. Elas foram resolvidas e o sistema elétrico pôde voltar a crescer e se expandir somente depois do período que ficou conhecido como “batalha dos sistemas” ou “batalha das correntes” em que a corrente contínua foi substituída pela corrente alternada. Apesar desta mudança e diferentemente do que muitos estudiosos dizem, a transição não ocorreu de forma abrupta, passando de um sistema para o outro da noite para o dia. Até o início do século XX, mesmo depois dos “vencedores” terem sido declarados, ainda era discutido qual era o melhor dos dois sistemas. Durante os anos 1880, depois do enorme sucesso do sistema de Edison, a tecnologia em corrente contínua foi implantada em diversos lugares. Um número enorme de estações centrais similares foi construído nos Estados Unidos e na Europa. Com isso, a transformação de um sistema para o outro não poderia de forma alguma ocorrer instantaneamente como muitas vezes é pensado. Este processo, portanto, pode dar importantes lições para a atual passagem dos sistemas formados por grandes centrais geradoras para a Geração Distribuída e das redes convencionais de energia elétrica para as redes elétricas inteligentes (*smart grids*).

A geração em corrente alternada era conhecida desde os primórdios da geração de energia elétrica como já foi visto, mas ela não se impôs. Isto ocorreu porque a corrente contínua possuía, inicialmente, algumas características que superavam a alternada e estas não eram necessariamente técnicas, mas muitas das vezes econômicas. Como se explicou, a preferência pela corrente contínua por volta dos anos 1830 e 1840 se deve ao fato dela funcionar melhor do que a alternada nos processos químicos e estes serem de grande importância para a indústria.

Durante a evolução das máquinas elétricas entre 1830 e 1870, antes do surgimento em forma comercial das lâmpadas elétricas, os geradores elétricos foram se desenvolvendo condicionados pelo uso que eles poderiam ter. No caso particular deste período, o progresso deles era regido pelos processos químicos e pela telegrafia elétrica.

A partir dos avanços na iluminação elétrica entre os anos 1870 e 1880, os geradores foram direcionados para esta aplicação. Neste tempo, em particular no início da década de 1880, a corrente contínua tinha certas vantagens que ainda faziam com que a corrente alternada não fosse utilizada em larga escala como a primeira que dominava o mercado.

De acordo com David e Bunn [43] são quatro as desvantagens até 1886 que deveriam ser superadas pela corrente alternada. O primeiro é que os alternadores (equivalente de corrente alternada aos dinamos) tinham eficiência de cerca de 70%, enquanto os geradores “Jumbo” de Edison alcançavam 90%. Em segundo lugar, os sistemas de corrente contínua possuíam medidores, enquanto os de alternada não. A terceira desvantagem era a dificuldade prática (já resolvida teoricamente por Hopkinson em 1883) em colocar dois geradores de corrente alternada em paralelo. Isto era facilmente realizado no outro sistema, podendo ocorrer manutenções e interrupções sem que todo o sistema parasse de receber energia ou mesmo dando controle para equilibrar produção e carga, seja retirando ou colocando geradores, seja usando baterias. A quarta e maior de todas as desvantagens era o fato de que não existia ainda um motor de corrente alternada que funcionasse de forma adequada para uso em comércios, indústrias e no embrionário transporte elétrico.

Para que a transição da corrente contínua para a alternada ocorresse, a tecnologia dos sistemas elétricos precisou agregar para si certas invenções de tal forma que as desvantagens da corrente alternada fossem superadas e os entraves da corrente contínua fossem superados. A primeira delas foi o transformador. Este equipamento foi fundamental, pois atacava diretamente o maior bloqueio do sistema de corrente contínua em sua expansão: a distribuição a longa distância de energia elétrica ou, como seria chamado mais tarde, a transmissão de energia elétrica. Ou seja, infligia uma solução para um problema de grande porte tecnológico e econômico que freava a evolução dos sistemas elétricos.

Os principais protagonistas da criação do transformador foram o francês Lucien Gaulard (1850-1888) e o inglês John Dixon Gibbs (1834–1912), que o apresentaram ao mundo em Londres no ano de 1883. O dispositivo criado pelos dois permitia elevação e abaixamento de tensão elétrica com redução e aumento da corrente elétrica, respectivamente. Deste modo, com a alta tensão disponível no local da geração e a baixa tensão no lugar de consumo, as perdas no transporte da energia elétrica nos cabos poderiam ser diminuídas enormemente e a transmissão de energia elétrica para longas distâncias seria possível. Consequentemente, estaria ultrapassado o maior obstáculo técnico e econômico do sistema de Edison. Além disso, o aparelho inventado tinha comutadores e permitia que o usuário

obtivesse diferentes valores de tensão para consumo, ficando mais independente do produtor de energia elétrica e dos fabricantes de equipamentos. Na Itália, a distribuição de energia elétrica conforme idealizada por Edison era vista como problemática, pois observava-se um grande potencial para geração de energia elétrica a partir das águas dos Alpes. Assim, distribuição a longas distâncias eram tidas com bons olhos e em uma exibição internacional neste país em 1884, o sistema de Gaulard e Gibbs alcançou enorme reconhecimento. Logo ele foi repetido na forma de instalações permanentes na própria Itália, na Áustria-Hungria, na Alemanha, na França e na Inglaterra nos anos 1885 e 1886 [97].

Algo, porém, deve ser destacado. O transformador Gaulard-Gibbs e, realmente, qualquer outro transformador, trabalha somente com corrente alternada, visto que tem como princípio a lei de Faraday, já apresentada neste texto. Isto levaria ao aparecimento de um novo sistema, o da corrente alternada em contraste com o da corrente contínua. Consequentemente, estava nascendo ali uma competição entre sistemas: a “batalha dos sistemas”.

Melhoras no transformador Gaulard-Gibbs foram feitas por três inventores húngaros da Ganz & Companhia, Max Déri (1854-1938), Otto Titus Bláthy (1860-1939) e Charles Zipernowski (1853-1942) por volta de 1885, que usaram um núcleo fechado no lugar do aberto e ligaram o primário em paralelo no lugar do conectado em série atuando diretamente em um “*reverse salient*” dos primeiros inventores. Este transformador foi reconhecido como o primeiro comercial. Desde o ano de 1883, eles juntamente com esta empresa já faziam uso de sistemas de corrente alternada na Áustria-Hungria e nos anos 1890 várias estações centrais adotaram o sistema da Ganz & Companhia [97].

Outro acontecimento importante no avanço da tecnologia de Gaulard e Gibbs se deu em Londres, na galeria de arte Grosvenor. A iluminação a gás podia danificar os quadros com a fumaça e a lâmpada incandescente foi vista como solução. Ali foi feita uma instalação elétrica usando os princípios do sistema destes inventores, com lâmpadas e geradores, estes últimos alimentando também a vizinhança, formada por moradores e comércio, que ficou impressionada com a tecnologia e quis fazer proveito da produção de energia da galeria para iluminação. Os problemas técnicos que surgiram levaram a soluções dadas pelo engenheiro britânico Sebastian Ziani de Ferranti (1864-1930) contratado em 1886 como engenheiro chefe. Ferranti reorganizou o sistema da galeria Grosvenor para que os transformadores trabalhassem em paralelo e também substituiu os dois geradores Siemens que eram usados por outros dois que ele mesmo inventou de maior potência [97, 32].

Nos Estados Unidos houve avanços no sistema de Gaulard e Gibbs no mesmo período que os casos húngaros e ingleses. Estes foram feitos pelo físico estadunidense Willian Stanley (1858-1916) sob a empresa Westinghouse Electric Company do empresário e engenheiro de mesma nacionalidade George Westinghouse (1846-1914) que, em 1885, adquiriu os direitos americanos das patentes de Gaulard e Gibbs. Este último, então, disponibilizou transformadores Gaulard-Gibbs para o físico fazer experimentos e tentar melhorar este equipamento. Suas primeiras realizações ocorreram somente de forma experimental em Great Barrington, Massachusetts, em 1886, onde fez a primeira instalação de uma estação central de serviço público com transformador em corrente alternada da América, com um circuito de transmissão de 4000 pés (1,2192 quilômetros) com tensões de 3000 V e 500 V, sendo esta última a gerada e distribuída na cidade e a primeira aquela transmitida até o centro da cidade. No mesmo ano, o primeiro sistema comercial em corrente alternada foi inaugurado em

Buffalo, Nova Iorque. Westinghouse ficou satisfeito com os resultados e deu aval à expansão comercial do sistema em corrente alternada, sendo que em poucos meses várias plantas surgiram nos Estados Unidos usando este sistema. O sucesso, promoção e comércio foram tanto que já em 1890 havia 300 estações centrais Westinghouse [97].

Como foi visto, a geração em corrente alternada foi colocada de lado em detrimento àquela em corrente contínua pelas vantagens nos meios de produção desta última. Do mesmo modo, os motores em corrente contínua progrediram mais que aqueles em corrente alternada, tornando-se uma dificuldade para o avanço deste novo sistema.

A eletricidade começou a ser empregada nas fábricas a partir de 1883 após a introdução do sistema de Edison. Os motores elétricos disponíveis eram em corrente contínua e até 1885 não passavam de 1 HP de potência. Os primeiros a ultrapassarem esta potência em 1885 se devem ao inventor estadunidense Frank Sprague (1857-1934). A aplicação destes motores era incentivada pela companhia de Edison, visto que dariam um grande equilíbrio no consumo, pois eram usados de dia, complementando as lâmpadas elétricas consumidas à noite, o que aumentava o lucro [48]. Também no mesmo ano, os sistemas experimentais de veículos elétricos instalados pelo engenheiro belga Charles Joseph Van Depoele (1846-1892) em Nova Orleans, South Bend e Minneapolis nos Estados Unidos tiveram sucesso e mostraram a possibilidade da tração e da mobilidade elétricas [43].

Os motores em corrente alternada práticos só foram surgir depois da confluência entre o bem sucedido sistema em corrente alternada e as possibilidades do uso de motores elétricos em processos industriais e de transporte. Com efeito, a partir de 1885 até 1889 aconteceram praticamente todas as grandes descobertas sobre os motores em corrente alternada. A necessidade econômica operou sobre a inovação tecnológica e vários inventores surgiram neste período com projetos para combater as máquinas de corrente contínua. Estes acontecimentos deram mais fôlego e marcaram o ponto alto da “batalha dos sistemas”.

Nos termos de Hughes [98], o motor em corrente alternada foi um “*reverse salient*” e vários engenheiros e cientistas de diferentes nacionalidades se empenharam em resolvê-lo. A disputa pela prioridade da invenção é alta remetendo principalmente às nações que cada um pertencia e alguns nomes, todos encontrando soluções no final da década de 1880 e nas décadas de 1890 e 1900, são: o italiano Galileo Ferraris (1847-1897), o croata Nikola Tesla (1856-1943) que trabalhou na americana Westinghouse, o alemão Michael Osipowitch von Dolivo-Dobrowolsky (1862-1919) com cargo na alemã AEG, o sueco Jonas Wenström (1855-1893), o suíço Charles Eugene Lancelot Brown (1863-1924) da suíça Brown, Boveri & Companhia (futura sueco-suíça ABB a partir da fusão com a empresa sueca Asea) e o francês Marcel Deprez (1843-1918) [97].

Todos eles desenvolveram equipamentos e técnicas que se resumem em três tecnologias: o motor de indução, o motor síncrono e o sistema polifásico de corrente alternada. Os dois primeiros também dependeram da descoberta do fenômeno físico chamado campo magnético girante. Ambos os motores funcionam a partir de correntes defasadas entre si por certos ângulos, ou seja, para operar eles necessitam do sistema polifásico e um acabou incentivando o desenvolvimento do outro, com o surgimento de geradores, distribuição e transmissão polifásicos. A diferença angular entre as correntes no estator (parte fixa) do motor, seja ele formado por duas fases com 90° entre si, três fases com 120° entre si ou mais fases com diferentes defasamentos, provoca o surgimento do campo girante. Este campo

girante, no caso do motor de indução, através da lei de Faraday, faz surgir no rotor (parte móvel) corrente alternada, sendo que à reação dos dois leva ao torque do motor. O motor síncrono, por sua vez, geralmente tem seu rotor ligado a uma fonte de corrente contínua, mas seu estator é idêntico ao de indução. Enquanto este possui uma velocidade fixa igual àquela do campo girante, chamada velocidade síncrona, o motor de indução possui uma velocidade menor do que esta sempre, mas próxima. Ambas as máquinas podem funcionar como geradores elétricos de corrente alternada se certa energia mecânica for aplicada a elas.

O mais famoso entre os inventores dos motores e sistema polifásicos com certeza é Tesla, principalmente devido ao seu grande número de invenções, à sua excentricidade e pelo trabalho em conjunto com a companhia de Westinghouse, o grande rival de Edison na “batalha das correntes”. São populares suas histórias de como teve suas ideias para as máquinas de corrente alternada. Nas aulas de engenharia enquanto ainda era estudante na universidade de Graz na Áustria em 1877, observando um professor trabalhar com um dínamo Gramme, ele decidiu que conseguiria criar máquinas que não usassem escovas e comutadores. Em 1882, caminhando com um amigo em um parque em Budapeste, na Hungria, enquanto recitava uma passagem da obra Fausto de Goethe, ele teve uma epifania e imaginou sua máquina, desenhando logo em seguida na areia com um graveto seus diagramas. No mesmo ano, ele foi morar na França, empregado pela Edison francesa e, enquanto trabalhava na cidade de Estrasburgo, ele construiu seu primeiro modelo do motor polifásico. No entanto, foi nos anos 1887 e 1888 quando já residia e trabalhava nos Estados Unidos que obteve suas patentes [97].

Talvez o mais importante nos motores polifásicos de Tesla foram a eliminação do uso de comutadores, que ele acreditava serem dispositivos complicados e os maiores causadores dos problemas na operação das máquinas, e o uso do campo magnético girante. Ele também demonstrava que o motor em corrente alternada com carga total teria a mesma eficiência que o de corrente contínua e sugeria que para o sistema de distribuição fosse utilizado um gerador síncrono para a produção de energia elétrica [173]. Há, no entanto, controvérsias acerca de quem desenvolveu primeiro a ideia de um campo girante, se Ferraris ou Tesla [97].

Outros inventores também tiveram importância no progresso dos sistemas de corrente alternada polifásica: o alemão Friedrich August Haselwander (1859-1932) desenvolvendo motor e gerador em corrente alternada (incluindo trifásico), além de sistemas bi e trifásicos com transformadores em alta tensão e o americano Charles S. Bradley (?-?), com gerador polifásico e motor síncrono. No caso de ambos, Tesla teve prioridade sobre a invenção em termos legais, mas os dois últimos podem ser considerados os primeiros a construírem em escala real geradores polifásicos para uso prático [97].

Nos anos 1890, as grandes fábricas já estavam dedicadas aos sistemas polifásicos e aos motores de indução. A empresa alemã AEG teve forte influência nesta aceitação tanto na Europa quanto no mundo. Ela era liderada por Dobrowolsky, que provou que estava errada a ideia de Ferraris de que o motor polifásico tinha eficiência de no máximo 50% e também preferiu um sistema trifásico no lugar do bifásico de preferência de Tesla e Westinghouse, sendo que ele rapidamente se tornou o padrão e ainda é usado nos dias de hoje. Além disso, ele criou o mais simples dos motores de indução, aquele com rotor curto-circuitado. Nos Estados Unidos, a Westinghouse investiu no sistema de Tesla [97].

Apesar dos avanços dos motores de corrente alternada, ainda assim persistia a existência dos sistemas em corrente contínua. Alguns motivos explicam isso. Em primeiro lugar, o enorme investimento a partir das já bem aceitas ideias de Edison não podia ser simplesmente abandonado e, portanto, os dois sistemas tiveram que conviver por um tempo. Em segundo lugar, mesmo com o aparecimento dos motores de corrente alternada e com seu uso aumentando gradualmente nas indústrias, os motores de corrente contínua eram imbatíveis nos transportes elétricos que começavam a fazer parte do cotidiano.

Sendo assim, foi preciso, mesmo que com a clara superioridade em termos econômicos do sistema em corrente alternada, meios que amortecessem a transposição para esta nova arquitetura e dispositivos elétricos. O elemento que permitiu estes feitos foi o conversor rotativo.

Bradley é creditado pela invenção destes equipamentos com patente de 1888, mas ao engenheiro estadunidense Benjamin G. Lamme (1864-1924), empregado da Westinghouse, também é atribuída esta invenção no início dos anos 1890. Antes deste aparelho surgir, fazia-se uso de uma combinação motor-gerador para se obter corrente contínua a partir da alternada e assim ligar os antigos sistemas de Edison e a tração elétrica aos novos sistemas em corrente alternada. A diferença do conversor rotativo é que ele combinava em um só dispositivo um motor síncrono invertido (os enrolamentos de corrente alternada se encontravam no rotor e o enrolamento de campo de corrente contínua ficava no estator) e um dínamo, fazendo o mesmo papel que o anterior. Ou seja, ele operava como os primeiros retificadores da engenharia elétrica (para mais detalhes técnicos e históricos sobre os conversores rotativos, consultar [22, 23])

Os sistemas em corrente alternada polifásico avançaram, mas mesmo entre eles havia no início discordância, seja pelo número de fases, seja pela frequência. Então, logo surgiram também conversores para fazer inversão (transformar corrente contínua em alternada) [43], mudanças entre diferentes sistemas polifásicos (de bifásico para trifásico, por exemplo, como feito pela Westinghouse [97]) e também frequências. Por volta dos anos 1930, o conversor rotativo foi substituído pelo retificador a arco de mercúrio e na segunda metade do século XX, com o surgimento da eletrônica de potência, todos os dispositivos anteriormente comentados assim como este último foram “aposentados” [23].

Já demonstrado seu excelente funcionamento, a corrente alternada precisava de propagandas para ser promovida pelo mundo. No início dos anos 1890, a maneira encontrada pelas empresas de engenharia elétrica foi a publicidade pelas Exibições Internacionais de Eletricidade, similares àquela de Paris de 1881. Um grande projeto da Westinghouse também deu larga repercussão ao sistema polifásico.

As duas Exibições de maior importância naquela época foram a de Frankfurt em 1891 e depois a de Chicago em 1893. A primeira foi relatada detalhadamente por Hering [94] no ano de seu acontecimento, assim como as que antecederam esta. Para ele, a de 1881 em Paris marcou o nascimento da indústria elétrica da época. A de Frankfurt, no qual ele estava presente, a transmissão em alta tensão de corrente alternada e os motores de corrente alternada foram os destaques. Nesta Exibição, organizada por von Miller, foi demonstrada a transmissão em corrente alternada polifásica “ponto a ponto” através da linha entre Frankfurt e Lauffen com 175 quilômetros. O sistema, que usava a primeira transmissão trifásica de grande potência elaborada por Dobrowolsky, teve forte influência na aceitação deste modo

como padrão mundial. Além disso, foi destacado o potencial do uso de hidroeletricidade em locais remotos para alimentar com energia elétrica cidades altamente povoadas e industrializadas [97].

Uma grande revolução no sistema elétrico foi a criação e aplicação do sistema elétrico universal de alimentação, ocorrida em grande parte devido à Westinghouse nos anos 1890, passando o sistema elétrico que era basicamente composto de iluminação para o sistema de energia elétrica cuja carga poderia ser formada por qualquer tipo de equipamento, seja lâmpadas, transportes ou motores em fábricas. O sistema, que teve sua primeira demonstração na Exibição Internacional de Chicago em 1893, era formado por geradores centralizados e de grande porte que poderiam ser acoplados em paralelo (alimentação) ligados por transmissões de longas distâncias em subestações transformadoras para alimentar cargas com diferentes características (demanda) através unicamente do novo sistema de corrente alternada polifásico. Rapidamente, o sistema elétrico universal se tornou um sucesso e foi expandido em todo o mundo até os anos 1900 [97].

Com início em 1889 e finalizada em 1895, o enorme projeto de Niagara Falls colocou um fim à “batalha dos sistemas”. Neste local, seria construída uma enorme hidroelétrica que seria ligada até a cidade de Buffalo, 20 milhas (32,1869 quilômetros) distantes, usando o sistema universal anteriormente demonstrado em Chicago por Westinghouse com transformadores e alta tensão para transmissão em longa distância, sendo gerada uma única forma de corrente, a alternada trifásica, para todos os fins [97].

Outro meio para que o sistema universal polifásico em corrente alternada se estabelecesse de vez foi a padronização. A Exibição de Frankfurt já havia trazido o sistema trifásico para a linha de frente. Já em relação à tensão e à frequência, os valores eram dos mais variados. Aquele só tinha como uma referência os bem sucedidos 110 V para a baixa tensão escolhidos por Edison para seu sistema [97]. Mesmo assim, com o progresso das técnicas para elevar tensão para transmissão em longa distância como se desejava, tais como o uso de melhores isolamentos, os valores foram os mais aleatórios possíveis. Foi preciso um longo período para que uma quantidade pequena de valores fosse adotada para grandes regiões.

As frequências, por sua vez, não tinham nenhuma referência e eram determinadas pelos equipamentos produzidos pelos fabricantes e utilizados pelas concessionárias de uma forma muito flexível. O processo para estabilização de uma só frequência foi demorado. O engenheiro Lamme [122] apresentou um trabalho contando como os 60 Hz foram adotados nos Estados Unidos. Para ele, o que fez a diversidade das frequências usadas foi o surgimento de várias aplicações (carga) da corrente alternada. Com a unificação destes diferentes usos no sistema, a padronização da frequência foi uma consequência. Um único valor seria melhor também na produção industrial dos equipamentos e a Westinghouse teve papel importante neste ponto.

Algumas das frequências usadas naquele país eram 133 1/3, 125, 83 1/3, 66 2/3, 60, 50, 40, 30 e 25 Hz. Os dois primeiros valores foram inicialmente adotados no sistema monofásico por razões de construção das máquinas, sendo que a aplicação maior da época eram as lâmpadas incandescentes e estes valores altos eram defendidos por muitos, pois faziam com que elas cintilassem menos (menor *flicker*). Também acreditava-se que os transformadores precisassem de uma frequência alta para funcionar melhor. Para fazer uso de

alternadores diretamente acoplados em máquinas a vapor, tendência europeia e que estava sendo introduzida nos Estados Unidos, era preciso uma velocidade mais baixa de rotação e o uso de um número muito maior de polos era indesejável. Portanto, foi decidido por volta dos anos 1890 pelos engenheiros da Westinghouse que seria melhor diminuir a frequência para 60 Hz, uma frequência não tão baixa para o funcionamento “melhor” dos transformadores. No entanto, este valor demorou ainda para ser utilizado de forma abrangente. Os 25 Hz surgiram a partir de várias discussões acerca da construção dos geradores para o projeto de Niagara por volta de 1892 baseando também nas aplicações, tais como as lâmpadas incandescentes e os motores de indução e o uso dos conversores rotativos. Foi esta a frequência adotada naquela usina. Em pouco tempo, ela também foi aceita para outras estações geradoras. Alguns rivais dos 60 e 25 Hz eram os 66 2/3 e 50 Hz, mas estes foram logo descartados. A frequência de 30 Hz também foi defendida pela Westinghouse, mas rapidamente foi largada. Os 40 Hz apareceram como possível substituto dos 60 e 25 Hz, prevendo um bom funcionamento universal. Por fim, tanto 60 quanto 25 Hz foram aceitos porque se imaginava que dois padrões poderiam cobrir todo tipo de aplicação.

As duas frequências conviveram lado a lado por muitos anos. Os 60 Hz era visto como um mal necessário, pois sua grande vantagem aparecia somente nos sistemas em que a corrente alternada alimentava diretamente lâmpadas. Enquanto isso, os 25 Hz aparentemente eram superiores porque satisfaziam todas as outras aplicações tais como motores de indução e conversores rotativos, estes últimos tendo papel fundamental nestas preferências. O fator que decidiu pelos 60 Hz foram os avanços feitos na tecnologia em si. A balança da escolha pendeu para esta frequência com a aparição dos turbo geradores, que funcionavam melhor com 60 Hz do que com 25 Hz em grandes velocidades. Com o progresso dos motores de indução, os 60 Hz davam um leque maior de opções de velocidades síncronas mais altas em relação ao número de polos.

H. B. Brooks, na discussão posterior à apresentação de Lamme em [122], comenta sobre as frequências adotadas em alguns outros países em 1918. Na Itália, havia cinco frequências, 16, 25, 42, 46 e 50 Hz, sendo que a penúltima era usada nos arredores de Roma. Na época, uma associação de eletrotécnica italiana estava decidindo por uma campanha pela adoção de uma frequência única. Na capital francesa Paris, com o mercado monopolizado por uma empresa, 25 e 42 Hz eram as frequências adotadas. Os casos alemão e inglês, por sua vez, eram diametralmente opostos entre si. Na Alemanha como um todo e na sua capital, Berlim, a frequência de 50 Hz já era o padrão. Isto acontecia por dois motivos: o primeiro é que em cada cidade geralmente havia uma única companhia gerindo o sistema elétrico e o segundo é que havia um domínio de poucas indústrias que, encabeçada pela AEG, deram preferência por esta frequência para os equipamentos que produziam. Na capital inglesa, Londres, rondava uma grande desorganização, sendo que existiam, somente na área central da cidade, um total de 41 estações geradoras de 31 sistemas e 8 frequências diferentes. Um relatório feito pela empresa de consultoria de engenharia Merz & McLellan apontava para uma padronização em 50 Hz.

Apesar das dificuldades acerca da padronização, o sistema universal em corrente alternada trifásica se estabeleceu mundialmente. Após 1895, a tecnologia estava espalhada em vários locais, mas apenas alguns ditaram os próximos avanços. Como foi visto, a evolução seguiu das gerações totalmente isoladas para passar para uma estação central local criada por Edison. Em seguida, as transmissões em longa distância foram bem quistas, pois eram

economicamente melhores que os sistemas de Edison. Seguindo este progresso, o sistema elétrico foi se expandindo do interior para o exterior; quer dizer, iniciaram em regiões pontuais, como uma quantidade mínima de casas e recintos privados, para serem explorados em quarteirões e bairros e, depois, por cidades inteiras. Este processo continuou, mas é preciso se ater antes a este último caso.

Os países que tiveram os maiores papéis nos avanços tecnológicos da engenharia elétrica inicialmente foram a Alemanha, os Estados Unidos e o Reino Unido. Em particular, três cidades dos respectivos países se destacam por terem sido as regiões de inovações para o sistema elétrico: Berlim, Chicago e Londres. O que se segue ainda é baseado principalmente em Hughes [97] e vários detalhes são omitidos aqui, mas que podem ser encontrados nesta obra.

Georg Klingenberg (1870-1925), engenheiro chefe da AEG, fez em 1913 uma análise [118] detalhada da situação do sistema elétrico das três cidades usando dados obtidos entre 1910 e 1912. Alguns destes valores são exibidos na Tabela 1.1 retirada deste trabalho.

Tabela 1.1 - Dados gerais dos sistemas elétricos de Berlim, Chicago e Londres entre 1910 e 1912.

	Berlim (1911 e 1912)	Chicago (1911)	Londres (1910-1911)
Companhia	Berliner Elektricitätswerke	Commonwealth Edison Company	Autoridades e companhias dentro e fora de Londres
População aproximada	2.600.000	2.200.000	6.500.000
Número de estações geradoras	6	6	64
Capacidade instalada	137000 kW	221700 kW	298400 kW
Consumo aproximado por pessoa	170 kWh	310 kWh	110 kWh
Carga predominante	Iluminação, tração e outras aplicações (proporção uniforme)	Tração (aproximadamente 70%)	Iluminação (aproximadamente 60%)

Fonte: Adaptado de [118].

A cidade de Berlim era altamente avançada em vários termos. Um deles era na sua indústria, mas também no seu sistema elétrico. Neste último fator, a capital alemã superava várias outras grandes cidades e até mesmo recebeu o apelido de “*Elektropolis*”. Algumas razões levaram a esta alcunha: em grande parte ela era iluminada eletricamente; possuía um complexo sistema de transporte elétrico; abrigava duas das maiores indústrias mundiais de engenharia elétrica, a AEG e a Siemens & Halske (até a Segunda Guerra Mundial, a cidade englobava 50% da força de trabalho envolvida com eletricidade de toda a Alemanha); era pioneira em educação e pesquisa, sediando a *Technische Hochschule* de Berlin-Charlottenburg, uma das primeiras instituições no mundo a ter aulas sobre máquinas elétricas desde 1882, além da influência de Werner von Siemens (1816-1892), fundador da Siemens & Halske, para abertura de vários laboratórios de pesquisa, inclusive em sua própria empresa [97].

Em 1887, a StEW mudou seu nome para *Berliner Elektricitätswerke* (BEW) e passou a ser a principal concessionária de energia elétrica da capital e a Edison Alemã se tornou a AEG, comandando a concessionária. Até aquele ano, a cidade era formada por vários “blocos de alimentação”, que nada mais eram que gerações locais para centros comerciais e

industriais. Até 1913, estes “blocos” continuaram a existir, com cerca de 40000000 kWh por ano [118].

A BEW obteve os direitos com a prefeitura de fazer a alimentação elétrica usando as ruas, desde que fornecesse esta energia para qualquer propósito da cidade. Foi feito também um acordo em que a BEW poderia ter usinas fora de Berlim para alimentar a cidade, mas que em 1915, o contrato terminaria e seria decidido se o município tomaria posse ou não da concessionária privada. Outro ponto destas negociações é que o preço da energia seria subordinado à autoridade pública e, portanto, seria um valor mais baixo, sendo que deveria ser reduzido se o lucro líquido passasse de 12,5% do capital compartilhado. O município também participaria dos lucros, recebendo 10% da renda e outras formas de pagamento [118]. O sistema adotado em Berlim mostrou-se um sucesso, com a iniciativa privada como monopólio gestor e produtor, mas com grandes intervenções do governo municipal regulando o preço da energia elétrica para permitir que os usuários pudessem consumir eletricidade mais facilmente, expandindo este produto. Este acordo foi copiado em várias cidades da Alemanha.

Após alguns imbróglions, a cidade acabou comprando e se tornando dona da BEW em outubro de 1915. A empresa foi renomeada para um nome parecido com o primeiro: *Stadtische Elektrizitäts-Werke Berlin* (StEW). Diferentemente do que se passava nos Estados Unidos, onde havia até mesmo rivalidade entre os executivos das concessionárias privadas e o governo, a StEW se dispôs e os executivos da antiga empresa privada também desejaram trabalhar na nova empresa pública. O comitê executivo continuou praticamente o mesmo após a estatização e todos recebiam excelentes salários para seus trabalhos [97].

Em termos técnicos, a BEW fez uma grande mudança em 1899 ao passar do sistema de 110 V para o de 220 V com dois fios, o que foi repetido em várias outros locais, como na própria Alemanha, na Europa inteira e na Inglaterra, mas não nos Estados Unidos que continuou com o uso dos 110 V. Também no fim do século XIX, um grande passo foi dado quando foram construídas grandes usinas termelétricas fora da cidade para alimentá-la [97]. Já em 1913, o sistema de alimentação era por cabos de corrente alternada trifásica com 6 kV e 10 kV como tensões de transmissão. A distribuição, por sua vez, ainda era feita em corrente contínua, com exceções de subúrbios e o norte da cidade, cujo fornecimento era diretamente em corrente alternada trifásica [118].

Pela adoção do sistema universal de corrente alternada trifásica, o grande êxito da capital alemã foi a mudança que ocorreu na forma que se usava a energia elétrica, sendo levada a uma diversidade grande. Para se ter uma noção do crescimento do consumo de eletricidade na cidade, a energia vendida pela BEW aumentou cerca de 3,5 vezes em 12 anos, passando de 69700000 kWh em 1900 e 1901 para 244300000 kWh nos anos 1912 e 1913 [118]. A cidade foi um dos primeiros lugares em que a iluminação elétrica deixou de ser a carga principal. No ano fiscal de 1899-1900, a carga era composta por 28% de iluminação elétrica, 24% de motores estacionários (fábricas) e 48% de tração elétrica (transporte). Esta última forma de uso foi extremamente importante para a cidade assim como para Chicago, pois instigou o avanço da geração de energia elétrica. Já em 1910 e 1911, a composição do consumo da BEW passa a ser iluminação com 26%, motores (indústria) e outros usos com 37%, tração com 32% e alimentação em alta tensão (provavelmente uso estacionário em fábricas) com 5%. Apesar disso, as casas compunham somente 6,6% desta energia consumida

em 1914 e só em 1927 este valor foi para 50% [97]. É relevante, portanto, a atuação da municipalização em 1915 para o consumo residencial.

O segundo caso de destaque é o de Chicago. A cidade americana teve papel fundamental na forma atual que o sistema elétrico ganhou. Ela era industrializada e possuía um sistema de transporte bastante avançado e eletrificado, de forma parecida com Berlim. Além disso, ela sofreu um enorme crescimento populacional entre 1890 e 1910, com um acréscimo de 599 mil pessoas [97].

O sistema elétrico da cidade, por sua vez, passou de aproximadamente 35 pequenas companhias em 1892 para duas até 1906 e com a fusão destas últimas já em 1907 para formar a Commonwealth Edison Company [118]. Diferentemente da capital alemã e da capital inglesa (como será visto), os proprietários particulares de Chicago tinham grande liberdade nos negócios, sem grandes interferências do Estado. Por outro lado, o governo e a iniciativa privada eram muitas vezes corruptos e os magnatas da cidade se beneficiavam enormemente através da desonestidade [97].

Um homem teve importância no desenvolvimento do sistema elétrico de Chicago. Nascido na Inglaterra e trabalhando para Edison nos Estados Unidos por algum tempo, Samuel Insull (1859-1938) se mudou para a cidade em 1892 para assumir a futura Commonwealth Edison Company. Dois anos depois, ele já construía uma usina de geração na Harrison Street, que rapidamente cresceu e se tornou uma grande central com equipamentos de última ponta. Ele comprou e absorveu as outras pequenas estações existentes para a empresa. Com as mudanças para o sistema universal polifásico ocorrendo mundialmente, após 1896, Insull transformou várias destas pequenas estações em subestações e começou o uso em Chicago do sistema consolidado com transformadores e conversores rotativos para mudança e congregação entre sistemas em correntes contínua e alternada [97].

Insull tinha uma visão vasta sobre tecnologia e percebeu que a geração de maiores potências seria melhor para o sistema elétrico em termos econômicos e, por isso, investiu pesado para que isto pudesse ser feito em sua estação em Fisk Street com potência de 5000 kW (valor alto inédito na época), que abriu em 1903. Esta usava enormes turbinas a vapor, tecnologia recente da Europa, no lugar das máquinas recíprocas. Insull havia enviado dois engenheiros anteriormente para o Velho Continente para que pesquisassem sobre as novas técnicas e isto possibilitou esta transferência [97]. Em 1913, as subestações eram alimentadas por correntes trifásicas em 9 kV, 25 Hz e em alguns casos em 20 kV, 60 Hz. A distribuição ocorria em corrente contínua nas áreas centrais e em corrente alternada trifásica em 60 Hz nas áreas mais afastadas [118].

Uma grande diferença entre Insull e Edison é que este último estabeleceu sistemas tecnológicos completos, criou e desenvolveu seus componentes e os expandiu, mas fazia isso sem uma visão mais ampla social e econômica, apesar de fazer parte de seu pensamento uma fração destas ideias. Ao contrário, este foi o verdadeiro trunfo de Insull. Ele não foi inventivo como Edison e utilizava tecnologias já existentes, todavia, ele elevava o nível de abstração de seu sistema levando em conta os fatores sociais e econômicos de uma forma extremamente abrangente, além de guiar decisões políticas gerais para obter seus fins [97].

Já em 1910, o sistema elétrico da Commonwealth Edison em Chicago era um sistema universal, com várias subestações transformadoras e estações geradoras, assim como diversas

subestações conversoras. Com uso destas últimas, tensões e frequências, além de correntes contínua e alternada podiam ser utilizadas livremente por diferentes cargas, tais como iluminação, motores em fábricas e tração elétrica. Em pouco tempo, o uso de energia elétrica cresceu extraordinariamente na cidade, sendo que em 1900 a venda da concessionária foi de 33,7 GWh e em 1912 foi de 712 GWh, um aumento de mais de 21 vezes [118].

Neste ponto (o consumo), a visão de Insull foi um ponto de inflexão para o sistema elétrico, pois ele se voltou não mais somente para seus equipamentos elétricos que o formava, mas sim para os seus participantes. Ou seja, além de geradores, lâmpadas e motores, Insull desenvolveu seu sistema analisando o comportamento social e industrial. Horários, datas especiais como o Natal, eventos incomuns, tudo era observado.

Foi ele, provavelmente, o primeiro a usar a ideia de um despachante de carga ou operador de carga, um escritório centralizado que operava sobre dados de produção e consumo. Iniciado em 1903 em Chicago, era possível para a concessionária ter um controle e gerenciamento de todo o sistema elétrico, sendo consideradas as ações sociais para estabelecer como é gerada a energia elétrica de acordo com as variações de carga [97]. Os primeiros problemas e, consequentemente, as primeiras soluções de fluxo de potência no sistema elétrico surgiram aí.

Para Insull, o conhecimento social era tão importante quanto o técnico no sistema elétrico para uma boa gerência e um menor gasto. A concessionária coletava uma vasta quantidade de dados estatísticos para seu funcionamento. Compreender e classificar cada consumidor foram extremamente importantes para a economia do sistema gerido por Insull. O fator de carga, a razão entre a carga média consumida pela carga máxima de certo usuário por um período determinado, foi o meio mais relevante para ele para quantificar estas variações dos consumidores. As curvas de carga eram também ferramentas utilizadas pela companhia, além do preço da eletricidade baseada no fator de carga [97].

Os transportes elétricos foram também fundamentais para o funcionamento do sistema elétrico desenvolvido por Insull inicialmente e, como pode ser visto na Tabela 1.1, ocupavam 70% do consumo de energia em 1911. Entretanto, uma mudança de perspectiva lucrativa fez com que Insull focasse seus investimentos mais na eletricidade fornecida para as grandes indústrias do que na tração elétrica entre 1910 até cerca de 1920 e ele pretendia trocar as plantas isoladas para centrais. O preço barato da eletricidade atraiu o desenvolvimento do mercado de eletricidade, assim como do seu uso, que se expandiu enormemente em Chicago, transformando a cidade. A eletricidade barata seduziu as indústrias para a cidade e promoveu o êxodo rural. Insull não se deteve somente em Chicago, mas também ampliou seu sistema para cidades pequenas e meios rurais com enorme êxito [97].

Dos três casos municipais analisados, o de Londres com certeza é o mais complicado. Na virada do século XIX para o século XX, a cidade tinha uma rede extremamente desorganizada em grande parte devido à burocracia estatal. A capital inglesa possuía uma população imensa para a época e também era a metrópole mais iluminada eletricamente.

Apesar disso, alguns fatores fizeram com que Londres tivesse um sistema elétrico muito diferente daquele encontrado em Berlim e Chicago. O primeiro ponto é que mesmo com o grande número de lâmpadas elétricas, era ausente na cidade o uso extensivo da tração elétrica, o que acarretava numa produção de energia elétrica menor ou ao menos ineficiente

economicamente. O segundo ponto está sobre o consumo por motores. Existiam muitas fábricas e indústrias em Londres, mas elas eram várias de pequena escala, o que não levava a um uso de grande porte de energia elétrica. O terceiro fato é que na Grã-Bretanha não havia grandes empresas de produção de materiais elétricos e mesmo as que existiam, sendo estrangeiras ou não, ficavam longe dos arredores londrinos. O quarto, e talvez o maior problema, por sua vez, foi a legislação parlamentar [97].

Todos estes fatores juntos fizeram com que Londres estivesse atrasada em relação às tecnologias da eletricidade e às outras duas cidades estudadas e tivesse uma grande quantidade de pequenas estações de geração de energia elétrica privadas ou comandadas por autoridades públicas locais, chegando a 64 unidades em 1910, de acordo com [118]. Com essa variedade de estações que eram de inúmeras concessionárias, os parâmetros técnicos divergiam bastante. Além dos valores distintos de tensão e frequência usados, também havia disparidade entre uso de corrente contínua e corrente alternada monofásica e polifásica e os sistemas usados eram os mais diferentes, sendo que a maioria servindo exclusivamente para iluminação. Isto causava um alto preço da energia elétrica e um baixo fator de carga.

Alguns casos ainda conseguiram superar a estagnação londrina e começaram o uso do sistema em corrente alternada em alta tensão. Um deles foi o proposto por de Ferranti. De fato, o plano proposto por este engenheiro foi pioneiro. Cuidando da galeria de arte Grosvenor, ele pôde aplicar suas ideias. Ele desenvolveu já em 1888 geradores de 10000 HPs com o intuito de criar uma grande estação fora da cidade com 12 deles, a estação de Deptford. A energia elétrica seria transmitida em corrente alternada com uma tensão de 10 kV e a galeria Grosvenor passaria a ser uma subestação. As obras desta estação passaram por vários problemas e acidentes e os conceitos de de Ferranti não puderam ser implementados [32].

Mesmo com alguns casos como este, o governo ainda era reticente sobre o uso da corrente alternada e restringia o uso deste sistema se funcionasse concomitante ao em corrente contínua. Também outras dificuldades cercavam o sistema elétrico londrino. Uma tentativa de avanço foi feita pelo engenheiro inglês Charles Merz (1874-1940). Merz, juntamente com seu pai, havia realizado com enorme sucesso um sistema elétrico comparável aos outros mais avançados de Berlim e Londres com a concessionária *Newcastle upon Tyne Electric Supply Company* (NESCO) sob custódia de sua empresa de consultoria, a Merz & McLellan, no nordeste da Inglaterra. Este foi o primeiro sistema a gerar corrente alternada trifásica no país e também o primeiro a alimentar indústrias, retirando a exclusividade da iluminação. Baseado em seu sucesso, no início do século XX, Merz apresentou um projeto para melhora do sistema londrino com dados, gráficos e estatísticas sobre os problemas e as soluções. A ideia era elaborar um sistema centralizado, mas este plano sucumbiu no campo político, visto que os governantes não aceitavam tamanho suprimento de energia elétrica nas mãos de uma grande empresa privada. Londres só conheceu mudanças a partir da Primeira Guerra Mundial [97].

O estado da Califórnia nos Estados Unidos foi outro local de prosperidade no sistema elétrico no início do século XX. Este lugar promoveu um avanço dianteiro à Primeira Guerra Mundial; nele houve uma integração entre as usinas de energia elétrica movidas a carvão (vapor) e as hidroelétricas, principalmente com grande quantidade destas últimas, ligadas entre si por linhas de transmissão de longas distâncias e alta tensão. Até 1900, hidroelétricas foram sendo construídas usufruindo da geografia do estado. Na última década do século XIX, elas foram evoluindo rapidamente, com transmissões iniciais passando de 5,5 kV para 11 kV

e capacidades de 6100 kW. Em 1901, um grande projeto foi desenvolvido, uma enorme usina hidroelétrica com capacidade de 14000 HPs ligada à mais comprida linha até então construída com cerca de 225 quilômetros (140 milhas) indo do rio Yuba até a cidade de Oakland. A transmissão era feita em duas linhas em paralelo com tensão de incríveis 60 kV. Todas estas técnicas eram até então inéditas [97].

A natureza, a geografia e a cultura foram favoráveis a este progresso na Califórnia, principalmente para a hidroeletricidade. O transporte de energia elétrica foi aceito como uma excelente maneira encontrada para substituir o transporte de mineração e água como meios de gerar energia. A Alemanha e a Grã-Bretanha, por outro lado, não tiveram tanto êxito no uso de hidroelétricas, porque o primeiro país havia regiões muito densas popularmente e que ficavam em distâncias pequenas dos centros geradores, enquanto no segundo, o potencial hidráulico era muito menor e as indústrias se encontravam próximas das gerações. Antes da Primeira Guerra Mundial, esta tendência da Califórnia foi refletida no mundo inteiro, sendo que África do Sul, Alemanha, Brasil, Canadá, Chile, Espanha, Estados Unidos, França, Índia, Itália, Japão, México, Suécia e Suíça possuíam sistemas de transmissão com 70 kV ou mais e dos 55 dos sistemas que usavam esta alta tensão, 49 transmitiam de grandes usinas hidroelétricas e as outras 6 de usinas a carvão [97].

Os californianos perceberam as vantagens da diversidade de fontes de energia e transmissões em longas distâncias e acabaram sendo pioneiros em outro ponto. Eles fizeram a fusão das concessionárias existentes e as primeiras interligações entre grandes redes elétricas.

Acontecimentos históricos também interferem no processo evolutivo de um sistema tecnológico e a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) exerceu influência na constituição do sistema elétrico. As mudanças do tempo de guerra foram levadas para a época de paz depois de 1918. Duas modificações foram de maior impacto.

Nos tempos de conflito, o empenho das indústrias é maior, pois é necessária uma grande produção em certos setores. Porém, este investimento não era feito somente pelas próprias empresas particulares; os governos eram quem aplicavam um grande capital de uma forma que a iniciativa privada não era capaz de fazer e, com isso, entre 1914 e 1918 houve um crescimento acelerado do uso de energia elétrica e também na sua produção. Nos Estados Unidos e na Alemanha, a fixação de nitrato, por exemplo, era uma preocupação, por dois motivos: melhora a produção agrícola pelo uso de fertilizantes e permite a produção de explosivos. As indústrias de munição também eram instigadas nestes tempos a expandirem a fabricação. Para fazer estes processos é preciso energia elétrica e nos dois países foram feitos investimentos em sua geração em forma de grandes plantas, sendo que hidroelétricas foram construídas no país americano e usinas de carvão (a maioria lignito) no país germânico, sendo cada uma fonte abundante e barata no respectivo país [97].

A segunda modificação concerne às interligações dos sistemas elétricos. A Grã-Bretanha com sua grande quantidade de centrais de pequena produção e com poucos recursos materiais partiu para outra solução no lugar de criar novas usinas para suprir as necessidades da guerra. Foi feita a interconexão dos sistemas existentes. Deste modo, haveria mais confiabilidade e o fator de carga se elevaria, de tal maneira que aqueles locais que produzissem mais energia poderiam enviar para aqueles que mais precisassem. Nos Estados Unidos, por motivo diferente, mas também com o mesmo fim, foi feita uma interligação. Alguns analistas da época previram que se a guerra continuasse até 1918 e 1919, haveria falta

de energia elétrica e isto fez com que o governo nacional se empenhasse para instaurar esta interligação [97].

Apesar deste avanço, as interligações não eram nacionais. Nos dois países, as estações das autoridades locais, no caso inglês, e privadas, no caso americano, eram geralmente contra estas ligações entre as concessionárias, com medo de perder o prestígio e lucro que tinham. No entanto, mesmo relutantes, elas tiveram que ceder nos tempos de guerra aos governos.

Após o fim da guerra, cada país retornou ao respectivo “momentum” antes de 1914. Enquanto nos tempos de guerra as propostas eram inovadoras, nos de paz elas eram conservadoras. Uma das razões para que isso acontecesse era que, além do enorme gasto no conflito, as iniciativas privadas e os governos locais não possuíam o capital que os governos centrais tinham e podiam investir. Para estes últimos, com o fim da guerra, as preocupações já eram outras. Nos Estados Unidos, as empresas privadas entraram em conflito com as autoridades públicas. Um exemplo disso foi a proposta do governo do estado da Pensilvânia, o “Giant Power”, que pretendia realizar investimentos para interligações que visavam preços baixos para a população em geral e também energia para os meios rurais, carentes em eletricidade. Esta proposta falhou pela pressão das empresas que a viam como uma ameaça a seus interesses e lucros. Na Alemanha, por outro lado, o conflito era entre o governo central e os governos estaduais. O primeiro desejava racionalizar o sistema, ligando as hidroelétricas do sul com as termelétricas do norte, criando uma grande interligação. Estes planos falharam com a objeção dos governos regionais que não queriam perder prestígio. Na Grã-Bretanha, o sistema elétrico voltou à estagnação burocrática pré-guerra, com vários estudos e discussões acerca de planejamentos para um sistema mais centralizado e interligado. Assim como antes da guerra, todos os planos fracassaram [97].

Nos anos 1920 em diante, o que aconteceu foi um progresso lento, mas direcionado para a centralização das operações e a interligação, sem mudanças radicais como acontecia anteriormente. As transformações que ocorriam a partir desta época surgiam a partir de pequenos problemas internos ao próprio sistema, sem grandes inovações. Alguns exemplos que podem ser dados de pequenos avanços são a elaboração de turbinas mais eficientes, sistemas de isolamento melhores para que se alcançasse tensões mais altas (100 kV já era um valor utilizado na década de 1920), uso de previsões climáticas e de comportamentos sociais para previsão de cargas, monitoramento de frequências, métodos computacionais e numéricos para resolução de equações de fluxo de potência (aparelhos que evoluíram para os computadores surgiram nesta época), etc [97].

Um importante conceito que surgiu nesta época, mas que já estava adentrando a tecnologia da eletricidade foi o de economia mista. Em sistemas elétricos, significa a interconexão de usinas de energia cujas fontes são utilizadas de forma complementar. Por exemplo, uso de termelétricas nos momentos de estiagem e consequente impedimento de uso total de hidroelétricas. As principais vantagens desta operação é que há um aumento na economia e na confiabilidade. Vários meios e ferramentas foram criados para aplicar este método de produção e planejamento.

De acordo com Hughes [97], os sistemas no pós-guerra, de uma forma geral, foram regionalizados e foram formados a partir de duas concepções diferentes: ou *evoluíram* ou passaram a ser *planejados*. Para este último caso, eram formadas as redes elétricas de uma maneira planejada, delineada de uma forma bem definida, unindo as concessionárias

regionalmente, elaboradas para interconexão imediata e mais extensa com grandes gerações de energia elétrica e uso eficiente da diversidade de carga. Na maioria dos casos, era criado um poder centralizador para determinar como seriam as produções e distribuições de energia elétrica através de previsões e análise de dados de consumo. Mesmo que as concessionárias fossem diferentes, havia formação de comitês para planejamento. Este era o caso, por exemplo, da grande Interconexão Pensilvânia-Nova Jersey (PNJ), a maior da época. A Bayernwerk, no estado da Bavária na Alemanha e comandada por von Miller foi um caso parecido. Houve também a formação de grandes companhias *holding* e fusão entre as concessionárias em todos os países.

No caso britânico, a situação é especial. Em 1925, o governo central estabeleceu um comitê liderado por Lord Weir (1877-1959) para relatar os problemas principais de fornecimento de energia elétrica. Então foi feito a partir do *Electricity (Supply) Act* de 1926 a criação de um corpo independente, conhecido como “*Central Electricity Board*” (CEB) com poderes executivos para construir e operar a nova Rede Nacional (*National Grid*) que interligaria um grande número de estações. Adotou-se como padrões de tensão primária os 132 kV e para transmissão secundária, 66 kV e 33 kV. As construções da *Grid* duraram 8 anos entre 1927 e 1935. Quando ficou pronta, ela ligava toda a Grã-Bretanha com exceção do nordeste em 4600 quilômetros de linhas primárias e 5900 quilômetros de linhas secundárias. Outras padronizações ainda precisaram de um bom tempo para ser fixadas. Dentre elas, a frequência de 50 Hz, que já estava em uso em quase toda a Europa em 1926, com exceção da Itália, e na própria Grã-Bretanha, em que ela ocupava 77% dos casos, mas não no nordeste do país. O uso de corrente alternada trifásica foi rapidamente transformada em padrão, pois já fazia parte da maioria das instalações. A tensão de consumo, por sua vez, também demorou e foi só em 1945 que foi estabelecida em 240 V [32].

Os sistemas evolutivos, ao contrário dos planejados, foram progredindo de uma forma mais lenta e cada um teve uma característica diferente. No final, todos eles foram aglomerados em sistemas interligados nacionais. O que é relevante deste tipo de sistema é a clareza da influência de aspectos culturais na formação de uma tecnologia. A esta característica técnica que surge a partir das condições locais, Hughes [98] chama de “estilo tecnológico”, definição esta que dá amparo à ideia da construção social da tecnologia. Para este autor, os fatores que o determinam são geográficos, econômicos, organizacionais, políticos e legislativos, contingentes históricos e condições de empreendimento. Apesar de parecerem irrelevantes na construção histórica do sistema elétrico, estes conceitos são importantes para as propostas acerca da Geração Distribuída com sua variedade tecnológica que pode aproveitar da diversidade cultural, já que depende de inúmeros fatores para ser implantada, tais como local, clima, disponibilidade de mão de obra, pesquisas, empreendimento, estética, etc. Assim, o conceito de “estilo tecnológico” pode trazer uma nova luz para os estudos sobre o planejamento da Geração Distribuída.

O caso da França difere dos três países até aqui estudado. Para ele, o que se segue é totalmente embasado no texto de Lévy-Leboyer [127].

A energia elétrica produzida na França, apesar da estatística pobre da época, é muito menor do que aquela produzida na Alemanha, Grã-Bretanha e Estados Unidos, representando cerca de 4% apenas da soma gerada nestes três países no período entre 1915 e 1919. Segundo

Lévy-Leboyer [127] há dois motivos para que o avanço tecnológico no sistema elétrico não ocorresse na França como aconteceu nos outros três países:

- 1) A economia do país não permitia. Nos anos iniciais da eletrificação em 1880, a França passava por um período de depressão financeira e as autoridades viam com ceticismo a integração do sistema elétrico, em vista de sistemas e interesses de outras companhias, como a de gás. Fora isto, a maioria da população vivia em áreas rurais. Enquanto nos Estados Unidos já havia centenas de estações centrais de geração de energia elétrica em 1887, na França havia apenas sete. Um fôlego foi dado às empresas de eletricidade pouco antes da Exibição Internacional de 1889 em Paris, mas não foi suficiente. Em 1895, o preço do gás era 1/3 da eletricidade e, assim, a iluminação a gás ocupava 70% do total parisiense.
- 2) No país, o crescimento da geração de energia elétrica ocorreu com várias pequenas centrais. Havia cerca de 1400 em 1907 e 2000 em 1913, sendo que a maioria de origem hidráulica de pequeno porte (250-300 kW). A indústria era, assim, descentralizada. Alguns avanços foram feitos, mas o controle dos preços da eletricidade, assim como uma grande inflação entre 1924 e 1926 não permitiram os avanços que outros países obtinham com suas enormes gerações transmitidas em alta tensão.

Apesar das dificuldades, em várias áreas da França o progresso aconteceu, principalmente após os primeiros anos de consolidação da eletricidade (1880-1930). Ou seja, em resumo o país teve um atraso em sua segunda industrialização. Alguns casos mostram os avanços: em 1912, Paris já possuía um sistema de transporte eletrificado tão desenvolvido quanto nas outras grandes cidades; em algumas regiões o uso industrial de energia elétrica já era alto, apesar da média nacional ainda ser muito baixa comparada com outras nações; o consumo doméstico de energia elétrica na capital em relação ao suprimento local cresceu de 16% em 1913 para 28% em 1938 e 45% em 1944, enquanto no restante do país a mesma medida continuava baixa pela enorme população rural que era excluída com os preços altos.

Sem um mercado central, a França não conseguia firmar empresas de grande porte em materiais elétricos como ocorria nos outros países. Em 1907, o monopólio de gás em Paris teve um fim e este foi um passo importante para o mercado da eletricidade. No início, o país tinha várias pequenas empresas especializadas. As primeiras grandes construções que faziam uso da eletricidade foram os meios de transporte. No entanto, estes acontecimentos tiveram mais força nos anos em torno da Primeira Guerra Mundial, principalmente após ela nos anos 1920 com as grandes ferrovias. Estes episódios permitiram o surgimento de grandes empresas em eletricidade no país. As concessionárias, por sua vez, começaram a ganhar espaço na França na virada do século XIX para o XX com o uso de grandes usinas de energia elétrica para alimentar principalmente o transporte. Estas foram construídas no começo do século em Paris. Em 1934, o consumo ganhou impulso com a elaboração de uma rede elétrica em toda a região de Paris com produção advinda de novas hidroelétricas fora aquela já produzida pelas pequenas centrais movidas a carvão. Um caso de economia mista. No final da década, o regime era igualável a de outros países avançados. Na província, com a população dispersa, a não existência de grandes centros consumidores e algumas regiões produzindo em excesso energia elétrica com centrais que surgiram durante a guerra, foram formados cartéis que

centralizaram as produções e consumo formando grandes redes elétricas com vários quilômetros de linhas de transmissão em alta tensão.

Durante os anos de depressão, as termelétricas expandiram, enquanto as hidroelétricas foram deixadas de lado. Isto ocorreu porque as primeiras eram bem mais baratas de serem construídas distribuidamente e utilizadas do que as últimas na época de baixo consumo. Portanto, as termelétricas possuíam certa proteção contra a crise econômica francesa nos anos 1920. Isto, no entanto, teve uma reviravolta nos anos 1930. As empresas pequenas possuíam grande poder no governo e conseguiram que os preços da eletricidade caíssem, elevando o consumo e, consequentemente, a produção industrial. Em seguida, elas pressionaram para um plano com a criação e precedência de hidroelétricas (cuja produção é mais barata se estivesse em capacidade total) e construção de novas linhas de transmissão para uma maior interconexão até o final dos anos 1930. Estes planos foram parcialmente frustrados, pois o governo que era um dos maiores investidores no setor passou a se preocupar com financiamentos para a Segunda Guerra Mundial que iniciava em 1939. Mesmo assim, o setor elétrico recebeu dinheiro suficiente para ter avanços na França nesta época com a criação de um sistema nacional em 1942, a mudança para produção hidroelétrica e para usinas de grande porte e um aumento significativo no consumo doméstico na região sul do país.

Lévy-Leboyer [127] nota que os problemas financeiros na França fizeram com que o país não tivesse o mesmo protagonismo no progresso do sistema elétrico como os outros países. Em seguida, ele apresenta duas conclusões: a primeira é que a substituição de pequenas estações centrais locais para redes elétricas foi um grande avanço e o segundo é que apesar dos aspectos tecnológicos prevalecerem no final como centro do progresso, as forças econômicas se mostram fundamentais para a estrutura do sistema tecnológico, a França sendo um caso explícito disso.

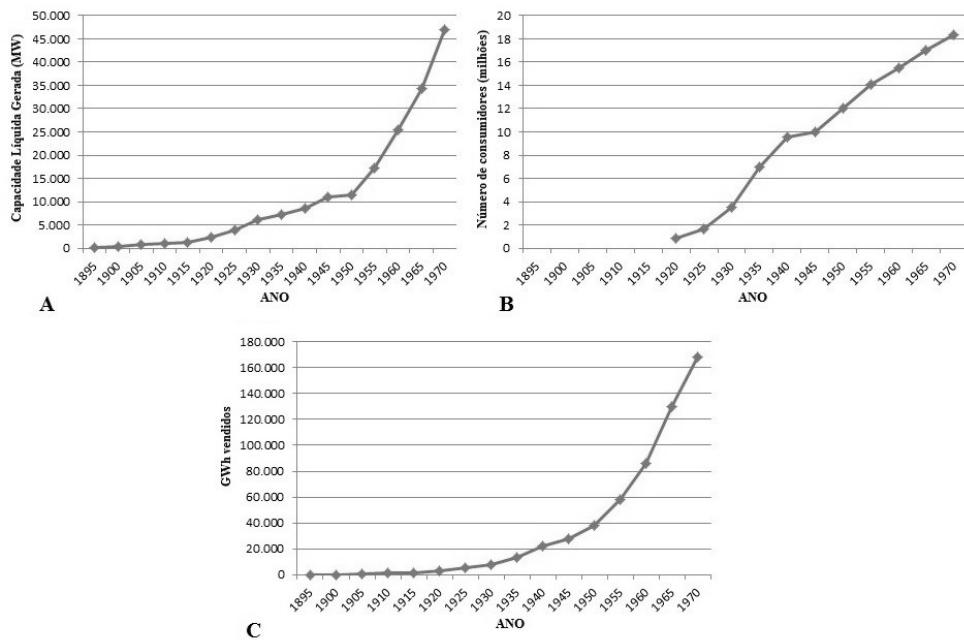
1.5 - O Período de *Crescimento Previsível* e a Energia Nuclear (1930-1970)

A partir de 1930 até 1970, o sistema elétrico não sofreu alterações radicais, sua estrutura praticamente não mudou daquele edificado no período da *Eletrificação*. Os avanços que ocorreram se deram mais em termos de crescimento e eficiência e não necessariamente em grandes novidades tecnológicas. Com efeito, outras áreas tiveram progresso justamente nesta época e, entre elas, destaca-se a eletrônica. Mais especificamente no caso da geração e uso de energia elétrica, a eletrônica de potência com os diodos, os transistores e os tiristores, foi uma área importante como meio de conversão de energia, transformando corrente alternada em contínua e vice-versa. É deste período a Transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão (*HVDC* do inglês *High Voltage Direct Current*). Outros avanços foram em termos de melhora nos sistemas já existentes, tais como tensões mais altas, turbinas maiores, etc. No entanto, nenhum deles causou mudanças iguais àquelas que os anos de 1880-1930 trouxeram à forma que é gerada, transmitida e distribuída a energia elétrica. Tomando o termo de Hughes [97], o que se passou neste período foi um *crescimento previsível*.

O sistema elétrico que surgiu na Alemanha, nos Estados Unidos e na Grã-Bretanha foi copiado em todos os países que se desenvolviam industrialmente. Tanto produção quanto consumo de eletricidade aumentaram significativamente (o exemplo da Grã-Bretanha pode

ser visto nos gráficos da Figura 1.1). Como era necessário aumentar os lucros, a energia elétrica precisava ser vendida de forma mais ampla. Então ela deixou de ser um produto de luxo e começou a adentrar as casas das pessoas com menores recursos financeiros (ao menos nos países mais ricos).

Figura 1.1 - Gráficos de geração e consumo de energia elétrica na Inglaterra e no País de Gales entre 1895 e 1970. **A.** Capacidade líquida gerada (MW). **B.** Número de consumidores (Milhões). **C.** Unidades em GWh vendidas por ano.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados obtidos de [32].

As transformações mais radicais deste período ocorreram para os usuários da eletricidade com o surgimento de vários novos aparelhos. Já a geração de energia elétrica viu uma única grande novidade: a entrada da energia nuclear.

A fissão nuclear, ou seja, a divisão de isótopos de certos elementos químicos, tais como o Urânio-235 (U-235), através de bombardeamento de nêutrons pode gerar uma enorme quantidade de energia em forma de calor que pode ser usado para esquentar água. Esta água se tornando vapor, por sua vez, pode ser utilizada para geração de energia elétrica, exatamente como em qualquer outra termelétrica, onde uma turbina que recebe este vapor aciona um gerador. Os descobridores deste processo foram o físico italiano Enrico Fermi (1901-1954), que, em 1934, através de experimentos, mostrou que nêutrons poderiam dividir átomos; os químicos alemães Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Strassmann (1902-1980), que, em 1938, observaram o fenômeno da fissão nuclear ao bombardear com nêutrons átomos pesados, como o urânio, encontrando matéria mais leve; a física austríaca Lise Meitner (1878-1968) e seu sobrinho, também físico e austríaco, Otto Robert Frisch (1904-1979), que naquele mesmo ano comprovaram teoricamente a fissão nuclear [177].

Para a fissão nuclear ocorrer de forma correta, ela precisa acontecer sob uma reação em cadeia. Então, em 1942 quando ocorria a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), Fermi e uma equipe de cientistas desenvolveu o primeiro reator nuclear, o “Chicago Pile-1” (CP-1) na Universidade de Chicago, nos Estados Unidos. Mais precisamente, às 15 horas e 25 minutos no dia 2 de dezembro de 1942, a reação nuclear controlada teve início com fim 28 minutos

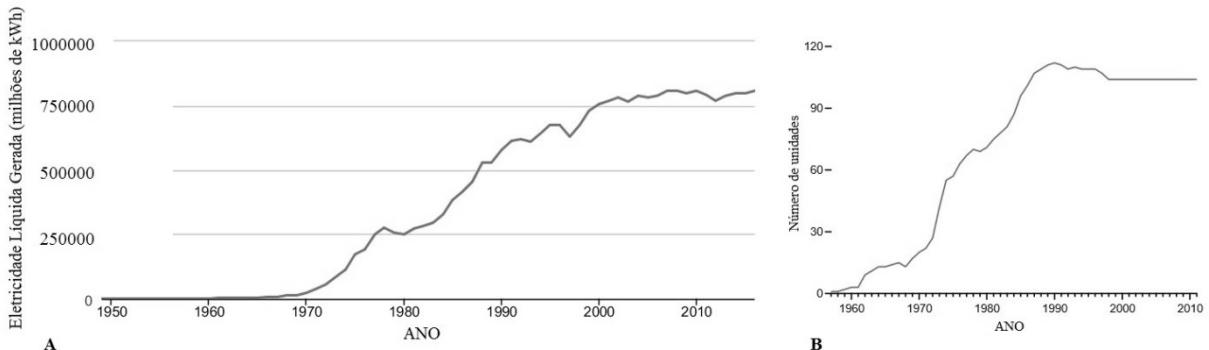
depois [177]. A energia nuclear mostrava sua capacidade de produzir enormes quantidades de energia e, logo em seguida, seu uso foi demonstrado em uma das ações mais terríveis já realizadas pela humanidade. Já no fim da guerra, em 6 de agosto de 1945 às 8 horas e 15 minutos a cidade japonesa de Hiroshima foi destruída por uma bomba nuclear americana e milhares de pessoas morreram em questão de segundos e em 8 de agosto de 1945 às 11 horas e 1 minuto, o mesmo ocorreu na cidade também japonesa de Nagasaki.

Estas bombas estavam sendo desenvolvidas e pesquisadas desde 1942 nos Estados Unidos no chamado “Projeto Manhattan”, liderado por este país e com apoio do Reino Unido e do Canadá. Ele era encabeçado por grandes físicos, químicos e engenheiros da época, alguns deles prêmios Nobel em suas áreas. O diretor do laboratório Los Alamos (parte do projeto), o físico estadunidense J. Robert Oppenheimer (1904-1967), disse em entrevista que seu pensamento quando da explosão da primeira bomba atômica num teste em 1945 foi uma passagem do texto religioso hindu *Bhagavad-Gita*: “Agora, tornei-me a morte, a destruidora dos mundos” [95].

No pós-guerra, as pesquisas sobre a energia nuclear continuaram, desta vez voltada para a produção de energia elétrica. O reator nuclear experimental “*Experimental Breeder Reactor I*” construído próximo da cidade de Detroit, nos Estados Unidos, foi o primeiro a gerar eletricidade em 1951. Já em 1953, o primeiro submarino movido a energia nuclear, o *Nautilus*, foi elaborado. Quatro anos depois, em Shippingport, Pensilvânia, entrou em funcionamento o primeiro grande reator nuclear comercial gerando energia elétrica [177].

Nos anos 1960, com o êxito destes primeiros empreendimentos, a energia nuclear para geração de energia elétrica começou a se espalhar e, ainda de acordo com [177], “as concessionárias de energia viam esta nova forma de produzir eletricidade como econômica, limpa ambientalmente e segura”. Este crescimento, que ocorreu em vários países, principalmente aqueles mais industrializados, pode ser visto nos gráficos da Figura 1.2 no caso dos Estados Unidos.

Figura 1.2 - Geração de eletricidade por energia nuclear e número de unidades. **A.** Geração líquida de energia elétrica (kWh) a partir da energia nuclear nos Estados Unidos entre 1950 e 2016. **B.** Número de unidades nucleares em funcionamento nos Estados Unidos entre 1957 e 2011.



Fonte: Adaptado de [57] e [58].

Na Grã-Bretanha, a primeira usina nuclear experimental foi inaugurada pela rainha em 1956, sendo que as duas primeiras comerciais viriam a iniciar serviço em 1962 [32]. Já em fevereiro deste mesmo ano, a primeira usina nuclear da Alemanha foi lançada em Kahl nas proximidades de Frankfurt [46].

1.6 - A Crise do Petróleo e as Energias Renováveis (1970-Atualmente)

A década de 1970 foi marcante para o sistema elétrico, sendo que as causas para as mudanças que viriam em seguida surgiram de acontecimentos que pareciam distantes da geração e consumo de eletricidade e suas tecnologias. Foi neste período que fontes alternativas àquelas chamadas tradicionais (termelétricas movidas a combustíveis fósseis e hidroelétricas) começaram a ganhar espaço na produção de energia elétrica. A energia nuclear que já crescia nos anos 1960 teve um aumento maior ainda neste momento. Outras fontes, como eólica e solar, que antes eram irrigúrias na capacidade instalada, timidamente iniciaram sua entrada na elite energética. Antes de entender como, é preciso compreender por que elas foram introduzidas. As explicações dadas aqui nesta seção, assim como nas outras que serão desenvolvidas ao longo deste trabalho mostram que a tecnologia não desempenhou um papel capital e restrito neste investimento em fontes alternativas, mas que fatores geopolíticos, históricos, sociais e econômicos também contribuíram fortemente para que estas formas de gerar energia elétrica se elevassem.

Uma guerra e uma revolução no Oriente Médio foram os principais fatores que fizeram os países buscarem novas maneiras de gerar energia. Na verdade, o que estes dois eventos históricos fizeram na economia é que designou uma nova visão sobre o sistema elétrico e energético em geral que as pessoas estavam tão bem afeiçoadas. De fato, como se viu, geração e consumo de energia elétrica nunca tiveram tão bem estabelecidos quanto na época anterior a 1970. Estes valores só aumentavam sem grandes modificações na arquitetura da rede elétrica. Além disso, na década anterior, a nova fonte, a energia nuclear, trazia produções altíssimas e o desenvolvimento do transistor nos anos 1940 e 1950 originava novas possibilidades no uso da eletricidade.

Estes anos dourados também eram pintados de “ouro negro”. O preço do petróleo era estável neste tempo, com poucos momentos de subida que logo retornavam ao patamar anterior, e sua obtenção nos solos americanos crescia. Os carros tinham forte relação com a produção deste combustível fóssil e seu valor, sendo que no último ano do século XIX, havia nos Estados Unidos 0,1 automóvel para cada 1000 habitantes e, em 1970, a proporção era 1 automóvel para cada 2 habitantes [89]. A necessidade pelo petróleo, portanto, aumentava cada vez mais, mas sem grandes alarmes. Os americanos, os maiores consumidores deste óleo no mundo, ficaram mal-acostumados com essa vida abastada de energia, assim como a grande quantidade de pessoas de outras nacionalidades que copiavam o *American way of life*.

Em outubro de 1973 despontou uma guerra conhecida como Guerra do Yom Kippur entre os árabes do Egito e da Síria contra Israel. Pouco tempo antes, na década de 1960, havia sido criado um cartel dos países produtores de petróleo, a chamada Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Quando os Estados Unidos e outros países do Ocidente resolveram apoiar Israel, o grupo árabe da OPEP, revoltado com a atitude, impôs um embargo contra o país americano, outros ocidentais e o Japão, incluindo aí um aumento do preço do barril do petróleo, assim como a diminuição da produção deste e o bloqueio das exportações. Os valores que estavam estáveis até então nas terras norte-americanas e em vários outros locais subiram enormemente, como pode ser visto na Figura 1.3. Isso refletiu em uma crise energética em todo o mundo, que estava começando a depender cada vez mais do óleo importado do Oriente Médio. Nos Estados Unidos seguiu uma recessão em novembro de 1973

(sobre as consequências do preço do petróleo na macroeconomia ver [10]; as faixas em cinza na Figura 1.3 indicam os momentos de recessão no país). Somente enquanto esperavam nas enormes filas que se formavam com a falta de gasolina para abastecer, os americanos viam o preço subir 12% em dezembro de 1973 e 50% em março de 1974 ([78] citado por [89]).

Poucos anos depois, entre outubro de 1978 e fevereiro de 1979, muitos protestos ocorreram no Irã, um dos países da OPEP, culminando na Revolução Iraniana. Várias greves no setor petrolífero fizeram com que a produção caísse naquele país afetando toda a segurança energética mundial mais uma vez. O preço do barril de petróleo teve novamente uma grande alta (Figura 1.3). Em janeiro de 1980, os Estados Unidos entraram em recessão [10] e similarmente ao que ocorreu no passado, as filas para abastecimento de gasolina ressurgiram com aumento de cerca de 30% para os americanos somente na espera [89].

Figura 1.3 - Evolução do preço do barril de petróleo (óleo cru) em dólares (com inflação corrigida 2017-2018) entre janeiro de 1960 e julho de 2017 nos Estados Unidos com os principais eventos e preços da década de 1970.



Fonte: Adaptado de [131].

Com estes acontecimentos, diversos países reagiram tentando se tornar menos dependente do disputado óleo. Cada um deles teve uma atitude diferente e grande parte agiu não somente em setores que dependiam diretamente do petróleo, mas também na geração e consumo de energia elétrica. Independentemente das ações realizadas, todas eram bastante radicais se comparadas aos anos anteriores à década de 1970.

Os Estados Unidos, um dos países que mais sentiu o impacto das variações no preço do petróleo, se antecipou à crise de 1979 e, em 1978, promulgou o *Public Utility Regulatory Policies Act* (PURPA) [176]. Este documento promovia, dentre outros pontos: um aumento da conservação de energia e uma maior eficiência energética com preços justos aos

consumidores; melhorias na confiabilidade da energia elétrica; aumento na produção hidroelétrica de pequena e média escala; um programa para conservação do gás natural, assim como um programa para encorajar a produção de transportes mais eficientes movidos a óleo cru. Além desses incentivos, a seção 210 da legislação, talvez a mais importante, trazia regras incentivando e liberando a venda e a geração de energia elétrica a partir de cogeração e de pequenas fontes, as unidades qualificadas, de produtores independentes das concessionárias ligados ao sistema elétrico. Ainda nesta seção foi definido o “custo incremental de energia elétrica alternativa”, que exigiria que as concessionárias comprassem a energia elétrica gerada pelas unidades qualificadas sobre o custo evitado pelas primeiras para produzir esta energia, enquanto a seção 506 instituía estudos e análises sobre os impactos ambientais dos transportes movidos a petróleo. Enfim, o que se viu logo em seguida à aparição desta lei foi um grande investimento em energias renováveis, tais como energia eólica e energia solar fotovoltaica.

Na França, a resposta veio na forma atômica. O país, muito dependente do petróleo vindo dos países árabes, já vinha trabalhando anteriormente com a adoção lenta da eletricidade a partir da energia nuclear. No entanto, para obter uma verdadeira independência energética sobre um preço baixo de energia elétrica após o embargo da OPEP, o primeiro ministro francês Pierre Messmer anunciou um plano (que mais tarde levaria seu nome) em 1974 no qual se pretendia construir 13 usinas nucleares de 1 GW cada em apenas dois anos. Entre 1979 e 1999, 58 usinas foram construídas [132]. A França se consolidou provavelmente como o país com a maior parcela da geração de eletricidade vinda da energia nuclear, sendo que em 2006, por exemplo, este valor chegava em 78,1% [185].

A experiência brasileira contra o preço do petróleo não foi ligada somente ao sistema elétrico, mas foi também fortemente ao combustível automotivo. O preço internacional do açúcar na década de 1970 também subiu e teve um pico. Então, em 1975, o governo, para manter o consumo de energia no país, lançou o Programa Nacional do Álcool (Proalcool), incentivando a produção interna e o uso de um biocombustível renovável, o etanol, para substituir a gasolina em carros. Em 1979, o governo resolveu as dificuldades com as montadoras multinacionais e estas cederam, iniciando a fabricação de veículos movidos ao biocombustível, enquanto o primeiro forneceria este combustível e o faria ser competitivo com a gasolina [145]. O incentivo para os carros deste tipo foram ainda maior com a outra elevação no preço do petróleo no início dos anos 1980. No ano do acordo, foram vendidos 3114 carros movidos a etanol, representando 0,3% do total de vendas. Já em 1985 estes valores passaram para 645551 ou 95,8%, respectivamente [165]. São datados desta época os investimentos maciços e construções de hidroelétricas de grande porte, assim como o Programa Nuclear para construção de usinas nucleares para geração de eletricidade.

Vários outros países tomaram atitudes perante a alta do petróleo e, ou introduziram e aumentaram o uso de energias renováveis, ou melhoraram a eficiência e a produção interna dos sistemas já existentes. De uma forma geral, como pôde ser visto, os motivos que levaram a mudanças drásticas que se perpetuam até hoje no sistema elétrico estadunidense, francês, brasileiro, assim como nas redes elétricas de outros locais, não foram sociais, nem ambientais ou mesmo técnicos. Ao contrário, foram forças geopolíticas e econômicas os protagonistas destas transformações. No capítulo seguinte será visto como ocorreu a história da Geração Distribuída em particular e como estas ideias ainda são válidas.

2- O que é Geração Distribuída? – Definições e Relação com Outras Áreas

“O que há num nome? O que chamamos rosa

Teria o mesmo cheiro com outro nome.”

(William Shakespeare)

Geração Distribuída é o objeto central deste trabalho e, antes de se realizar qualquer estudo sobre o assunto e suas ramificações, é preciso dar uma definição para este termo de modo claro e coerente. Apesar de amplamente utilizado e estudado na engenharia elétrica atualmente, não há consentimento exato sobre o que é Geração Distribuída. Quando se faz uso desta expressão, ela algumas vezes orbita características que são concordantes entre diferentes autores e legislações, mas nenhuma das definições é adotada sistematicamente.

Sendo assim, neste capítulo é feito um estudo preliminar a todos os outros abordados para que o leitor tenha consciência do referido tópico. Em primeiro lugar, é discutida e proposta uma definição para Geração Distribuída para ser seguida neste texto. Para isso, outras expressões relacionadas são comentadas e revisões histórica e bibliográfica sobre normas e artigos são feitas, elaborando-se uma espécie de genealogia da Geração Distribuída. Em um segundo momento, este capítulo é finalizado com uma breve análise sobre as relações existentes entre Geração Distribuída e áreas da própria engenharia elétrica e de outros campos, tais como a sociedade e o meio ambiente, levando em conta sobretudo suas implicações. Esta última parte, por sua vez, é mais detalhada nos próximos capítulos.

No que segue, o que se faz não é trazer afirmações concretas; seria pretensioso da parte do autor fazer isso. Ao contrário, tenta-se introduzir algumas ideias para se ampliar as discussões em torno do tema. Portanto, não há respostas definitivas aqui, mas somente conjecturas e indicações, de tal forma que a reflexão sobre esta tecnologia possa ser alargada.

2.1 – Geração Distribuída e Outras Expressões

O termo Geração Distribuída muita das vezes é confundido com outras expressões e alguma das vezes é até mesmo usado como se fossem sinônimos. Dentre estas, algumas devem ser debatidas e é apontado por que elas são desaconselhadas.

2.1.1 – Energias Limpas

A primeira expressão largamente utilizada, mas que traz alguns empecilhos é “Energias Limpas” ou “Fontes Limpas”. Tal emprego é problemático em quatro temas que se intersectam, mas que atingem diferentes maneiras de raciocinar e agir. Em primeiro lugar, ele restringe o pensamento e induz as pessoas leigas ou mesmo experientes no assunto a ponderarem que as tecnologias desta classificação não poluem ou que o fazem irrisoriamente.

De fato, em seu processo de operação, as denominadas “Energias Limpas” lançam uma menor quantidade de gases do efeito estufa ou nenhuma (são “tecnologias de baixo carbono”), por exemplo, em relação aos combustíveis fósseis e este é um dos motivos principais para chamá-las assim. Não obstante, é preciso se lembrar de que uma tecnologia não é um objeto isolado, que surge e desvanece espontaneamente. Pelo contrário, ela faz parte de um processo e, portanto, uma “Energia Limpaa” também polui em suas outras fases e com outras facetas, tais como no processo de extração de matéria-prima, na fabricação, no transporte, na instalação e no descarte.

Em segundo lugar, dizer que uma energia ou fonte é limpa traz conflitos com leis físicas. Como consequência da conservação da massa, toda ação natural ou artificial de transformação sobre a matéria gera resíduos e se tratando de um procedimento complexo como o da geração de energia elétrica, seja qual ela for, estes sempre existirão, principalmente como desperdício. Mesmo que não seja exatamente no momento da produção de eletricidade, eles surgirão ao menos na sua cadeia industrial.

Em terceiro lugar, esta expressão não traz nenhuma informação técnica e aparenta mais um apelo publicitário do que uma categoria científica. Como produto científico, é difícil dizer o que é uma tecnologia limpa. Pode ocorrer discordância sobre o que elas são, ou seja, quais fontes fazem parte deste grupo, e, em casos distintos, “Energias Limpas” serão definidas diferentemente. Um exemplo é o da energia nuclear. Se o pensamento recai somente sobre o processo de produção de energia elétrica, esta pode ser considerada uma “Fonte Limpa” quase unanimemente, visto que não libera gases poluentes. Entretanto, os resíduos radioativos, vulgarmente conhecidos como “lixos radioativos”, são um grande problema de poluição, podendo durar milhares de anos e causar danos graves para a humanidade e para o meio ambiente. Além disso, acidentes nucleares já ocorreram e podem acontecer novamente.

O quarto e último fator é político. Como estas tecnologias afetam direta e grandemente a vida das pessoas, esta questão deve ser levada em consideração. Mesmo que a sociedade queira “Energias Limpas”, a melhor atitude para se dialogar sobre o assunto é usando a honestidade. Continuar chamando algumas tecnologias assim só trará problemas, pois de um lado dará força para aqueles que querem de qualquer modo produzir energia elétrica fazendo uso de fontes que poluem mais, como os combustíveis fósseis, visto que o termo pode ser visto como amparado por uma mentira. Por outro lado, as pessoas que querem um desenvolvimento sustentável, que desejam consumir eletricidade vinda de fontes que não agridam tanto a humanidade e a natureza, se sentirão enganadas. Como consequência, pesquisas e produtos que tem realmente este fim perderão apoio. Por fim, se se quer uma análise rigorosamente técnica, o termo não é apropriado por trazer este peso político.

Deste modo, em qualquer situação é desaconselhado o uso da expressão “Energias Limpas” ou qualquer uma de suas variações.

2.1.2 – Energias Verdes

A segunda expressão que é frequentemente empregada é “Energias Verdes” ou similares. Os problemas acarretados por seu uso são parecidos com aqueles das “Energias Limpas”. Outra vez ela parece inibir a poluição inerente às tecnologias envolvidas.

Efetivamente, nenhuma tecnologia de geração de energia elétrica é “ambientalmente amigável”. Todas elas impactam negativamente a natureza de um jeito ou outro, algumas mais, outras menos. Isto deve ser deixado claro e o uso deste termo não faz isso.

Além disso, os equipamentos “verdes” que fazem parte da estrutura da produção de energia elétrica são culturalmente conhecidos como opositos à natureza sem intervenção humana. Ou seja, não são “verdes” nem mesmo em seu sentido cultural. A energia solar fotovoltaica é chamada assim e é um exemplo desse aparente paradoxo. O material das placas fotovoltaicas pode ser um semicondutor como o silício, cuja composição é similar àquela encontrada nos diodos e transistores da eletrônica que constituem os modernos celulares e computadores. Isso sem contar os inversores, artefatos que fazem parte dos sistemas de energias fotovoltaica e eólica, que são formados exclusivamente por dispositivos eletrônicos que incorporam artifícios e aparelhos de controle e automação avançados. Mesmo os mais “rudimentares” dos equipamentos que não contam com eletrônica também são símbolos da dominação da natureza pelo homem e, assim, da oposição entre os dois, tal como é o caso das turbinas a vapor para geração de energia elétrica por biomassa que aludem às máquinas a vapor da Revolução Industrial e sua poluição desenfreada.

Outro ponto interessante está relacionado a uma espécie de ascese ambiental. Não se quer aqui ir contra qualquer forma de religiosidade, misticismo ou esoterismo existente em relação à natureza. No entanto, é preciso separar os casos, pois a tecnologia é um produto material feito pelo ser humano, independente da devoção e crença, e como tal é passível das ações terrenas do homem. Portanto, se se quer um estudo estritamente técnico, este deve estar desvinculado de doutrinas e religiões seguidas pelas pessoas. Desta maneira, a ciência pode servir à humanidade e ao meio ambiente indistintamente e sem preconceitos da forma mais benéfica possível. Logo, chamar as tecnologias de “verdes” é ir contra esta conduta.

Há ainda um ponto para se acrescentar. Dentro da política, a expressão “Energias Verdes” cria um empecilho que vai além daqueles das “Energias Limpas”. Os movimentos políticos que são fortemente defensores do meio ambiente são conhecidos por essa alcunha de “verdes”. Sendo assim, aparenta-se uma apropriação da tecnologia por um partido ou movimento político, algo extremamente inconveniente, visto que ela não pode pertencer a nenhum deles, mas sim a toda a humanidade. Nesse sentido, essa conotação cria impasses políticos para aqueles que querem, independentemente do espectro partidário, combater as mudanças climáticas e todos os outros tipos de impactos negativos na natureza pelo homem. Estas ações devem fazer parte de políticas de Estado e não de governos e, assim, associações erradas quanto ao uso das tecnologias por somente alguma bandeira política traz ainda mais complicações e confrontos acerca do tema e não uma aceitação favorável como se quer.

“Energias Verdes”, portanto, é um termo que não é indicado.

2.1.3 – Energias Alternativas

A terceira expressão também tem um grande número de adeptos, principalmente aqueles que vislumbram com bons olhos o progresso tecnológico e alguns estudiosos na engenharia elétrica, mas também possui várias dificuldades em seu emprego. É o termo “Energias Alternativas”.

A palavra “alternativa” pode ter sentido de oposição às práticas chamadas “tradicionalis” de geração de energia elétrica, como o uso de combustíveis fósseis, nucleares e grandes hidroelétricas como fontes, dos grandes portes e das centralizações. De fato, como se viu no capítulo anterior, por muitos anos estes foram os meios mais populares de se produzir eletricidade. Todavia, a expressão parece denotar uma novidade. Isto é falso em no mínimo dois sentidos. Primeiro, como se viu também no capítulo anterior, o início da geração prática de eletricidade era localizada, sendo dentro da rede de distribuição ou mesmo no interior das casas, assim como as “alternativas” o são muitas das vezes. Segundo, as “Fontes Alternativas” existem há muito tempo e algumas delas eram exploradas há mais de um século. As duas mais famosas atualmente, a energia solar fotovoltaica e a energia eólica, por exemplo, são ideias antigas.

O efeito fotovoltaico, processo pelo qual luz é convertida diretamente em eletricidade, foi descoberto em 1839 pelo francês Edmond Becquerel [12, 13]. Já os primeiros moinhos de vento a gerarem eletricidade, que surgiram na Escócia por James Blyth, nos Estados Unidos por Charles F. Brush e na Dinamarca por Poul la Cour, datam dos últimos anos do século XIX [158]. Igualmente, a geração de energia elétrica por hidroelétricas de pequeno porte e a cogeração são de tempos remotos desse mesmo século e a energia geotérmica para geração de energia elétrica é do início do século XX. As pequenas hidroelétricas, hoje chamadas de “alternativas”, faziam parte do esquema do ano de 1881 de Godalming [170], cidade pioneira na alimentação de energia elétrica como se viu no capítulo precedente, assim como da mansão Cragside de Lord Armstrong também do mesmo ano [32]. A primeira aplicação de cogeração também fazia parte de outro projeto pioneiro: a estação de Pearl Street de Edison, funcionando desde sua inauguração em 1882. As primeiras ideias sobre as células a combustível pelo galês William R. Grove são do mesmo ano da descoberta do efeito fotovoltaico [38]. A energia geotérmica é empregada para produção de eletricidade desde 1913 [16]. Não é porque estas tecnologias não foram vastamente exploradas que podem receber o cognome de “alternativas” e serem vistas como uma enorme inovação.

Entende-se que quando se quer chamar tais tecnologias de “alternativas”, o que se enxerga é uma maior amplitude de sua utilização. Sem embargo, como há movimentos econômicos e políticos por trás de suas aplicações, elas dependem de vontade e ação para serem implementadas e aceitas, mas não como “alternativas” e sim como mais opções disponíveis para a sociedade, sendo dispostas no mesmo patamar que quaisquer outras tecnologias.

Outro problema é temporal: o período de uso e ser “alternativa” levam a uma confusão da utilização. Dizer que é “alternativa” parece remeter a técnicas que serão usadas somente em momentos emergenciais ou transitórios e não permanentemente. Este claramente não é o caso, visto que cada dia mais as pessoas aderem a estas tecnologias em grande escala para uso cotidiano e contínuo, cobrindo suas demandas e consumos diários.

Há mais um ponto, o espacial: o emprego tem se tornado cada dia menos “alternativo” em vários lugares, visto sua grande consolidação. Em muitos países, estes métodos de se produzir energia elétrica assim nomeados atualmente são regra e não exceção. Alguns exemplos ilustram este fenômeno.

Na Espanha, a energia eólica (fonte “alternativa” para muitos) em 2017, de acordo com um relatório preliminar da *Red Eléctrica de España*, representava 23005 GW de potência

instalada do total nacional de 104517 GW ou 22,01%, sendo que em termos de balanço energético nacional anual, esta mesma fonte gerou 46942 GWh do total de 262788 GWh da produção nacional de eletricidade ou 17,86% [161]. Quase 1/5 da produção total de energia elétrica de um país inteiro é valor suficiente para dizer que esta não é uma fonte “alternativa” e sim uma das principais naquele local.

No caso da Alemanha, o fato de que as “Energias Alternativas” não são mais realmente alternativas é ainda mais claro. De acordo com o instituto *Fraunhofer ISE* [77], em 2017 as Energias Renováveis formavam 209,97 TWh ou 38,39% de toda a geração de energia elétrica do país de 546,91 TWh, sendo formadas por energia eólica (103,65 TWh ou 18,95%), biomassa (47,45 TWh ou 8,68%), solar fotovoltaica (38,39 TWh ou 7,02%) e hidroelétrica (20,48 TWh ou 3,74%). A parcela de Energias Renováveis é maior do que todas as outras fontes individualmente: energia nuclear (72,16 TWh ou 13,19%), lignito (133,98 TWh ou 24,49%), antracito (81,74 TWh ou 14,95%) e gás natural (49,06 TWh ou 8,97%). Removendo as hidroelétricas, fontes “tradicionais” (levando em conta que pode haver grandes centrais nestes números) dentro das Energias Renováveis, e mantendo apenas as “Energias Alternativas” eólica, solar fotovoltaica e biomassa, a parcela configura ainda 34,65%, superando ainda assim qualquer uma das fontes “tradicionais” individualmente. A energia eólica sozinha é uma porção maior do que qualquer outra fonte “tradicional”, com exceção do lignito. Há ainda informações do blog *Strom-Report* [171] de que este é o quarto ano seguido na Alemanha em que as Energias Renováveis ultrapassam as fontes “tradicionais” e que nos meses recordes de 2017, a eólica produziu até 28% mais energia elétrica do que o lignito.

A Dinamarca é outro caso exemplar destas incongruências. O país é conhecido pela enorme produção de eletricidade através da energia eólica. Com efeito, em 2016, de acordo com o Relatório de Meio Ambiente da *Energinet* [64], operador nacional de transmissão de energia elétrica e gás natural do país, do total de 28,93 TWh de energia elétrica produzida, 12,782 TWh (44,18%) vieram de turbinas eólicas somente. No ano anterior de 2015, quando houve maior incidência de ventos, o alcance superou a metade da energia elétrica produzida com 51,01% da parcela. No entanto, outra forma de produção de energia elétrica, também comumente nomeada “alternativa”, chama a atenção. A cogeração local produziu em 2016 3,891 TWh de energia elétrica, o equivalente a 13,45% do total.

Por fim, na Islândia, a autoridade de energia nacional do país, a *Orkustofnun* [150], indica que em 2016 a “alternativa” energia geotérmica foi responsável por 27,3% da eletricidade produzida e que sua capacidade instalada é de 24% do total. Esta capacidade é formada por 7 usinas, indo de potências dos 3,2 MW da usina de *Bjarnarflag* até 303 MW da usina de *Hellisheiði*.

Estes dados revelam outra inconsistência: o que é “alternativo” em um local, não o é em outro. Após a pequena análise destes países, todos de um mesmo continente, o que se vê é uma adoção diferente por cada um de fontes primárias de energia elétrica. Na Espanha, quase 1/5 desta energia vem de turbinas eólicas, enquanto quase metade na Alemanha provém de uma geração mista de Energias Renováveis. Já na Dinamarca, a energia eólica já ocupou mais da metade da eletricidade produzida e cerca de 13% deste tipo de energia foi preenchida por cogeração local. A Islândia, por sua vez, é um país referência na produção de energia elétrica a partir de energia geotérmica.

Por fim, um último entendimento que é bastante difundido e que deve ser evitado é de que as “Energias Alternativas” substituirão absolutamente as “energias tradicionais”. A oposição a esta ideia se deve ao fato de que em algumas situações, estas formas “clássicas” de produzir energia elétrica podem ainda ser melhores que as “novas” em vários aspectos. Não é porque há agora tecnologias diferentes disponíveis para serem usadas que se deve descartar as antigas. Existem alguns casos que devem ser deixados no passado, mas o leque de opções deve estar aberto. Assim, para se fazer a escolha correta o que é necessário são estudos abrangentes. E quando se diz escolha correta, quer se dizer com isso a que traga o máximo de benefícios para a humanidade e para o meio ambiente.

Por esses motivos, o termo “Energias Alternativas” é inconveniente e deve ser evitado.

2.1.4 – Energias Renováveis

De todas as expressões até aqui apresentadas, “Energias Renováveis” é a mais empregada e bem aceita de todas, tanto socialmente quanto na comunidade científica. Diferentemente das outras, ela traz um maior número de pontos favoráveis do que desfavoráveis. Além disso, sua proposta tem maior embasamento científico do que os outros três.

De fato, quando se está falando de uma Fonte Renovável, é bastante claro e rigoroso seu significado. Ela é um recurso natural que fica novamente disponível em um pequeno espaço de tempo relativo à existência humana para sua utilização devido aos ciclos naturais [34]. São, assim, Fontes Renováveis aquelas que podem ser aproveitadas de forma praticamente “inesgotável” pelo ser humano. No caso da geração de energia elétrica, elas são formadas pela energia solar (fotovoltaica e térmica concentrada), hidroelétricas (de qualquer escala), energia eólica, energia geotérmica, energia de biomassa, energias oceânicas (marés e ondas) e energia do hidrogênio. Como se vê, quase todas elas são provenientes primordialmente da energia solar. Além das energias solares propriamente ditas, as hidroelétricas usam as forças das águas para gerar eletricidade que, por sua vez, surgem da evaporação e da precipitação; a energia eólica é obtida a partir dos ventos que fazem girar turbinas, sendo que os ventos nada mais são que movimentos de massas de ar devido às diferenças de pressão que existem graças às temperaturas diversas que o Sol causa na Terra; a energia da biomassa nasce da energia obtida previamente por meio da fotossíntese das plantas, fenômeno usado para aquisição de energia através da luz solar; as ondas também têm origens na ação dos ventos, que como se viu são uma consequência das ações do Sol.

Em contrapartida, as Fontes Não-Renováveis são aquelas que se esgotam em um tempo relativamente pequeno para a existência humana e, portanto, não podem ser reaproveitadas. No caso da produção de energia elétrica, elas são formadas pelos combustíveis fósseis (petróleo e seus derivados, carvão e gás natural) e pela energia nuclear.

A expressão “Energias Renováveis”, todavia, não fica livre de algumas dificuldades. A primeira delas é o fato de que o que é renovável pode se tornar não-renovável (este assunto será tratado melhor no quarto capítulo). Isto ocorre quando a taxa de utilização supera a máxima capacidade de sustentação do sistema [34]. Com as mudanças demográficas e climáticas acontecendo de forma acelerada, fica difícil prever a situação dos recursos e se eles

farão ou não parte futuramente de cada um destes grupos apontados. A energia nuclear é um destes casos. Antes considerado recurso renovável, hoje não o é mais. Há ainda várias pessoas e dados indicando que as alterações no clima devido às atividades humanas e suas consequentes secas podem fazer com que a energia hidroelétrica enfraqueça seu posto de renovável [47].

Um segundo ponto importante é que, como as outras expressões, o termo “Energias Renováveis” já traz consigo fortes indícios de implicações positivas para a natureza. Isto, porém, pode não ser verdade. Além do fato da transformação de renovável para não-renovável ser plausível, ser renovável não implica terminantemente em uma solução ótima para o meio ambiente. As tecnologias que fazem parte desta categoria trazem danos que nada tem a ver com sua renovação e a expressão pode iludir. Alguns exemplos demonstram isso.

As grandes hidroelétricas podem ser reaproveitadas com a façanha de se gerar eletricidade sob demanda, especialmente quando são construídas com barragens. Apesar deste benefício, para que ele ocorra é preciso muita das vezes fazer enormes inundações que devastam floras e faunas ao redor.

Uma das biomassas mais utilizadas na produção de energia elétrica é o bagaço da cana-de-açúcar. Grandes plantações podem ser feitas e, após a colheita e uso do bagaço para queima e produção de eletricidade, o mesmo lugar pode servir novamente para cultivo da mesma planta. A despeito desta reutilização, não se pode esquecer que áreas de vários hectares de florestas podem ter sido devastados para que a exploração ocorresse.

Por motivo análogo a este segundo, as Energias Renováveis podem trazer a fantasia de serem exclusivamente benévolas para a sociedade. Como se viu, a exploração descomedida destes recursos naturais pode fazer com que eles fiquem extremamente escassos ou pode restringir seu uso por outras pessoas diretamente. No primeiro caso, toda a humanidade pode sofrer as consequências. O segundo caso, por sua vez, é conhecido nas ciências econômicas. Um recurso que é explorado por um determinado grupo e este uso faz com que outro grupo da mesma localidade seja excluído do uso ou ao menos que ele passe a usufruir em menor quantidade dele, dá-se o nome de recurso comum ou, simplesmente, comum (este assunto também será mais discutido no quarto capítulo). Apesar de ser um recurso renovável, se ele for um comum, ele pode fazer com que a energia elétrica disposta em certo local beneficie somente uma parte de uma população e que a fonte primária fique escassa para as outras pessoas (apesar de não haver impedimento no uso, há rivalidade por ele).

Há ainda uma terceira questão da relação entre uma “Energia Renovável” e o impacto dela na vida das pessoas. Ainda fazendo uso dos dois exemplos versados anteriormente, a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis pode prejudicar terceiros de diferentes maneiras. No caso das hidroelétricas, a inundação pode obrigar pessoas a abandonarem suas casas, empresas a se deslocarem e destruir comunidades indígenas e quilombolas. Já para a biomassa, é frequentemente debatido que as plantações específicas para obtenção desta fonte podem prejudicar as plantações próprias para produção de alimentos.

Apesar destas dificuldades em relação à expressão “Energias Renováveis”, ela tem um significado muito claro cientificamente e é objetiva. Portanto, seu uso é apropriado na maioria das ocasiões, não sofrendo tanto como os outros com as prováveis interpretações equivocadas.

No entanto, é preciso que sejam lembrados os problemas que seu emprego acarreta para que não se afaste vários de seus impactos, sejam eles positivos ou negativos, principalmente no meio ambiente e na sociedade.

2.1.5 – A Expressão “Geração Distribuída”

O termo escolhido para ser utilizado neste trabalho é “Geração Distribuída”. Em relação às outras expressões abordadas, ela não chega a ser a mais popular, mas como será visto, ela traz algumas vantagens. Com uma busca simples usando a ferramenta Google Acadêmico®, é possível ter uma noção desta popularidade dos termos discorridos a partir do número aproximado do emprego em publicações científicas, como mostra a Tabela 2.1. A busca, em inglês, foi feita no mês de Março de 2018. Os valores são aproximados pela própria ferramenta.

A abordagem das outras expressões é mais fácil, principalmente por fazerem uso de palavras que não precisam de conhecimentos técnicos mais complexos prévios, e, por isso, são largamente utilizadas em textos de áreas científicas diferentes. Não obstante, elas podem ser empregadas com vieses publicitários e políticos. A expressão “Geração Distribuída”, por sua vez, tem sentido mais restrito e técnico e isto justifica a quantidade menor de emprego.

Tabela 2.1- Número aproximado de publicações encontradas em busca (em inglês) na ferramenta Google Acadêmico® no mês de Março de 2018 para as expressões discutidas: exclusivamente no título e em busca genérica.

Expressão pesquisada em inglês	Número aproximado de publicações encontradas no Google Acadêmico® (Março de 2018)	
	No título	Busca genérica
“ <i>Clean Energy</i> ”	5350	275000
“ <i>Green Energy</i> ”	3390	107000
“ <i>Alternative Energy</i> ”	5400	308000
“ <i>Renewable Energy</i> ”	70000	1730000
“ <i>Distributed Generation</i> ”	11200	173000

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados obtidos pela ferramenta Google Acadêmico®, Março de 2018.

Como se viu, as outras expressões similares a Geração Distribuída levam a várias confusões, emitem sinais errados, inibem ideias e trazem consigo informações às vezes equivocadas. O termo, portanto, parece ser o mais apropriado. Ele pode ser considerado de um grau técnico maior, estando isento de qualidades políticas, ambientais e sociais diretamente expostas. Este é um de seus grandes méritos, pois a partir do seu emprego, o estudo pode se tornar mais exigente, levando em conta inicialmente de forma mais objetiva as tecnologias em si ao invés de posições subjetivas.

Não se quer com isso que as discussões sobre as implicações dos artefatos que fazem parte do grupo da Geração Distribuída na sociedade e no meio ambiente estejam afastadas. Pelo contrário, o que este trabalho tenta apresentar é justamente uma visão mais ampla da tecnologia, mostrando como é relevante para a humanidade e para a natureza não só as técnicas aplicadas, mas também suas consequências sociais e ambientais. Sendo assim, com a adoção deste termo, o terreno da pesquisa estará livre para que o estudo seja o mais imparcial

possível e, desta maneira, traga o maior número de subsídios para se pensar em soluções adequadas.

O termo aqui escolhido possui obstáculos em seu emprego, mas estes são mais técnicos. Consequentemente, nas seções que seguem, estas complicações são discutidas, sobretudo abordando sua definição. Sem embargo, antes de se passar para uma revisão bibliográfica que trata sobre suas definições com suas respectivas meditações, é feito um estudo do uso da expressão historicamente.

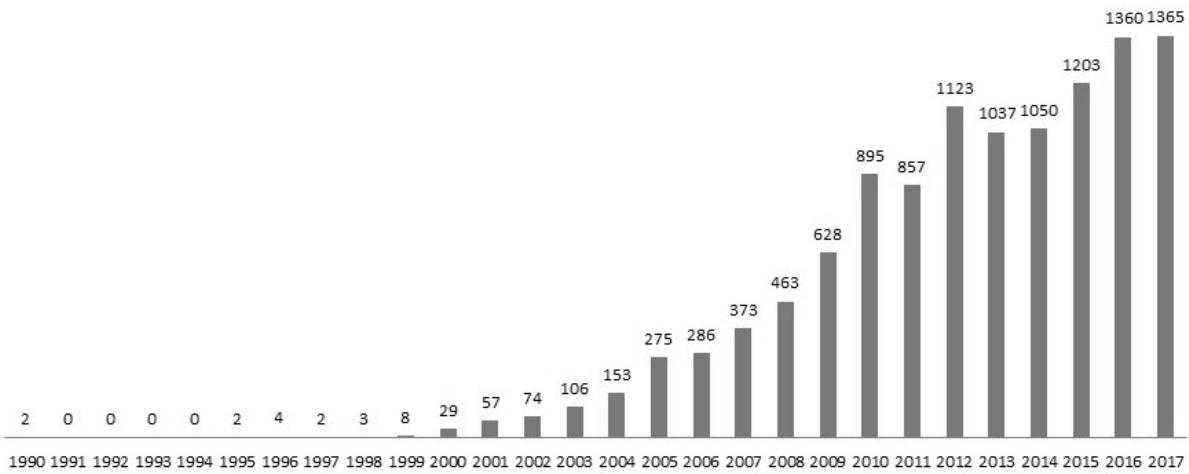
2.2 – O Termo “Geração Distribuída” ao Longo do Tempo

O conceito de Geração Distribuída, independentemente da definição escolhida, não é uma novidade. Como se viu no primeiro capítulo, alguns homens ricos ingleses possuíam produção de eletricidade dentro de suas próprias casas e as primeiras estações de geração de energia elétrica, como aquelas das cidades inglesas de Godalming e Chesterfield e as estadunidenses baseadas no modelo de Pearl Street, eram localizadas perto dos usuários, tinham uma potência atualmente considerada baixa e distribuíam a energia elétrica a distâncias muito pequenas, ficando restrito seu transporte dentro da própria cidade, inexistindo um sistema de transmissão de energia elétrica. Ao passar dos anos, pelos motivos apresentados também no capítulo 1, houve uma preferência por sistemas centrais de grande porte que usassem como fontes, combustíveis fósseis, hidroeletricidade e energia nuclear, e que ficavam distantes dos centros consumidores.

Apesar desta preferência no procedimento de se gerar energia elétrica, a ideia por trás da Geração Distribuída, como será visto, retornou por volta da década de 1970. Todavia, foi somente a partir dos anos 1990 que a expressão ganhou mais adeptos e suas tecnologias passaram a ser o centro de pesquisas e desenvolvimento. Isto fica evidente com uma procura no acervo digital do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*), o *IEEE Xplore*. Pesquisando-se pela expressão “Geração Distribuída” em inglês (“*Distributed Generation*”), o filtro para faixa de tempo das publicações da ferramenta só permite buscas de 1990 para frente. O gráfico da Figura 2.1 mostra a evolução do emprego do termo em publicações de engenharia elétrica (foram excluídas aquelas encontradas das áreas de telecomunicações, computação e física aplicada que não possuíam relação com o sistema elétrico de potência) de 1990 até 2017.

As primeiras publicações científicas conhecidas pelo autor a fazerem uso do termo “Geração Distribuída” explicitamente apareceram no início da década de 1970. A ideia ressurgiu um pouco antes, mas a expressão exata só veio ao mundo depois. Mesmo assim, até o final da década de 1960 e mesmo no início dos anos 1970, as previsões das tecnologias e do sistema para a geração de energia elétrica por alguns engenheiros eram bem diferentes do que verdadeiramente aconteceu e dos rumos que as pesquisas tomaram.

Figura 2.1 - Evolução da aparição do termo "Geração Distribuída" ("*Distributed Generation*") nas publicações de engenharia elétrica de 1990 até 2017 da biblioteca digital *IEEE Xplore*.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados pesquisados no *IEEE Xplore*.

2.2.1 – As Previsões da Década de 1960 para o Futuro da Geração de Energia Elétrica

Três publicações mostram como se imaginava o futuro da geração de energia elétrica nos anos 1960. O primeiro é um artigo de Alexander Kusko [121] publicado na revista *IEEE Spectrum* em Abril de 1968. As outras duas são dois livros-texto de engenharia elétrica que ainda hoje são bastante utilizados: *Electric Energy Systems Theory: An Introduction* de Olle I. Elgerd [59], em sua edição de 1973 (com direitos autorais de 1971), e *Elements of Power System Analysis* de William D. Stevenson Jr. [169], em sua segunda edição (1965). A seguir, estas previsões para o sistema elétrico são apresentadas e discutidas antes de continuar a revisão histórica do termo “Geração Distribuída”.

No artigo *A Prediction of Power System Development, 1968 to 2030* [121], o autor discorre sobre a tendência para o sistema elétrico futuro, falando sobre geração, distribuição e transmissão, partindo daquele existente em 1968 até chegar naquele que poderia existir em 2030. Já em seus pressupostos para tentar fazer esta “previsão racional” (usando suas próprias palavras), o autor erra ao dizer que a geração de energia elétrica em massa seria derivada primariamente de usinas nucleares e de que a regulamentação do sistema elétrico pelo governo seria maior em todos os níveis. De fato, o que se viu poucos anos depois da publicação do artigo foi o contrário. O número de usinas nucleares cresceu, mas os acidentes nucleares e a grande oposição das pessoas fez com que estas formas de geração de energia elétrica tivessem participação menor, com exceção de alguns países. Como já se viu, a proposta de alguns governos foi desregulamentar o mercado de energia elétrica (o PURPA de 1978 nos Estados Unidos sendo um exemplo do início deste processo).

Para não fugir do foco que é a geração de energia elétrica, as previsões de Kusko serão abordadas mais sobre esta questão. O próprio autor declara que na década de escrita e publicação de seu trabalho (anos 1960), o sistema elétrico estava baseado em geração em grandes usinas centralizadas e uso de transmissão em alta tensão, sendo as interconexões uma maneira utilizada para aumentar a confiança e a diversidade na alimentação para as cargas.

Além disso, a produção era predominantemente baseada em combustíveis fósseis, nucleares e hidroelétricas.

Para o autor, como o pico dos combustíveis fósseis seria alcançado no fim dos anos 1960, nos anos 1970 até 1980, usinas usando carvão não mais seriam construídas. Haveria um aumento na edificação de usinas nucleares de alta potência, mas elas ainda ficariam longe das áreas com maior quantidade de pessoas. Grandes “pacotes” de geradores com turbinas a gás seriam elaborados com até 500 MW para uso em pico, em reservas e gerações isoladas, como para aquecimento e condicionamento de ar. Estações centrais de geração pela tecnologia de geração por magnetohidrodinâmica (*magnetohydrodynamic* - MHD), onde energia elétrica é produzida diretamente a partir das energias cinética e térmica de um fluido condutor (geralmente plasma) em um campo magnético, estariam mais desenvolvidas em escala de laboratório.

Na década de 1980 até 1990, para alcançar o enorme aumento da demanda por energia elétrica, a solução adotada seria o uso de usinas nucleares em três localidades diferentes possíveis: dentro das cidades, até 95 quilômetros de distância das áreas densamente povoadas e onde for conveniente, apesar de longe. Em cada uma, um sistema de distribuição e transmissão existiria de acordo com as necessidades, sendo que no primeiro, cabos em alta tensão CA alimentariam diretamente as cargas, no segundo, cabos de alta tensão com alta capacidade iriam até as cidades e no terceiro, cabos CC levariam a energia elétrica para os centros urbanos. A escolha dentre estas maneiras seria feita de acordo com análises econômicas, avanços tecnológicos e controle de danos radioativos.

Mais especificamente falando sobre a geração, os reatores chegariam a produzir 2000 MW de potência, enquanto uma usina completa teria 10000 MW. Haveria um esforço grande pela produção de energia elétrica pelo método de fusão nuclear. Cidades planejadas com indústrias e residências seriam elaboradas em torno de usinas nucleares. Os “pacotes” de geradores com turbinas a gás ou outras fontes seriam instalados em áreas para grandes cargas em momentos de pico. Instalações para aquecimento, condicionamento de ar e eletricidade seriam levantadas em larga escala em prédios e centros de carga. Uma planta usando a tecnologia MHD seria construída. “Fontes de energia exóticas”, como aquecimento, radiação solar e matérias nucleares forneceriam energia elétrica para objetos isolados, tais como instrumentos de comunicação, transmissão de dados, estações espaciais e alarmes.

Nos anos compreendidos entre 1990 e 2000, o autor previa a continuação do aumento das cargas com a consequente instalação de grandes usinas em um sistema compacto, espécie de “subsistema”, ligado aos centros consumidores, balanceando a carga e cada cidade sendo autossuficiente. Desta forma, a interconexão perderia sua utilidade de pouco em pouco. As usinas construídas em 1960 deixariam de existir.

Em termos de geração em particular, usinas a combustível fóssil não mais seriam construídas. Gás e carvão seriam usados somente para “pacotes” de geradores com turbinas a gás e para células a combustível. Usinas nucleares seriam construídas ou dentro de centros com grande número de habitantes ou adjacentes a eles. Centros residenciais e industriais continuariam a ser construídos ao redor de plantas nucleares. Novas usinas hidroelétricas não seriam mais construídas. “Pacotes” de geração de energia são desenvolvidos, assim como há um aumento do uso de células a combustível e armazenamento de energia. Estes tipos de produção de energia elétrica seriam principalmente utilizados para momentos de pico, de

reserva e para geração e alimentação locais de alguns serviços. Uma usina de MHD em larga escala seria testada em um sistema elétrico. Grandes células a combustível seriam colocadas em operação.

Por fim, nos anos 2000 até 2030, levando ainda em conta o crescimento gigantesco no consumo de energia elétrica, se não houvesse cabos supercondutores, a geração deveria se localizar mais próxima da carga para reduzir a necessidade da transmissão. Os esforços seriam para construir usinas nucleares de grandes proporções dentro dos locais com maior quantidade de pessoas. A primeira planta de fusão nuclear poderia estar em operação, edificada próxima dos oceanos. Só restariam estas grandes usinas nucleares, sendo que aquelas de menor porte construídas anteriormente seriam desligadas, assim como seus cabos de transmissão. O mesmo ocorreria para as grandes hidroelétricas até 2030. Os “pacotes” de geração seriam utilizados para proteção do sistema contra as variações de carga. Geradores de MHD seriam usados para geração em massa de energia elétrica. Já as células a combustível e baterias seriam utilizadas para equipamentos portáteis. O critério para escolha do método de geração seria o gerenciamento do combustível usado.

Conclui o autor que até os anos 1990 a geração por usinas nucleares ficaria fora das cidades, mas depois desta década ela aumentaria e passaria a formar “subsistemas” alimentando diretamente as cargas dentro da cidade. A geração precisaria: ficar em locais densamente povoados, independente de resfriamento por água e alcançar potências acima de 10000 MW até 25000 MW. Toda esta previsão era baseada em referências técnicas atualizadas da época, assim como legislações.

O livro de Elgerd [59] dá também uma previsão para o sistema elétrico em seu primeiro capítulo, sendo que o autor diz que aquela feita por Kusko é “muito interessante e provável de acontecer até o ano de 2030” e, por isso, em grande parte as ideias coincidem. Para Elgerd, nos últimos 30 anos do século XX, as previsões do consumo de energia elétrica são iguais ao de Kusko. Ou seja, a cada 10 anos, há o dobro deste valor. Entretanto, para Elgerd o aumento pode ser ainda maior, visto que mais equipamentos usariam eletricidade.

Ele reforça ainda mais um planejamento com vistas ao bem ecológico e isto impacta em sua previsão. Mesmo assim, Elgerd diz que os combustíveis fósseis são relativamente abundantes em sua época, mas os recursos hídricos não. No ano de 1970, de acordo com o autor, a energia elétrica era produzida por fonte na seguinte proporção nos Estados Unidos: combustíveis fósseis com 82%, sendo 7% de petróleo, 21% de gás natural e 54% de carvão, hidroelétricas com 17% e nuclear com 1%. Para ele, a energia nuclear ocuparia cerca de 50%, os combustíveis fósseis entre 40% e 50% e hidroelétricas entre 2% e 4% no ano 2000. Apesar destes números, para o autor, na virada do século usinas de combustíveis fósseis provavelmente não seriam mais construídas. Sua previsão vai ainda mais longe, dizendo que em 40 anos, portanto em 2010, as usinas nucleares (fissão) ocupariam 100% da geração de energia elétrica, que assim permaneceria até a chegada das usinas a fusão nuclear que, por sua vez, seriam a fonte mais utilizada. Acrescenta-se que as usinas nucleares seriam construídas com grandes potências (1000 MW ou mais) e estariam cada vez mais próximas dos centros de carga.

A previsão de Stevenson [169] é menos desenvolvida que a dos dois últimos autores citados. Ainda assim, ele dá uma ideia interessante da visão para o futuro do sistema elétrico por engenheiros da década de 1960 e início dos anos 1970. Para este autor, a construção de

reatores nucleares em cada centro de carga não parecia uma ideia muito prática e as linhas de transmissão continuariam a existir, mesmo com o aumento das plantas nucleares. Ele dá apenas alguns exemplos do que era pesquisado no momento e que seriam tendências de se tornarem grandes fontes de energia elétrica. Dentre estes exemplos, ele ressalta a geração MHD, os geradores termelétricos e termiônicos, fora a energia nuclear. Todas estas seriam para geração em grande escala, podendo ser mais ou menos próximas dos centros de carga. Ele também comenta rapidamente sobre as células a combustível como uma maneira de se gerar energia elétrica localmente ao invés de fazer parte do sistema elétrico.

Como se viu no primeiro capítulo, estas “previsões racionais” em pouco tempo foram demolidas. O sistema elétrico mundial partiu para outras direções alçado pelos ventos da história, da política e da economia. Esta é uma lição importante que se deve ter consciência. As antevições por intelectuais da área podem ser facilmente derrocadas, visto que as tecnologias são produtos sociais que, como já se disse, modificam e são transformadas pelas forças que nada têm de científicas, como aquelas próprias das ações humanas no mercado, nos governos e na cultura. Os engenheiros e cientistas, portanto, devem ter cautela com o que tentam prever e isto inclui, claramente, a Geração Distribuída. Apesar do grande otimismo atual, a solução do agora pode ser um problema do amanhã. Mais uma vez justifica-se um estudo crítico das tecnologias, extrapolando a barreira da física e da matemática para incluir perspectivas históricas, sociais, políticas, econômicas, etc. Estas últimas são ainda mais imprevisíveis, mas se postas em conjunto com as análises técnicas poderão alavancar o progresso de maneira mais próspera para a humanidade e para a natureza. A seguir, é visto como os rumos mudaram drasticamente através de um estudo sobre as origens do termo “Geração Distribuída”.

2.2.2 – O Renascimento da Geração Distribuída

Com as previsões não se concretizando, outros meios de geração de energia elétrica, sejam nas fontes escolhidas, sejam na localização e tamanho compreendidos, acabaram surgindo já na década de 1970. Acontecimentos históricos tratados no capítulo 1 podem explicar estas mudanças na produção de eletricidade. Efetivamente, as tecnologias e suas ideias têm seu desenvolvimento consolidado somente a partir de movimentos econômicos e políticos e a Geração Distribuída não escapa desta sinal. Os pensamentos embrionários vinculados a ela voltaram a germinar e foram determinados por circunstâncias traçadas pelo mercado e pelos governos.

Nos anos 1970, as crises do petróleo mobilizaram os países em buscas por novas maneiras de se produzir energia. Poucos anos depois, acidentes nucleares catastróficos colocaram em cheque o uso das usinas nucleares que pareciam trazer tanta esperança para a segurança energética. Foram estes os episódios que firmaram decisivamente o caminho para a Geração Distribuída ser explorada. Contudo, foi outro evento que abriu o terreno para ela.

Simultaneamente a estas passagens históricas, começando pouco tempo antes, o mundo passava pela Guerra Fria e a disputa entre os Estados Unidos e a União Soviética levou a corridas tecnológicas. Um país tentava superar o outro em demonstrações de avanços técnicos. Um dos mais conhecidos destes embates foi a corrida espacial que teve início nos

anos 1950. Não é à toa que as tecnologias que mais progrediram na época surgiram destas conjecturas econômicas e geopolíticas. Mais especificamente, de todas as técnicas de se gerar energia elétrica que estavam praticamente imobilizadas pelo tempo, a energia solar fotovoltaica e a eletricidade a partir das células a combustível renasceram de vez nos programas espaciais e trouxeram consigo de volta a ideia de uma Geração Distribuída. Como Jewell e Ramakumar [110] indicam, em 1954 uma célula fotovoltaica com eficiência de 6% foi desenvolvida nos Laboratórios Bell e estas viram suas primeiras aplicações na *Vanguard I*, um satélite estadunidense lançado em 1958, sendo que cada célula era produzida manualmente e custava 1000 US\$/W. Já as primeiras aplicações práticas das células a combustível para gerar energia elétrica só foram realmente acontecer quando um grande investimento foi feito através das missões espaciais americanas *Apollo* e *Gemini* na virada da década de 1950 para 1960. Antes deste investimento, pesquisadores independentes faziam os esforços para obter avanços nesta tecnologia. Somente depois é que a indústria tomou para si seu desenvolvimento na década de 1960 e, como consequência, surgiram os primeiros empregos das células a combustível para produção doméstica de energia elétrica [38].

Com efeito, observando as primeiras publicações que fazem uso da expressão “Geração Distribuída”, as células a combustível estão intimamente associadas a ela. Antes mesmo de o termo ser empregado, suas concepções começavam a ser discutidas e já em 1961, pouco tempo após os programas espaciais proporcionarem avanços nas células a combustível, Flynn em [76] nota os caminhos que elas poderiam trilhar no futuro da produção de energia elétrica. Para o autor, elas passariam por uma evolução indo de potências de geração em watts para quilowatts até finalmente chegar em megawatts e esta evolução decorreria porque, para ele, os cientistas acreditavam no iminente esgotamento dos combustíveis fósseis e na possível alta eficiência desta tecnologia. Como as células a combustível estavam sendo pesquisadas com vigor nos últimos anos devido aos programas espaciais americanos e que, por isso, tinham seu processo de fabricação melhorado, elas também poderiam ser uma boa alternativa e servir para suprimento de energia elétrica de maneira generalizada.

Para Flynn, o maior papel das células a combustível em nível de kVA seria a alimentação para equipamentos portáteis, mais do que para eletricidade gerada em casa. Um de seus problemas, todavia, é que sua produção de eletricidade é em CC, enquanto a maior parte do sistema elétrico usa CA. É interessante notar que na visão do autor, por um lado, as células a combustível na época também poderiam ser uma ameaça para as concessionárias, pois como produzem eletricidade de forma eficiente em pequena escala tanto quanto em grande escala, elas poderiam colocar cada proprietário de uma casa no mercado de energia elétrica. Por outro lado, esta tecnologia era vista com bons olhos pelo uso complementar entre células a combustível e energia nuclear. Nos momentos fora de pico, alguns tipos de células a combustível em particular poderiam ser carregadas mantendo um fornecimento completo e alta eficiência das usinas nucleares. Em momentos de pico, as células poderiam gerar a eletricidade excedente necessária. As células a combustível poderiam ser benéficas também para as concessionárias, visto que elas poderiam ser construídas próximas dos centros de carga, principalmente se fossem de pequena escala. Diferentemente de outras fontes de geração que usam, por exemplo, turbogeradores para produzir energia elétrica e precisam gerar em seu máximo para ter alta eficiência, as células podem ter um grau igual ou superior de rendimento mesmo se forem pequenas. Fora isso, elas não causam tantos problemas como estas outras fontes, tais como poluição, e assim não precisam ser construídas longe das cargas, o que acarreta em menos perdas.

Ainda segundo Flynn, havia já algumas ideias acerca da produção de eletricidade por células a combustível dentro de casa por algumas indústrias, principalmente de gás e petróleo, combustíveis estes que poderiam servir como fontes primárias. No lugar do transporte da eletricidade, os combustíveis é que seriam entregues para que nos domicílios elas fossem convertidas em energia elétrica pelas células. Ele cita uma fala do diretor da *Esso Engineering and Research Company*, Dr. Richard W. Sage: “Tais plantas caseiras de energia elétrica não são mais fantásticas do que os submarinos atômicos pareciam ser a alguns anos atrás”.

Concluindo, o autor aponta outros benefícios das células a combustível, incluindo sua aplicação em geração de eletricidade em locais remotos, assim como uma oportunidade especial para pequenas usinas de energia elétrica; talvez como fontes emergenciais em hospitais e para produção em pequenas fábricas, hotéis e fazendas. E finaliza dizendo:

É inteiramente concebível que existirá um período no nosso futuro onde as estações centrais de geração de energia elétrica darão espaço para células a combustível individuais em todas as casas. Em um período mais distante, quando os combustíveis fósseis não puderem ser mais utilizados para energia, nós poderemos retornar novamente à distribuição central, possivelmente usando uma usina de geração combinando reatores nucleares e células a combustível [76].

O primeiro trabalho conhecido pelo autor a empregar explicitamente a expressão “Geração Distribuída” apareceu em 1971, mais especificamente em Junho de 1971, em um relatório da força tarefa do *Electrical Research Council* [67], um grupo estadunidense formado em 1965 por executivos de indústrias e alguns servidores públicos para estudos cooperativos em diversos segmentos da indústria da eletricidade. Nele, os autores afirmam que é preciso encontrar maneiras que diminuam os impactos negativos no meio ambiente pela produção e consumo de eletricidade sem que também se reduza a qualidade de vida das pessoas. Dentre as alternativas técnicas propostas estão: novos conceitos para aumentar a eficiência das usinas, diminuir o problema das perdas térmicas e, em alguns casos, permitir a Geração Distribuída. Aqui eles a definem como unidades geradoras muito menores e próximas das cargas, diminuindo os requerimentos da transmissão.

Ainda em [67], em um capítulo que trata do “crescimento industrial e desenvolvimento do sistema”, os objetivos para prover energia elétrica de forma economicamente viável, mas que ao mesmo tempo cumpra os requisitos acima são discutidos, incluindo recomendações para pesquisas nos 30 anos após 1971. Nos objetivos específicos, há um exclusivamente sobre Geração Distribuída. Nele, o que se deseja é o aprimoramento de conceitos sobre a estrutura, assim como o efeito na confiabilidade das unidades de Geração Distribuída e sua integração ao sistema elétrico, de forma a reduzir os problemas de localização, de dissipação de calor e requerimentos da transmissão. Incluem-se, para eles, na categoria da Geração Distribuída as seguintes tecnologias: Células a combustível usando gás natural, combustível líquido ou hidrogênio, a geração MHD e pequenos geradores rotativos. Há até mesmo uma tabela indicando os valores a serem investidos na pesquisa sobre Geração Distribuída, cujo total de 1972 até 2000 seria recomendado em 6,8 milhões de dólares (de 1971). Em uma discussão mais detalhada, os autores indicam que as primeiras formas de Geração Distribuída eram formadas por geradores a diesel e pequenas unidades a vapor. No momento da escrita do texto, para eles, as máquinas a combustão seriam uma solução, mas por serem muito ineficientes, elas seriam usadas em momentos de pico somente. A cogeração

era uma promessa e as células a combustível eram tidas como a mais significativa das fontes de Geração Distribuída.

Seguindo cronologicamente as publicações com uso do termo “Geração Distribuída”, outros dois trabalhos também de 1971 aparecem na forma de artigos científicos revisados. Enquanto um foi apresentado em Outubro daquele ano, o outro foi recebido pelos editores da revista em que foi publicado também no mesmo mês.

No trabalho de Everett et al. [72], os autores acreditavam que era preciso tomar algumas atitudes e traçar alguns objetivos quanto à geração de energia elétrica. Para eles, da mesma forma que alguns autores anteriormente citados aqui, dos anos 1970 para frente, com o aumento de duas vezes a cada década no consumo de energia elétrica nos Estados Unidos, a maior porcentagem da capacidade de geração de energia elétrica seria coberta pelas usinas nucleares, evoluindo por diferentes estruturas que aumentariam a eficiência. O objetivo final é que se conseguisse produzir energia elétrica em grande quantidade para o crescimento econômico e bem-estar dos cidadãos e que ao mesmo tempo protegesse o meio ambiente. Os autores continuam o texto dando um panorama acerca da geração de energia elétrica por usinas nucleares e combustíveis fósseis.

Após discorrerem sobre estas formas de se produzir eletricidade, eles dedicam uma parte do artigo ao que chamavam “Sistemas de Geração Distribuída”. As tecnologias que fazem parte deste grupo seriam as turbinas a combustão, os geradores a diesel e as células a combustível. Para eles, estas últimas formas de se gerar energia elétrica seriam as mais promissoras, porque têm um impacto mínimo na natureza. No entanto, o alto custo não as tornava competitivas, apesar do progresso advindo das experiências espaciais. A sugestão dos autores seria colocar usinas de células a combustível de vários MW em pontos do sistema de distribuição para suprir a demanda e ao mesmo tempo diminuir os impactos no meio ambiente. As vantagens estão em instalar estas “plantas” (as aspas são dos próprios autores do artigo) na rede de distribuição, em vez de dentro das casas ou em estações centrais, de tal maneira que diminuam os custos com a diversidade de carga e a transmissão.

Apesar deste pensamento sobre a Geração Distribuída, Everett et al. acreditavam que a economia de escala, ou seja, a produção de eletricidade em massa em unidades centralizadas para um custo mais baixo, seria ainda a melhor solução para o futuro do sistema elétrico. Neste caso, a energia nuclear, passando por etapas de desenvolvimento tecnológico até culminar na grande promessa da fusão nuclear, tomaria a dianteira do progresso da geração de energia elétrica, enquanto os combustíveis fósseis ainda seriam importantes com a ressalva de se encontrar procedimentos que poluíssem menos.

Os outros pesquisadores a exporem ideias exatamente na mesma época sobre a Geração Distribuída não a chamavam assim. Lueckel et al. [130] a denominavam geração dispersa de energia. Eles estavam diretamente ligados à Pratt & Whitney Aircraft, empresa que adquiriu a licença de patentes de células a combustível em 1959, começou a produzir em Março de 1962 aquelas usadas nas missões espaciais *Apollo* e, a partir de 1967, iniciou um programa chamado *TARGET* (*Team to Advance Research for Gas Energy Transformation*) para geração de energia elétrica através de células a combustível usando gás natural como fonte primária de forma comercial para residências [38]. Portanto, diferentemente dos outros trabalhos, este se baseava em resultados práticos. E, mais ainda, talvez seja o trabalho da

época que traz mais detalhes sobre esta nova maneira de se gerar energia elétrica e suas implicações.

Os autores apresentam uma descrição bem detalhada das usinas de células a combustível e suas características operacionais, principalmente funcionando como uma geração dispersa. Em outras palavras, conforme definido por eles mesmos, uma geração de energia elétrica ligada diretamente no sistema de distribuição, em subestações ou dentro dos próprios locais de consumo.

Inicialmente, Lueckel et al. declaram os problemas concernentes ao aumento do consumo de energia elétrica juntamente com o aumento dos custos para se produzir eletricidade. Em seguida, eles vislumbram a geração de energia dispersa como um artifício novo que poderia contrapor estas altas demandas do período de publicação do artigo e futuras e vão além discorrendo sobre outras de suas benesses e como avançar o conceito:

Posicionando unidades geradoras na rede de distribuição de energia elétrica, alguns benefícios poderiam ser alcançados, tais como: as fontes de poluição seriam dispersas, os requerimentos das linhas de transmissão diminuiriam, áreas já existentes de subestações e geração poderiam ser utilizadas, proteção de áreas poderiam ser providas e requerimentos de reservas diminuídos. O conceito seria ainda mais desenvolvido se as unidades geradoras contribuissem menos com poluição, fizessem o mínimo de uso de recursos naturais, fossem 'bons vizinhos', produzissem eletricidade em um custo competitivo, tivessem o mínimo dos prazos de execução, alta confiabilidade e flexibilidade para assegurar vários ciclos de trabalho automaticamente [130].

As fontes disponíveis na ocasião, tais como as de combustível fóssil e as nucleares, contudo, não apresentavam as vantagens necessárias para a geração dispersa. A célula a combustível, por outro lado, seria uma solução bastante favorável neste sentido.

Em seguida, eles descrevem as características do sistema de células a combustível para geração dispersa como um conjunto de três equipamentos: o reformador que transforma o combustível e ar em uma forma útil; as células a combustível propriamente ditas que transformam o combustível em tensão CC e o inversor que transforma a tensão CC em CA. De acordo com os autores, testes em campo com estas células a combustível em casas estavam sendo feitos desde 1967 pelo programa *TARGET*, mostrando as características operacionais, econômicas e sociais positivas destes equipamentos como meios de geração dispersa, tais como poluição atmosférica mínima, pouco barulho, calor expelido no ar, baixa taxa de aquecimento, capacidade de gerar por diferentes combustíveis, operação automática, benefícios para a qualidade da energia e paralelismo com a concessionária.

Por fim, os autores discutem as células a combustível formando aplicações ligadas diretamente à concessionária, sendo descrito detalhadamente um experimento com uma planta de 20 MW, consistindo de quatro reformadores, oito módulos de células a combustível e oito inversores, sendo estes últimos ligados em dois transformadores para alcançar a tensão de saída da rede de 13,8 kV. Entre as sugestões de localização das plantas de células a combustível estão: subestações, pontos da rede de distribuição e locais de antigas estações centrais. Em termos de operação, elas poderiam fornecer energia continuamente às cargas, funcionar somente para momentos de pico ou mesmo para armazenamento.

As ideias sobre uma Geração Distribuída conforme Lueckel et al. fazendo uso de células a combustível tiveram reconhecimento. Os artigos apresentados a seguir comprovam isso.

Em um artigo de autoria de Friedlander [80] de 1972 em que se discute alguns novos dispositivos e recursos para produção de energia elétrica para contornar a provável escassez de combustíveis fósseis e os problemas de demora nas construções de usinas nucleares, a Geração Distribuída é discutida como uma destas soluções dentre outras. A formulação apresentada baseia-se inteiramente no artigo de Lueckel et al., ou seja, o que se fala é em geração de energia dispersa usando células a combustível exclusivamente. Conforme o autor, esta forma de produzir energia elétrica denota a localização de unidades geradoras dentro da rede de distribuição para diminuir os requerimentos das linhas de transmissão, tendendo também a diminuir o número de subestações nesta mesma área do sistema elétrico.

Em outro trabalho, esta mesma ideia é apoiada. No artigo de 1976 de Gregory e Pangborn [85] em que se trata inteiramente do uso do hidrogênio para prover energia e permitir independência dos combustíveis fósseis, em termos da produção de energia exclusivamente elétrica a proposta de geração de energia dispersa conforme o mesmo artigo de Lueckel et al. novamente é levantada.

Já num segundo artigo também de 1976, Phillips et al. [157] discutem inversores preparados para uso na geração de energia dispersa com células a combustível citando Lueckel et al. Os autores diferenciam duas aplicações diferentes dos inversores resultantes de seus trabalhos: um para geração no próprio local (*on-site*) em potências de 10 a 500 kW e outro para a geração dispersa de energia pela concessionária em subestações em níveis de 26 MW de potência. Para eles, “o conceito de geradores dispersos das concessionárias implica que eles podem ser instalados em diversas localizações de subestações da distribuição”. Para cobrir as condições nestes casos, eles indicam, a partir de informações obtidas com as próprias concessionárias, requerimentos que os inversores devem ter em termos de frequência, tensão CA, variações na tensão CA, fator de potência, etc. Desta maneira, seria possível prover uma interface adequada para as possíveis aplicações deste tipo.

Como se vê, para os “pioneiros” da Geração Distribuída, ela estava em geral fortemente associada com as células a combustível e que esta era a tecnologia mais promissora para este princípio de produção de energia. Geradores a vapor, turbogeradores e outros meios que usavam combustíveis fósseis eram tidos como o princípio da Geração Distribuída e eles também formavam uma solução enquadrada neste grupo, mas em menor escala. O termo (ou alguma variação sua), quando usado, era comumente ligado à localização, mas neste ponto a expressão já trazia dificuldades, visto que a geração poderia se encontrar no interior das casas ou somente próxima das cargas, ficar dentro de subestações da distribuição ou até mesmo funcionar como usinas independentes com porte relativamente grande (MW) conectadas diretamente ao sistema de distribuição. A capacidade ou potência vinculada ao emprego do termo divergia, pois como se viu elas iam de uns poucos kW até dezenas de MW.

Apesar disso, outra tecnologia inaugural da Geração Distribuída tomou a dianteira sobre este método de produção. A energia solar fotovoltaica, cuja tecnologia avançava lentamente, surgiu com este fim um pouco depois das células a combustível. Segundo foi observado anteriormente, as células solares fotovoltaicas tiveram progressos técnico, prático e comercial maiores ao fazerem parte dos programas espaciais nos anos 1950. No entanto,

mesmo com as melhorias na eficiência, a geração de energia elétrica conectada à rede elétrica usando a energia solar fotovoltaica, e não de forma isolada em equipamentos portáteis e pequenos, só apareceu na década de 1970. Portanto, o conceito de Geração Distribuída ligado aos sistemas fotovoltaicos só veio ao mundo nesta época. Uma boa descrição da história da geração de energia solar fotovoltaica a partir de publicações científicas, principalmente ligada ao sistema elétrico, entre seu surgimento até 1988 (ano de publicação do artigo) foi feita por Jewell e Ramakumar [110], artigo já mencionado anteriormente.

Como já se falou aqui, a energia solar fotovoltaica ganhou suas primeiras aplicações nas missões espaciais em 1958, um grande feito até então para ela, tornando-a uma possibilidade comercial. Até a década de 1970, entretanto, ela permaneceu neste estado. De acordo com Jewell e Ramakumar, em 1974 em um artigo da *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems* é que aparece a primeira menção sobre um sistema fotovoltaico de geração de energia elétrica ligado ao sistema elétrico.

Em seguida, em 1975 surge uma publicação versando sobre experimentos feitos com aplicações residenciais de energia solar fotovoltaica na Universidade de Delaware. A “*Solar One*” era uma casa com pequenas placas fotovoltaicas para estudar a correlação entre energia solar e as cargas caseiras típicas. Baterias eram usadas para fornecer a energia elétrica para as cargas CC. Elas eram carregadas pelas placas e, em momentos que a tensão caía ou a energia solar fotovoltaica estava indisponível, um sistema com chave as ligava na rede elétrica para o carregamento. Jewell e Ramakumar admitem que, com efeito, esta não era exatamente uma aplicação de geração de energia solar fotovoltaica ligada diretamente ao sistema elétrico, mas que era talvez o primeiro estudo experimental da interação entre estes dois sistemas.

No fim da década de 1970 e início dos anos 1980, a energia solar fotovoltaica sofre uma disparada em pesquisas científicas e aplicações de geração de energia elétrica, com um número relativamente superior de publicações. Em 1978, a operação interativa entre ela e o sistema elétrico foi descrita em artigo novamente da *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*. O texto discutia sistemas ligados à rede, assim como isolados, ainda envolvendo armazenamento, mas primordialmente em termos econômicos e não técnicos. No mesmo ano surgiu outra análise econômica. Diferentes casos foram estudados, tais como aplicações residenciais, intermediárias e centrais fotovoltaicas.

No mesmo ano e no seguinte, os artigos que apareciam tratando do assunto falavam, em termos da integração com a rede, de estudos concernentes à confiabilidade e uso em horas de pico. Alguns destes estudos ainda levavam em conta as baterias como intermédios entre a rede e a geração fotovoltaica. A produção de energia elétrica pelas placas fotovoltaicas começava a ser vista como economicamente viável e estratégias para maior inserção começavam a ser delineadas.

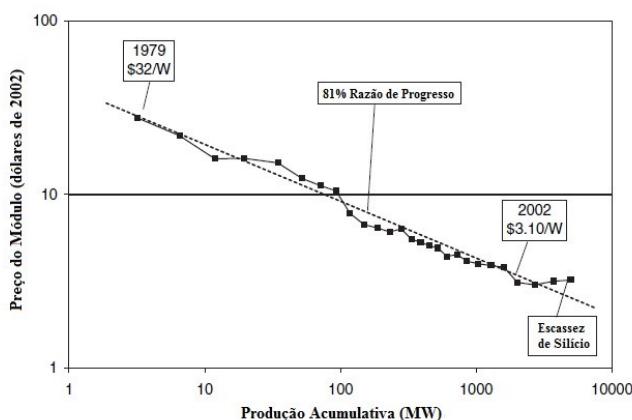
A partir do início dos anos 1980, os problemas ligados à interação entre a rede elétrica e os módulos fotovoltaicos passaram a ser debatidos expressivamente, sendo que tópicos tais como proteção do sistema elétrico, qualidade da energia, fluxos de potência e segurança das pessoas começaram a ser pautados, principalmente quando da tecnologia fotovoltaica como Geração Distribuída. Métodos econômicos, além dos técnicos, também foram explorados onde se determinava até mesmo cálculos de compra e de venda de energia elétrica entre as concessionárias e os usuários para integração de geradores distribuídos e intermitentes, levando em conta, sobretudo, a energia solar fotovoltaica.

Várias outras consequências da inserção das tecnologias de Geração Distribuída de uma forma geral, encabeçadas pela energia solar fotovoltaica, continuaram a ser fortemente estudadas por pesquisadores nos anos 1980. Problemas de qualidade da energia, tais como distorção harmônica e variações de tensão, de conversores de eletrônica de potência, de intermitência, de confiabilidade e de custos eram alguns abordados acerca da integração das placas fotovoltaicas e outros geradores dispersos na rede elétrica.

Concluindo, Jewell e Ramakumar indicam ainda que plantas fotovoltaicas com valores de 1 até 5 MW foram construídas nos Estados Unidos no início dos anos 1980 e alguns estudos indicavam seus respectivos desempenhos, mostrando otimismo em relação a esta tecnologia frente aos problemas técnicos. Dados foram publicados em 1985 de uma estação geradora central fotovoltaica de 1 MW construída na Califórnia. O trabalho mostrou que estas plantas eram boas soluções para momentos de pico de energia com grande número de cargas no verão. Além disso, os custos baixos de operação e manutenção e a falta de uso de água levavam à conclusão de que as barreiras para a energia solar fotovoltaica eram inteiramente econômicas e não técnicas. Outro artigo segue esta opinião, indicando que a diminuição dos preços dos módulos fotovoltaicos seria a chave para que se aumentasse realmente o uso desta tecnologia.

Não obstante esta excelente revisão histórico-bibliográfica das décadas de 1970 e 1980 feita por Jewell e Ramakumar, é Swanson [172] quem dá ainda mais pistas sobre a evolução das células fotovoltaicas desde os anos 1970. Richard M. Swanson é o fundador da empresa de produção de células fotovoltaicas *SunPower*. E é a ele atribuída aquela que ficou conhecida como lei de Swanson, que diz que “os preços dos módulos reduzem 20% para cada duplicação do volume de produção acumulado”. Um gráfico mostrando esta lei pode ser visto na Figura 2.2. Neste artigo, Swanson explica essa tendência, discorre sobre os motivos históricos que fizeram isso ocorrer e dá algumas possíveis previsões a partir do estado da arte da tecnologia fotovoltaica no ano da publicação (2006).

Figura 2.2 – Gráfico do preço (dólares de 2002) dos módulos sobre o comportamento da curva de experiência (*experience curve*), posteriormente conhecida como lei de Swanson.



Fonte: Adaptado de [172].

Para o autor, o nascimento da indústria fotovoltaica ocorre nos anos 1970, momento em que as células custavam muito caro, como já foi discutido aqui, e que duas forças fizeram com que a lei de Swanson fosse válida: o desenvolvimento tecnológico e os incentivos governamentais. O primeiro fator não era suficiente, porque o preço inicial extremamente alto

não levaria a uma produção em massa para alcançar um volume acumulado para que os preços pudessem cair como exige a lei de Swanson. Somente com ações do governo é que tudo decorreu conforme esta lei. Ainda mais, a percepção de que as células fotovoltaicas teriam maiores vantagens se fossem gerações conectadas à rede de distribuição, próximas das cargas, e não em grandes parques centralizados de produção, que seriam muito caros, foi essencial neste processo inicial de desenvolvimento.

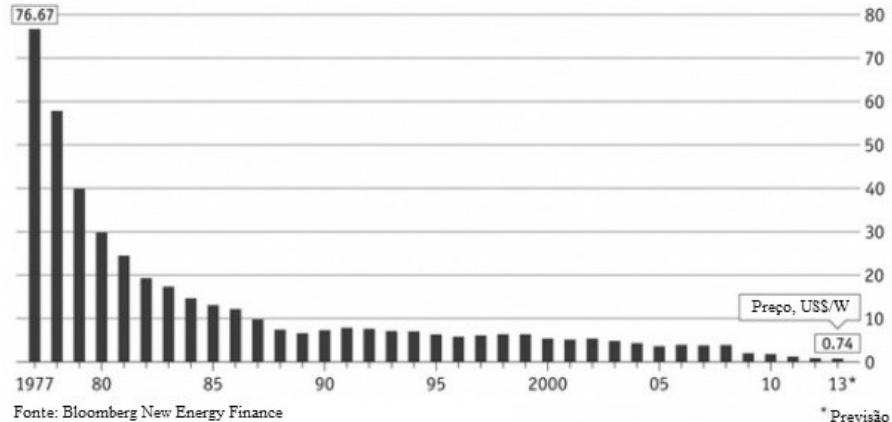
Tratando dos pontos que fizeram com que os módulos fotovoltaicos fossem produzidos em maior escala com a respectiva queda de preço, Swanson explica melhor a entrada do governo americano no progresso das células. Falando das células de silício cristalino especificamente, que ocupavam 91% de todos os módulos em 2006, o autor conta que o Departamento de Energia (*Department of Energy - DOE*) dos Estados Unidos financiou o Laboratório de Propulsão a Jato (*Jet Propulsion Laboratory - JPL*), centro tecnológico da agência aeroespacial do governo estadunidense, a *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, para administrar um projeto chamado *Flat-Plate Solar Array (FSA)* entre 1975 e 1985. Este programa tinha como grande objetivo do governo estadunidense o maior desenvolvimento da tecnologia das células fotovoltaicas, assim como a diminuição de seus custos. Ainda de acordo com Swanson, este projeto foi de grande sucesso, tanto que “a tecnologia embutida nos módulos fotovoltaicos atuais vem em grande parte do programa FSA”.

Ele ainda relata alguns dados interessantes sobre a evolução tecnológica das células fotovoltaicas com a respectiva queda de custos. A partir dos anos 1980, passou-se à produção das células em grades de metal impressas em tela, que eram em grades de metal evaporado desde as aplicações espaciais. Entre outros valores, ele cita o tamanho das células e a espessura dos *wafers* que passaram de 75 mm e 500 μm em 1979 para 150 mm e 300 μm nos anos 2000, respectivamente, o que torna os módulos mais baratos e eficientes.

Esta evolução da energia solar fotovoltaica a partir dos anos 1970 pode ficar ainda mais evidente com a observação de dados de preços e de eficiências das células ao longo do tempo, conforme mostram os gráficos das Figuras 2.3 e 2.4, respectivamente. O gráfico da Figura 2.3 é retirado de um artigo [36] de 2012 da *The Economist*, pelo qual o termo “lei de Swanson” originou, e mostra a queda nos preços das células fotovoltaicas de silício cristalino em termos de dólares por watt, em dólares de 2012, de 1977 até 2012 e uma previsão de 2013. Já os gráficos da Figura 2.4 são da *National Renewable Energy Laboratories (NREL)* e mostram a evolução na eficiência de conversão de várias células fotovoltaicas pesquisadas desde 1976 até 2018. São notáveis as variedades de células e como suas respectivas eficiências aumentaram ao longo dos anos. Fica claro o progresso rápido a partir do fim da década de 1970 e início dos anos 1980.

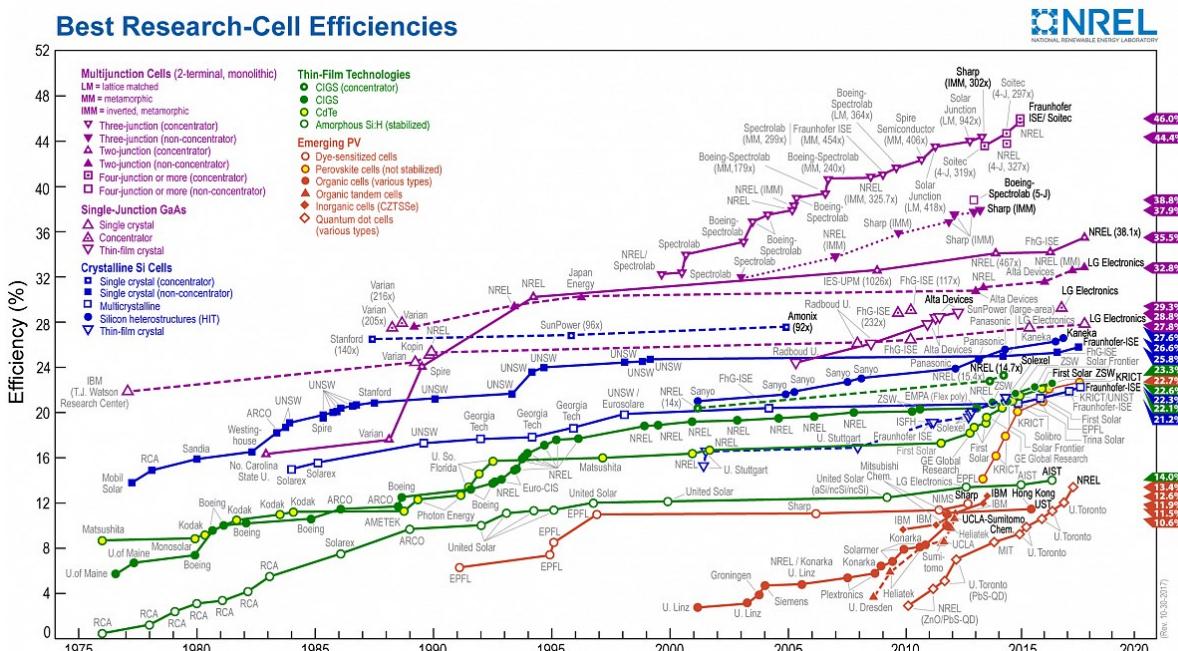
Como se vê, a situação da energia solar fotovoltaica tornou-se muito positiva após estes vários acontecimentos e, finalmente, as indústrias valorizaram esta tecnologia. Agora elas pareciam dar lucros e então começaram a ser produzidas em massa. Com maior investimento, a pesquisa pôde saltar imensamente e, com isso, o preço das células fotovoltaicas começou a declinar de forma acentuada, assim como a eficiência delas passou a crescer rapidamente, abrindo as portas para que a Geração Distribuída se tornasse uma realidade novamente na vida das pessoas como era no início da Eletrificação.

Figura 2.3 – “Lei de Swanson”: Queda do preço das células fotovoltaicas de silício cristalino entre 1977 e 2012 (com previsão de 2013) em preço dado por dólar por watt (dólar de 2012).



Fonte: Adaptado de [56].

Figura 2.4 – Melhores eficiências de conversão de diversas células fotovoltaicas pesquisadas entre 1976 e 2018.



A Geração Distribuída não é tanto uma solução tecnológica, mas muito mais uma solução econômica e política. Os aparatos determinantes do ressurgimento deste método de se produzir energia elétrica, as células a combustível e a energia solar fotovoltaica, existiam ao menos como ideias desde 1839 e aqueles que são os seus primórdios, os pequenos geradores a combustível fóssil, a cogeração e as pequenas hidroelétricas, existem em plenitude prática desde o início da Eletrificação e do sistema elétrico nos anos 1880. Todavia, o conceito ficou no esquecimento durante décadas até que as crises do petróleo da década de 1970 trouxeram de volta sua aplicação. Mais ainda, como exemplo, nos Estados Unidos uma lei para proteger o país da insegurança energética, o PURPA de 1978, colocou de vez a Geração Distribuída como possibilidade de aplicação e não como mero auxílio para os problemas iminentes do

desequilíbrio entre a falta de energia elétrica produzida com o aumento de seu consumo. De diversas maneiras, o mesmo ocorreu em vários outros países pelo mundo.

As tecnologias que trouxeram de volta a Geração Distribuída progrediram a partir de investimentos feitos para a corrida espacial da Guerra Fria, que teve início na década de 1950, em aplicações para satélites e foguetes, produzindo eletricidade a milhares de quilômetros distantes das redes de distribuição e dos consumidores locais terrestres no espaço sideral e dando abertura para aplicações comerciais. As células a combustível, que até os anos 1950 não passavam de grande curiosidade científica e que avançavam a passos assaz lentos nas mãos de pesquisadores independentes dedicados sem auxílios, foram a tecnologia “pioneira” que começou estas mudanças de localização, tamanho e fonte da geração de energia elétrica, tão inflexível desde o início do século XX. Na virada da década de 1960 para a de 1970, logo depois que elas passaram a servir às missões espaciais e percebeu-se sua capacidade comercial na produção de energia elétrica, estudos e experimentos foram feitos sobre sua inserção na rede de distribuição e no uso residencial, com as primeiras aparições da expressão “Geração Distribuída” e variações suas.

Também as células fotovoltaicas, que viram nascer suas primeiras aplicações práticas e comerciais nas missões espaciais nos anos 1950, foram muito importantes no renascimento da Geração Distribuída. Em 1958, lança-se o primeiro satélite a usar energia solar fotovoltaica e a tecnologia tem seu primeiro grande avanço prático depois de tantos anos de existência. Porém, é somente na década de 1970 que ela se torna plausível como Geração Distribuída. As crises do petróleo, a consequente atuação dos governos e, em seguida, a apropriação do mercado parecem ter papel fundamental nisso. Em 1973, como já se viu, a OPEP fez o embargo do petróleo, colocando países do mundo inteiro em desespero quanto à segurança energética. Coincidemente, um ano depois, a primeira publicação sobre células fotovoltaicas ligadas ao sistema elétrico surge. Mais um ano e um projeto do governo estadunidense com objetivo final de melhorar a tecnologia das células fotovoltaicas, principalmente para uso terrestre, com diminuição dos custos é iniciado.

Alguns outros progressos neste sentido brotam de pouco em pouco nos anos seguintes, mas é depois de 1978, ano do PURPA e do início da segunda grande crise do petróleo daquela década em consequência da Revolução Iraniana, que há um verdadeiro *boom* de estudos, pesquisas, experimentos e aplicações reais da energia solar fotovoltaica como geração ligada à rede elétrica e diretamente às cargas. Então, o mercado se apossou deste bem no fim dos anos 1970, as indústrias passaram a se interessar por ele e o puseram em um processo de acelerado progresso. Apareceram diferentes células com eficiências que aumentaram rapidamente sob produções em massa que permitiram quedas ainda maiores de preços. Somente aí algumas pessoas puderam começar a usufruir desta tecnologia, com ela ingressando verdadeiramente no sistema de distribuição, nas casas, nos comércios e nas indústrias. A energia solar fotovoltaica acabou liderando avanços para outras tecnologias, pavimentando o caminho da Geração Distribuída.

Com estes enormes passos para a Geração Distribuída nos anos 1980, a situação já era extremamente favorável para que na década de 1990 e no novo milênio, este método fosse visto como uma das melhores soluções para o futuro da geração de energia elétrica e para o sistema elétrico como um todo. Entretanto, no fim da década de 1980 até o de 1990 o preço do petróleo caiu e voltou a pairar sobre patamares considerados baixos, como foi visto no

capítulo 1. Talvez isto explique a desaceleração nos estudos da Geração Distribuída que retornaram de vez no fim da década de 1990. Isto, no entanto, é difícil de ser afirmado, podendo existir outros fatores.

Por fim, porém, a tecnologia teve tantas pesquisas na virada da década de 1970 para 1980 que ela não podia ser mais parada. Apesar das adversidades, após um início fervoroso não foi mais possível deter a Geração Distribuída. Ela se consolidou e as discussões aumentaram e se espalharam desde então. Hoje ela não é mais vista como uma solução para crises, mas sim para todas as circunstâncias.

2.3 – Definições de Geração Distribuída

A expressão “Geração Distribuída” e suas variantes, como se viu, surgiram na década de 1970. Elas, contudo, não possuem uma definição aceita unanimemente. Há várias delas e nesta seção algumas serão vistas. Casos de normas e leis, de publicações de instituições técnicas e científicas, assim como de publicações e artigos científicos de diferentes autores e grupos são apresentados.

2.3.1 – Definições de Geração Distribuída em Publicações Institucionais e Governamentais

As instituições científicas e de engenharia dão definições diversas de Geração Distribuída. Igualmente o fazem leis governamentais e órgãos vinculados aos governos. Nesta seção são expostas algumas delas.

A Comissão Internacional de Eletrotécnica (*Commission Électrotechnique Internationale – IEC*) define Geração Distribuída em seu dicionário *online*, a *Electropedia* [102], conhecida também como *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) Online*, que reúne termos e definições das tecnologias relacionadas com a eletricidade e a eletrônica, igualmente publicados nas séries IEC 60050. As línguas oficiais da IEC são o inglês e o francês, mas a ferramenta traz a terminologia também em português, obviamente com a mesma definição. Em inglês, o nome é “*Distributed Generation*”, que equivale à tradução direta do termo Geração Distribuída e que é equivalente aos sinônimos “*Embedded Generation*” e “*Dispersed Generation*”; em francês, o termo é “*Production Décentralisée*” e, em português, é aceito como sinônimo de Geração Distribuída a expressão “Produção Descentralizada”. Em qualquer um dos casos, a definição é a seguinte: “Geração Distribuída é a geração (ou produção) de energia elétrica por múltiplas fontes que estão conectadas ao sistema de distribuição de energia elétrica”.

O Conselho Internacional em Grandes Sistemas Elétricos (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques – CIGRÉ*), organização internacional de estudos em alta tensão sediada em Paris, na França, publicou em 1999 um relatório [42] resumindo discussões e resultados de um grupo de trabalho (*Working Group 37.23*) sobre os impactos do aumento da Geração Distribuída no sistema elétrico. Este trabalho usava o termo “geração dispersa” e esta é definida como geração que não é centralmente planejada, que não era (1999) centralmente

despachada, que é usualmente conectada na rede de distribuição e que é menor que 50-100 MW.

O instituto estadunidense IEEE também dá uma definição para Geração Distribuída em sua norma IEEE 1547 [103], que versa sobre a interconexão de recursos distribuídos no sistema elétrico. A definição é um pouco mais complexa que as outras já apresentadas porque envolve outras definições. Entretanto, ela pode ser assim dada: Geração Distribuída são unidades de geração de eletricidade conectadas em arranjos que entregam energia elétrica à carga (sistema elétrico de energia) que servem, por sua vez, instalações contidas inteiramente em uma única premissa ou em um grupo de premissas (sistema elétrico de energia local) de um ponto conectando ambas estas instalações (ponto de conexão comum). Ela é um subconjunto de recursos distribuídos, que, por seu turno, são fontes de energia elétrica que não estão diretamente conectadas ao sistema de transmissão em massa de energia elétrica, incluindo tanto geradores quanto tecnologias de armazenamento de energia.

Em um texto [99] publicado em 2002 pela Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*), órgão ligado à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), é definido o termo Geração Distribuída e há distinções com outras expressões. Nele, Geração Distribuída é a geração que serve ao lado do consumidor ou dá suporte à rede de distribuição, conectada à rede elétrica em tensões de nível da distribuição. As tecnologias incluem geralmente pequenas (e micro) turbinas, células a combustível e sistemas fotovoltaicos. A energia eólica é excluída, visto que a maioria é produzida em fazendas eólicas e não fornecem energia localmente. A geração dispersa não é sinônima de Geração Distribuída e inclui a eólica e outras gerações, mas além de abranger aquelas tecnologias ligadas à rede de distribuição, abrange também aquelas que são totalmente independentes da rede. A energia distribuída é a Geração Distribuída mais as tecnologias de armazenamento de energia. Os recursos energéticos distribuídos é a Geração Distribuída mais medidas do lado da demanda. Por fim, energia descentralizada é um sistema de recursos energéticos distribuídos ligados à rede de distribuição.

Em um guia para a conexão da Geração Distribuída no sistema elétrico [63], o *Energy Networks Association (ENA)*, um órgão que representa os operadores da rede de distribuição e transmissão de gás e eletricidade do Reino Unido e da Irlanda, o termo Geração Distribuída é definido e é outro caso interessante. Este é um exemplo de uma definição que indica as diferenças nacionais em particular. A Geração Distribuída, que é sinônimo de geração embutida, é aquela unidade geradora que está ligada ao sistema de distribuição e não no de transmissão. Em geral, são unidades menores, visto que as maiores são ligadas a este último sistema e dependem da máxima tensão do sistema de distribuição. No caso da Inglaterra e do País de Gales, este valor é de 132 kV ou menos, enquanto na Escócia é de 33 kV para baixo.

Já em termos de legislação governamental, o governo dos Estados Unidos, através da *Energy Policy Act* de 2005, define Geração Distribuída como “uma instalação de geração de energia elétrica que é designada para servir consumidores a varejo” (vendidas em pequenas quantidades ou venda direta ao consumidor final) “de eletricidade no ou próximo do local de instalação [175].”

Na Europa, por outro lado, a Diretiva 2009/72/EC do Parlamento e Conselho Europeus, que trata das regras comuns do mercado interno de eletricidade, define Geração Distribuída como “plantas de geração conectadas ao sistema de distribuição”, sendo que

distribuição é “o transporte de eletricidade em sistemas de distribuição de baixa, média ou alta tensão com vistas à entrega aos consumidores, mas que não inclui o suprimento [174].”

O governo brasileiro, assim como órgãos ligados a ele, também apresentam suas versões de definições da Geração Distribuída. O Decreto nº 5163 de 30 de julho de 2004, dá uma definição de Geração Distribuída em seu Artigo 14:

Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput [35].

A Resolução Normativa nº 687 de 24 de novembro de 2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [4], que altera a Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012 [3] que, por sua vez, “estabelece condições gerais para o acesso de microgeração distribuída e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”, também dá uma definição para Geração Distribuída, fazendo distinção entre o porte dos geradores. Ela define da seguinte maneira o termo em seu Artigo 2º:

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras [4].

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da ANEEL no seu Módulo 1 [5] define Geração Distribuída, que tem o mesmo significado que geração embutida, como sendo “Centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo ONS.” A distinção por porte dos geradores é feito de forma idêntica à Resolução Normativa nº 687 em micro e minigeração distribuídas, visto que estas legislações estão diretamente vinculadas.

Por último, ainda sobre o Brasil, em um estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), uma empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia, a definição de Geração Distribuída adotada é a seguinte:

Geração de energia localizada próxima ao consumidor final, cuja instalação objetiva atendimento prioritário a este, podendo ou não gerar excedentes energéticos comercializáveis para além das instalações do consumidor final. A partir dessa definição, parâmetros como porte da unidade geradora, fonte energética utilizada, grau de impacto ambiental e classificação regulatória, entre outros, não são considerados elementos restritivos para enquadramento ou não de uma instalação geradora de energia. Dentro deste conceito, outro aspecto a destacar é que se considera a geração de energia como um todo, abrangendo eletricidade e outros energéticos. Adotamos aqui uma classificação por porte (grande porte e o agrupamento de médio/pequeno porte), de modo a tratar empreendimentos com lógica similar do ponto de vista do investimento, modo de operação e barreiras à implementação: enquanto as unidades de grande porte estão associadas forte e normalmente à lógica industrial, a geração distribuída de menor porte apresenta uma lógica mais vinculada à realidade de residências e do setor comercial [66].

2.3.2 – Definições de Geração Distribuída em Publicações Científicas

As definições de Geração Distribuída para alguns autores e grupos científicos também têm uma grande variedade. Como são inúmeros, aqueles aqui expostos passaram por crivo subjetivo do autor deste trabalho. Não obstante, esta escolha não foi feita aleatoriamente. As opções foram determinadas principalmente pelo número de citações, mas também foram pelo conhecimento informal que o autor tem da popularidade dos textos no meio acadêmico. De qualquer modo, o objetivo final não é tanto trazer os trabalhos que têm a maior importância para a comunidade científica, até porque isto é relativo ao longo do tempo, mas sim colher definições diferentes e mostrar esta diversidade sobre a expressão aqui tratada.

Para Dugan et al., no livro *Electrical Power System Quality* [55], “Geração Distribuída é a geração de energia elétrica que está dispersa por todo o sistema elétrico em oposição às grandes usinas e estações centrais de produção de energia elétrica”. Os autores ainda expressam que no contexto usado no livro, a Geração Distribuída é aquela que exclusivamente possui uma potência menor que 10 MW e que está ligada ao sistema de distribuição e não no de transmissão. Na visão deles, a Geração Distribuída usa geradores de menor porte que aqueles das estações centrais típicas, sendo distribuídas ao longo de todo o sistema elétrico próximo às cargas. Ainda mais, dizer que os geradores tem menor porte pode levar à consideração de vários valores de potência, mas pelo fato de o livro tratar substancialmente da qualidade da energia no sistema de distribuição, os 10 MW seriam justificados, pois geradores de valores maiores de potência estariam ligados à rede de transmissão.

Em artigos [53, 54] no qual um dos autores ainda é R. C. Dugan, a Geração Distribuída é definida como aqueles geradores instalados pelas próprias concessionárias ou pelo consumidor final na rede de distribuição de energia elétrica e que tipicamente não passam de 1 ou 2 MW. Até 10 MW ainda poderia ser instalado na rede de distribuição, mas valores acima deste estariam na rede de transmissão e seriam mais prováveis de estar nas mãos de produtores de energia elétrica comerciais.

Para Patel, no livro *Wind and Solar Power Systems* [153], a geração de energia distribuída é oposta àquela da geração em um sistema clássico. Segundo este autor, neste último caso, “a energia flui de uma estação centralizada de produção de energia elétrica

passando por linhas de transmissão e depois de distribuição com vários transformadores abaixadores no caminho”. A geração de energia distribuída, incluindo fazendas fotovoltaicas e eólicas, por sua vez, tem sua localização distribuída ao longo de todo o sistema elétrico, podendo estar ligada: em uma subestação de interface da rede com um ponto local, em qualquer ponto da linha de transmissão regional ou ainda nas proximidades de um centro de carga.

Para Bollen e Hassan, no livro *Integration of Distributed Generation in the Power System* [24], além da geração dentro da rede de distribuição, são incorporadas as fontes renováveis de grande porte na definição. Para eles, “a Geração Distribuída se refere às unidades de produção conectadas ao sistema de distribuição, assim como grandes unidades de produção baseadas em fontes de energia renovável”.

Para Jenkins et al., no livro *Distributed Generation* [109], a expressão Geração Distribuída, sinônima e intercambiável com “geração embutida” e “geração dispersa”, sendo que estes dois estão em desuso, é puramente a geração ligada à rede de distribuição. Há distinções específicas em relação a cada país e suas normas técnicas devido ao porte dos geradores e à tensão que estão ligados. Porém, de forma indistinta, a Geração Distribuída é aquela que está ligada ao sistema de distribuição e que, por isso, normalmente são de potência menor, pois as tensões deste lado da rede são menores. Todavia, há também grandes instalações de centenas de MW ligadas a tensões altas disponíveis na distribuição.

Para Barker e de Mello [9], Geração Distribuída é aquela geração de energia elétrica que é de, aproximadamente, 10 MW de potência ou menos e que está interconectada em subestações, alimentadores de distribuição ou nos níveis das cargas e consumidores. Incluem-se nesta categoria as seguintes tecnologias de produção de energia elétrica: fotovoltaico, turbinas eólicas, células a combustível, pequeno e micro pacotes de turbinas, geradores baseados em máquinas Stirling e máquinas geradoras de combustão interna.

Para um grupo de estudos interdisciplinar sobre energia da universidade americana *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), a Iniciativa sobre Energia do MIT (*MIT Energy Initiative - MITEI*), em um relatório intitulado *The Future of the Electric Grid* [141], a Geração Distribuída é definida como:

Os geradores relativamente pequenos que produzem vários kW até dezenas de MW de energia elétrica e que estão geralmente conectados à rede nos níveis de distribuição ou de subestações. As unidades de Geração Distribuída usam várias tecnologias diferentes de geração incluindo turbinas a gás, máquinas a diesel, solar fotovoltaico, turbinas eólicas, células a combustível, biomassa e pequenos geradores hidroelétricos. Aquelas unidades que usam máquinas de queima de combustíveis convencionais são designadas para operar como cogeração que são capazes de prover calor para edifícios e indústrias usando a energia ‘residual’ da geração de eletricidade [141].

A Geração Distribuída, em termos de propriedade e operação, pode ser tanto das concessionárias como dos próprios consumidores. O MITEI distingue Geração Distribuída de geração dispersa. Para eles, esta última é aquela geração de energia elétrica que não está conectada à rede elétrica, tais como geradores a diesel emergenciais.

O Grupo de Trabalho III do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*), que trata da mitigação das mudanças

climáticas, no capítulo 7 em seu Quinto Relatório de Avaliação de 2014 [106] dá também sua contribuição na definição de Geração Distribuída. Para este trabalho, Geração Distribuída é aquela onde “pequenas unidades geradoras (tipicamente tecnologias renováveis, cogeração e células a combustível) são conectadas diretamente ao sistema de distribuição de eletricidade e próximo das cargas”.

Uma das talvez mais citadas (aproximadamente 2450 vezes de acordo com a ferramenta Google Acadêmico® em busca de Abril de 2018) e aceitas definições de Geração Distribuída se deve a Ackermann et al. [1] e, assim, sua análise deve ser um pouco mais extensa que as anteriores. Neste artigo de 2001 é feita uma longa discussão acerca da definição. De fato, ele apresenta uma não só longa, mas também bem elaborada e detalhada discussão. Em primeiro lugar, afirma-se que a Geração Distribuída, qualquer que fosse o nome dado, seria de suma importância futuramente no sistema elétrico. Então, em segundo lugar, os autores decorrem sobre as expressões sinônimas usadas em cada região do mundo e algumas definições em termos de capacidade de produção na literatura especializada e em diferentes regulamentos governamentais.

Para darem uma definição precisa, os autores levam em conta os seguintes aspectos: o propósito, a localização, a capacidade de geração, a área de entrega de energia elétrica, a tecnologia empregada, o impacto ambiental, o modo de operação, o proprietário e a penetração da geração. Cada um destes pontos é discutido minuciosamente.

Resumidamente, eles acreditam que é consenso que o objetivo ou propósito da Geração Distribuída é que obrigatoriamente ela seja uma fonte de potência ativa, mas não necessariamente de potência reativa. Já em termos de localização, os autores afirmam que este é o ponto mais relevante na definição e que é ela quem dá precisamente o conceito de Geração Distribuída. Desta forma, a Geração Distribuída é definida como aquela em que “a instalação e operação das unidades de geração de energia elétrica estão conectadas diretamente na rede de distribuição ou conectadas à rede pelo lado da medição do consumidor”.

O que justifica esta definição é que deve ser excluída a transmissão porque unidades geradoras ligadas a esta rede são feitas tradicionalmente pela indústria. A Geração Distribuída, por sua vez, tem como objetivo estar próxima da carga. A distinção entre o sistema de distribuição e transmissão é dada para que fique ainda mais clara a definição. A diferença entre os dois sistemas não está sobre o nível de tensão de operação de cada um, porque podem existir casos distintos internacionalmente e ainda internamente, onde empresas de transmissão ou distribuição podem possuir uma gama variada de linhas com tensões diferentes. Assim, em um contexto de regulamentações de mercados competitivos de eletricidade, devem ser usadas definições legais para os sistemas, para haver uma distinção clara entre os dois.

Dois exemplos trazem à tona um questionamento acerca desta definição e a capacidade das unidades geradoras. Para os autores, algo como uma cogeração dentro de uma grande indústria ligada ao sistema de transmissão pode ser considerada Geração Distribuída, enquanto uma fazenda eólica de tamanho médio ligada diretamente à rede de transmissão não pode. Sendo assim, na definição dos autores, o tamanho da Geração Distribuída não é relevante, por dois motivos: isto não é crítico para o que é Geração Distribuída e a potência máxima a ser ligada à distribuição depende da capacidade máxima deste sistema, o que pode ter ligação com o nível de tensão, que varia de local para local. Apesar disso, os autores dizem

que distinções em categorias sobre a capacidade de geração podem ser usadas, mas sem que estas afetem a própria definição.

Considerando todos os outros aspectos, ou seja, a área de entrega de energia elétrica, a tecnologia empregada, o impacto ambiental, o modo de operação, o proprietário e a penetração da geração, todas não são relevantes para a definição dada de Geração Distribuída para Ackermann et al.. Para cada uma são apresentadas dificuldades para serem excluídas da definição proposta.

Por fim, a definição de Ackermann et al. é: “Geração Distribuída é a fonte de energia elétrica conectada diretamente à rede de distribuição ou no lado da medição do consumidor.” Sendo que a distinção entre distribuição e transmissão é feita por acepções legais.

Em outro artigo bastante citado (aproximadamente 1350 vezes de acordo com a ferramenta Google Acadêmico® em busca de Abril de 2018), devido a Pepermans et al. [156], a definição é favorável à de Ackermann et al., mas assim como seu predecessor, eles dizem que não há consenso sobre qual é a melhor das definições, particularmente porque a Geração Distribuída envolve muitas tecnologias e aplicações diferentes. De forma genérica, porém, ela é simplesmente aquela de pequena magnitude de potência produzida. Outros aspectos dependem da situação de análise e podem ser incluídas em uma definição. De qualquer maneira, para eles, a Geração Distribuída tem como motivações principais de seu retorno recente ao sistema elétrico a liberalização do mercado de energia e as preocupações ambientais.

Em um último artigo analisado aqui, devido a El-Khattam e Salama [60], a Geração Distribuída é discutida principalmente acerca de tipos e tecnologias, mas também de classificações dadas pelos próprios autores. Novamente a definição discorrida é a de Ackermann et al., mas eles ainda dizem que o conceito de Geração Distribuída “depende da instalação e operação de um portfolio de unidades geradoras de energia elétrica de pequeno porte, compactas e limpas na ou perto de uma carga (consumidor)”. E que, ainda mais, “os conceitos de Geração Distribuída podem incluir suas definições, tecnologias, aplicações, tamanhos, localização, suas limitações práticas e de operação e seus impactos na operação do sistema e nos dispositivos de proteção existentes”.

2.4 – O que é Geração Distribuída?

Afinal, o que é Geração Distribuída? Após serem comparadas outras expressões similares, ser feita uma interpretação histórica das origens do termo “Geração Distribuída” e também uma ampla revisão de definições na literatura, é preciso responder a essa questão. Além disso, é necessário determinar quais fontes de energia fazem parte deste grupo de acordo com a definição dada.

2.4.1 – Uma Definição para Geração Distribuída

Para responder à pergunta sobre o que é Geração Distribuída, é importante uma análise da expressão nas duas palavras que a compõem separadamente, porque, em muitos casos, o

problema é de mera interpretação. A palavra “geração” não possui tantas ambiguidades, pois existe um consenso implícito de que, como declaram Ackermann et al. em [1], a Geração Distribuída tem como objetivo capital a produção de potência ativa. Assim, “geração” equivale à produção de energia ou potência elétrica ativa, conceito amplamente reconhecido na engenharia elétrica como a potência elétrica que é absorvida pelas cargas para realização de trabalho útil, ou seja, para transformação da energia elétrica em outras formas de energia. Esta explicação é a aceita aqui. Apesar disso, não se descartam outros propósitos que as tecnologias de Geração Distribuída possam ter, tais como fornecimento de potência reativa, correção do fator de potência, elevação de tensão, etc. De qualquer forma, em essência, a Geração Distribuída tem como finalidade fundamental prover potência ativa.

O adjetivo “distribuída”, por seu turno, depende intensamente de sua acepção e é a ele que cabe a maior parte das confusões. Este vocábulo tem muitos significados e esta diversidade recai sobre a expressão. Por um lado, dentro da engenharia elétrica, chama-se distribuição de energia elétrica a parte do sistema elétrico em que a eletricidade é entregue diretamente aos consumidores individuais. Logo, a primeira interpretação é que Geração Distribuída denota a geração que faz parte da área da distribuição. Este caso usa um dos significados derivados do verbo “distribuir”, verbo este que leva à formação do adjetivo “distribuída”, que é o mesmo que “entregar” ou “dar”. No entanto, este mesmo verbo tem ainda outros significados. Ele ainda pode ter o mesmo sentido de “repartir” ou “dividir”. A compreensão, assim, é que a Geração Distribuída é aquela geração de energia elétrica que é repartida ou dividida e, desta maneira, não é concentrada nem nas mãos de poucos indivíduos e nem está reunida em poucas fontes primárias. A Geração Distribuída, como é oposição a estes delineamentos, pode ser entendida como a geração de energia elétrica cujos proprietários são individuais e muitos ou que é divida em várias fontes primárias. Há outro lado, em que pode ser compreendido que a geração, ou melhor dizendo neste caso, os geradores estão espalhados ou disseminados (estes também são outros significados de “distribuída”) em vários lugares e não centralizados em uma mesma localização, mas com disposição espacial diversa. O primeiro problema da definição, portanto, é semântico.

O que se nota é que Geração Distribuída, seja qual for a significação atribuída, está sempre em oposição a pelo menos alguma das características da geração que aqui se pode chamar de “geração tradicional”. Ou seja, aquela geração de energia elétrica consolidada desde o início do século XX pela qual a energia elétrica é produzida em locais rígidos, concentrados e distantes dos centros povoados em larga escala para ser transmitida em linhas de grande extensão usando constantemente três fontes primárias, sendo elas combustíveis fósseis, grandes hidroelétricas e energia nuclear, e cujo sistema gerador é propriedade de um número reduzido de grupos e empresas.

Em relação às definições de Geração Distribuída encontradas na literatura, as características que são comuns à maioria delas são as quatro seguintes: geração dentro do sistema de distribuição; geração próxima da carga ou consumo; geração dentro do local ou do lado de medição do consumidor e geração de pequeno porte. Com a definição deste trabalho apresentada a seguir, há uma conciliação entre aquelas discutidas anteriormente. Ela não faz uso de uma característica exclusiva entre estas quatro, mas ao mesmo tempo consegue englobar todas elas.

Neste texto, Geração Distribuída é definida pela sua localização, não tanto em relação às áreas de divisão do sistema elétrico, mas geográfica e física. Aproveitando-se dos diferentes significados do adjetivo “distribuída”, a Geração Distribuída aqui é considerada aquela que está espalhada por todo o sistema elétrico, que é facilmente erigida em vários pontos geográficos e físicos diferentes, não importando se estão exatamente no sistema de distribuição, de transmissão ou no próprio ou próximo do consumo, nem fazendo distinção do porte, e que leva em conta a multiplicidade de proprietários individuais e de fontes primárias.

As mais parecidas das definições apresentadas com esta é aquela de Dugan et al. no livro *Electrical Power System Quality* [55] e aquela de Patel no livro *Wind and Solar Power Systems* [153], sem levar em consideração que obrigatoriamente a geração está na rede de distribuição ou que ela tenha uma certa capacidade máxima. A definição de Bollen e Hassan no livro *Integration of Distributed Generation in the Power System* [24] está incluída aqui, como ficará mais claro à frente no texto. A definição de Ackermann et al. também está absolutamente dentro da definição dada aqui.

O que deve ser levado em conta é que as tecnologias contidas na definição de Geração Distribuída deste texto são aquelas que têm uma maior flexibilidade quanto à localização geográfica e física, podendo ser instaladas mais facilmente em uma heterogeneidade de lugares que as usinas “tradicionais” antes usadas amplamente não podem. Assim, a geração pode estar no centro urbano ou nos subúrbios, em meios rurais ou em desertos, nos oceanos ou em telhados.

Esta definição está categoricamente em contraposição à “geração tradicional”. As usinas centralizadas classicamente consideradas precisam de locais bastante intransigentes para serem instaladas pelas suas necessidades intrínsecas, além de necessitarem de enormes esforços para serem erguidas.

As grandes hidroelétricas precisam de enormes vazões de água. Sendo assim, dependem estritamente da geografia que a natureza oferece, quando se trata do tipo fio d’água, ou de uma bacia hidrográfica favorável, mas que precisa de um amplo alagamento para construção de reservatórios com barreiras de grande porte. Além disso, licenças ambientais mais rigorosas restringem ainda mais as zonas possíveis de construção. Em qualquer uma destas situações, é sempre feito um grande investimento financeiro e de engenharia civil, mecânica e elétrica para as obras acontecerem.

As grandes usinas termelétricas a combustíveis fósseis precisam ser de larga capacidade para funcionar em alta eficiência e, além disso, precisam estar próximas de locais com grande quantidade de água para facilitar sua obtenção para a produção de vapor e também para o resfriamento. Portanto, precisam estar muitas vezes próximas a rios ou a mares. Também são construídas usando uma logística que permita fácil acesso aos combustíveis por transporte. Ou seja, muitas vezes ficam próximas de onde se extrai essa matéria-prima para produzir a energia. A poluição atmosférica é outro ponto que leva estas usinas a serem edificadas em lugares apropriados, longe de onde vivem as pessoas.

Depois dos acidentes nucleares, com a pressão popular e tentando evitar riscos, as usinas nucleares passaram a ser construídas afastadas das cidades. Pelo mesmo motivo em relação à eficácia das termelétricas, as nucleares na maioria das vezes são de grande escala.

Também precisam estar próximas de fontes amplas de água para serem usadas em sua operação. Tudo isso fora o enorme dispêndio que deve ser feito para sua edificação.

Concomitantemente, esta definição leva invariavelmente às quatro características apontadas das definições mais corriqueiras. Com a definição de Geração Distribuída empregada aqui, as tecnologias serão na maior parte das vezes de pequeno porte, porque estas podem ser construídas com uma dependência muito menor de sua localização física e geográfica, além de exigirem recursos menos elaborados. Geradores de menor porte com certeza podem ser espalhados por um número muito maior de lugares.

Ainda sob esta definição, como é mais brando onde os geradores serão instalados, eles podem estar dentro da rede de distribuição e, particularmente, próximo do consumidor e ainda dentro do próprio local de consumo. Em relação a estes dois últimos pontos, os consumidores podem estar em qualquer local, não necessariamente dentro do sistema de distribuição. Não há fortes restrições como as encontradas para os “geradores tradicionais”, que ficavam estritamente em um sentido de fluxo de potência da geração para a transmissão, que ia para a distribuição e finalmente chegava ao usuário derradeiro, sendo que as linhas acabam sendo quilométricas. Na definição de Geração Distribuída dada aqui, os geradores podem estar em qualquer um destes pontos.

Os motivos para se escolher esta definição são vários. Em primeiro lugar, como se viu, ela tenta conciliar as diferentes definições encontradas nas publicações, assim como conglomera as quatro características aparentemente fundamentais. É importante notar também que estas características são relativas e uma definição como esta aqui empregada releva este empecilho. Estas imprecisões podem ser entendidas nos seguintes casos. Para um autor ou organização, pequeno porte significa certa quantidade de potência máxima, para outro pode ser um valor muito maior ou menor. A demarcação da distribuição pode mudar legalmente em cada região, podendo levar em conta os níveis de tensão ou outro atributo. Já sobre a adjacência, o que exatamente significa estar próximo do consumidor? Qual é a distância mínima para que isso ocorra? Geralmente não são encontradas respostas para estas perguntas, mesmo para aqueles que assim definem Geração Distribuída. A única das características que não traz ambiguidade é aquela na qual a geração está dentro do próprio consumidor ou do seu lado de medição. Porém, como normalmente outros casos além desses fazem parte da Geração Distribuída, ela não pode ser adotada com exclusividade.

Em segundo lugar, a definição de Geração Distribuída aqui empregada denota uma oposição à “geração tradicional”, como se explicou. Mas há ainda outras razões que justificam esta adoção.

Ela não depende de fronteiras ou legislações, pois não está vinculada a outras definições específicas de cada região, país ou norma, como é o caso da diferenciação entre o sistema de distribuição e o de transmissão. Os locais com suas próprias leis poderão tratar das tecnologias em si e não das divergências legais somente porque as tensões são diferentes ou ocasiões do tipo. O caso da ENA [63] apresentado anteriormente é exemplar aqui. Países que são vizinhos têm seus sistemas de distribuição diferenciados entre si pelo nível de tensão. Isto quer dizer que se existissem usinas idênticas em dois países com esta distinção, em um ela será Geração Distribuída, mas no outro não. Outro ponto neste sentido é que se em cada região houver uma definição de Geração Distribuída própria, então a transferência tecnológica será dificultada.

Outra questão: mesmo que a Geração Distribuída esteja na rede de distribuição, há efeitos na de transmissão. Ainda mais, uma tecnologia de geração na distribuição ou na transmissão terá poucas diferenças significativas. Quem nota isso são Bollen e Hassan no livro supracitado. Nas palavras deles, um ponto importante de se notar é que a Geração Distribuída ligada ao sistema de distribuição ainda afeta o sistema de transmissão, sendo as mudanças nos fluxos de potência e o consequente menor fluxo nos transformadores da rede de transmissão algumas das consequências. Outro ponto é que grandes usinas eólicas ou fotovoltaicas, por exemplo, impactam a operação do sistema de transmissão de forma parecida com o que estas mesmas fontes fazem no sistema de distribuição [24]. Portanto, a indiferença da definição dada quanto à geração estar na rede de distribuição ou na de transmissão é positiva. Ainda mais, a Geração Distribuída definida aqui de qualquer forma diminui o carregamento das linhas de transmissão, como pretendiam aqueles que iniciaram a discussão sobre o tema nos anos 1970.

Tratando-se da quantidade de energia que é gerada, uma rigidez não traz tantos benefícios na definição. De fato, se a capacidade de produção de uma tecnologia é diferenciada por certo valor, por menor ou maior que seja, o método em si muda? A resposta é firmemente não. A tecnologia de uma fazenda eólica ou solar fotovoltaica, por exemplo, de grande porte pode ter diferenças técnicas muito pequenas (muitas vezes são diferenciadas somente em termos de valores de potência) com uma usina de uma dessas mesmas duas fontes, mas de menor escala. Normalmente, a Geração Distribuída como definida aqui será de pequeno porte como já se disse antes, mas expressar um tamanho máximo não é um fator crítico. A definição adotada aqui permite qualquer capacidade de geração.

Aqui podem ocorrer questionamentos acerca das grandes hidroelétricas e das pequenas hidroelétricas. A primeira não faz parte da Geração Distribuída como se falou, mas a segunda sim. O motivo, contudo, não está no porte, mas sim na definição proposta de facilidade de localização geográfica e física. Enquanto as primeiras precisam de rios com grandes volumes de água, fora os outros pontos problemáticos citados acima, as pequenas hidroelétricas podem ser instaladas com muito mais flexibilidade e em um número muito maior de lugares. Assim, apesar de serem diferenciadas entre si somente pela potência, elas acabam sendo também diferenciadas por serem ou não Geração Distribuída conforme este texto. Como as tecnologias e os métodos de produção são similares, é aconselhado os estudos sobre todas as técnicas das grandes hidroelétricas, até mesmo porque são praticamente as mesmas, para serem aplicadas nas devidas proporções às pequenas.

As tecnologias que compõem o grupo da Geração Distribuída aqui definida são muitas das vezes modulares. Ou seja, podem ser construídas e instaladas em tamanhos variados e esta capacidade não é fixa, podendo mudar ao longo do tempo para maior ou até mesmo menor porte. Assim, um investimento inicial pode ser pequeno. A construção pode começar com um número reduzido de geradores e ir aumentando ao longo do tempo. Ainda mais, depois de instalado um gerador em um lugar, um mesmo proprietário não se vê obrigado a construir outro nas vizinhanças do primeiro. Ele pode construir este outro distante do primeiro.

Finalmente, diferentemente das “usinas tradicionais”, as de grande capacidade que são Geração Distribuída, tais como fazendas eólicas e fotovoltaicas, apesar de também dependerem da localização geográfica para melhor desempenho, são muito mais autônomas. Mesmo que o local de instalação seja importante para usufruir do meio ambiente mais

favorável, ele pode simplesmente passar pelo crivo daqueles que estão a construindo. Placas solares fotovoltaicas ou turbinas eólicas, por exemplo, podem ser instaladas onde a insolação seja baixa ou os ventos de maior velocidade sejam raros. Nada impede isso.

Esta definição diminui a confusão com as expressões “geração dispersa” e “descentralizada”. Estas serão agora realmente sinônimos do termo, tendo exatamente o mesmo significado e podendo ser usadas quando se desejar uma variedade maior de palavras prezando a estética e o estilo de um texto.

É importante não dizer “unidades geradoras” quando se referir particularmente ao termo ou quando se aplicar ele. Isto se deve ao fato de que pode ser entendido que, por exemplo, uma única turbina seja a Geração Distribuída em um grande parque eólico, sendo que é este último que o é. A legislação sueca do início dos anos 2000, conforme citada por Ackermann et al. [1], traz este tipo de conflito. Ela indica que Geração Distribuída significa um único equipamento de produção de eletricidade, tal como uma única turbina eólica ou placa fotovoltaica. Portanto, para eles, parques eólico ou fotovoltaico seriam Geração Distribuída independente do tamanho ou de onde são ligados. O que é considerado na Geração Distribuída aqui é todo o conjunto decorrido e não um único equipamento.

Uma categorização também é aconselhada. Dependendo da aplicação, usar termos que definem a capacidade pode ser importante, tal como fazem as normas brasileiras da ANEEL. Características podem ser levadas em conta para outras categorias, tais como a diferenciação entre a fonte ser renovável ou não.

Termos adicionais podem ser usados quando especificarem outros equipamentos, aparelhos especiais e localização específica. É o caso de gerações que ficam totalmente fora do sistema elétrico. Estas podem ser chamadas de “geração isolada” como muitas vezes o são, sendo uma subcategoria de Geração Distribuída. De maneira parecida, a expressão “recursos energéticos distribuídos” pode ser definida como Geração Distribuída somada às tecnologias de armazenamento de energia.

2.4.2 - Fontes de Energia da Geração Distribuída por Definição

Por fim, fica a seguinte dúvida: quais fontes energéticas fazem parte do grupo de Geração Distribuída de acordo com a definição empregada? Esta definição junta um grande conjunto de tecnologias e, como foi dito, isto é próprio dela e do significado da expressão devido às distintas fontes. Todavia, é imprescindível que cada uma seja estudada de forma particular, pois elas apresentam características muito peculiares. Mesmo assim, simultaneamente esta definição inclui propriedades partilhadas entre as tecnologias. A seguir são apresentadas certas tecnologias de geração de energia elétrica e são discutidas se são ou não Geração Distribuída de acordo com a definição proposta. Grande parte das informações acerca da maioria dessas tecnologias pode ser encontrada em [33]. Detalhes técnicos específicos são apresentados somente no capítulo 3. A preocupação do texto que segue agora é somente esclarecer quais fontes fazem parte da Geração Distribuída.

A energia solar fotovoltaica definitivamente é Geração Distribuída. Como foi visto, ela praticamente lançou novamente este método de produção de eletricidade no sistema

elétrico juntamente com as células a combustível. As células solares fotovoltaicas, assim como as placas, são facilmente instaladas e uma usina de qualquer porte pode ser erigida em diversos lugares. Desde o uso de uma única placa em áreas remotas, passando por edifícios comerciais em centros urbanos com telhados preenchidos por módulos fotovoltaicos até grandes fazendas fotovoltaicas montadas em desertos, a energia solar fotovoltaica é com certeza uma tecnologia de Geração Distribuída.

As células a combustível, seja qual for o combustível para seu funcionamento, é categoricamente Geração Distribuída. Elas podem ser construídas em tamanhos diversos e, assim, podem estar dentro de uma residência ou em lugares muito distantes das cidades. As células a combustível, com efeito, não só fazem parte deste grupo, como foram as “pioneiras” de sua volta nos anos 1960 e 1970. Juntamente às células fotovoltaicas, elas tiveram desenvolvimento substancial quando foram designadas para funcionar fora da Terra.

Microturbinas, turbinas a gás, pequenas máquinas a combustão e outros equipamentos de pequeno porte que usam fontes não-renováveis também são tecnologias de Geração Distribuída. A menor estrutura permite a construção e instalação em lugares muito diferentes uns dos outros, como dentro de uma indústria, em hospitais e em fazendas.

A cogeração em qualquer porte ou configuração é Geração Distribuída, principalmente na forma de mini e microcogeração. Como muitas instalações produtoras de calor podem aproveitar este recurso para gerar eletricidade, a cogeração pode estar em uma grande variedade de lugares, de processos industriais até na agricultura.

A energia eólica também é Geração Distribuída. Existem diversos tamanhos de turbinas, de diferentes tipos, tais como de eixos vertical e horizontal. Sendo assim, ela pode ser aplicada no topo de prédios com potências pequenas, em pequenas fazendas eólicas de médio porte em meios rurais e em montanhas e até mesmo no meio dos oceanos nas instalações chamadas *Offshore* de grande capacidade de geração.

As pequenas hidroelétricas, em oposição às grandes usinas hidroelétricas, apesar de usarem as mesmas técnicas, usufruem melhor dos fluxos de água, podendo ser instaladas em um número muito maior de rios. Além disso, elas podem ser instaladas rapidamente com um custo muito menor que as grandes usinas e são localizadas em diversos lugares, tais como morros e dentro de fazendas ou ainda em casas isoladas. Resumindo, pequenas hidroelétricas são tecnologias de Geração Distribuída.

Como a biomassa sucede de diversos materiais, a energia de biomassa é Geração Distribuída. Com efeito, existem diferentes usinas para produção de eletricidade com tamanhos e técnicas distintas, incluindo a cogeração e as microturbinas, cujo combustível é biomassa. Com isso, a energia de biomassa pode estar em vários pontos geográficos e físicos diferentes. Ela pode fazer parte de uma usina açucareira que aproveita o bagaço da cana-de-açúcar para uma produção substantiva de energia elétrica, assim como pode ser construída na forma de pequenas usinas cuja biomassa é a madeira ou mesmo os resíduos sólidos domésticos, os lixos municipais, por exemplo.

A energia das marés não pode ser considerada como tecnologia de Geração Distribuída conforme a definição aqui dada por enquanto. Isto porque elas são de difícil construção, ainda mais se usarem barreiras, e precisam, na maioria das vezes, ser instaladas em locais muito propícios em que a topografia seja favorável, tal como em estuários

específicos. Outros projetos promissores como as lagoas de maré e as correntes marítimas dependem menos da localização, podendo ser até mesmo construídas como sistemas *Offshore*. Porém, é problemático que estas não sejam ainda tecnologias tão desenvolvidas para se passar a discussões mais conclusivas. Talvez com a evolução das técnicas e equipamentos, a energia das marés em suas diferentes formas possa passar a ser Geração Distribuída, afinal os oceanos ocupam mais de 70% da superfície do planeta Terra.

Ainda falando sobre energias oceânicas, a energia das ondas é uma tecnologia promissora, mas que não está em um estágio de desenvolvimento avançado suficientemente para determinar todo o seu potencial abrangente. Por um lado, isto é ruim porque ela fica em um limbo de incertezas. Por outro lado, se com a tecnologia já existente ela parece trazer grandes promessas, o que virá provavelmente trará ainda mais versatilidade. Não obstante, esta forma de produção de eletricidade pode sim ser considerada Geração Distribuída, antes mesmo de maiores progressos. Isto porque ela já incorpora as características necessárias para ser enquadrada na definição proposta. Existem técnicas pelas quais é possível fazer instalações tanto na faixa litorânea, quanto em locais mais afastados das zonas costeiras, assim como em alto-mar. Além disso, pequenas comunidades isoladas podem ser beneficiadas com a energia elétrica produzida desta forma. Os problemas de flutuações de tensão e frequência talvez precisem ser corrigidos, por exemplo, com o uso de baterias. Mas o importante é que isto é exequível. Se uma grande quantidade de geradores de energia das ondas forem postos juntos, esses problemas de variação serão diminuídos e a eletricidade produzida pode ser ligada a grandes redes elétricas [33].

Existem inúmeros países nos cinco continentes com enormes potenciais geotérmicos para produção de eletricidade, sendo que 25 deles geravam energia elétrica de fato com uma capacidade instalada total no mundo em 2015 de 12635 MW e energia elétrica total produzida no mundo no mesmo ano de 73549 GWh (dados detalhados podem ser encontrados em [17]). A geração de energia elétrica que faz uso do calor interno da Terra possui várias técnicas diferentes para isso. Algumas precisam necessariamente que o local seja favorável para uso do vapor para extração energética, mas há tecnologias mais recentes que independem deste fator como, por exemplo, é o caso dos sistemas geotérmicos aprimorados (*Enhanced Geothermal Systems - EGS*) onde se extrai calor de pontos mais profundos ou das plantas binárias que possibilitam a produção em países que não possuem campos de alta temperatura [16]. Enfim, o que se vê é que a energia geotérmica pode ser diversamente localizada geográfica e fisicamente. Ou seja, energia geotérmica é Geração Distribuída.

Um último caso, a energia solar térmica concentrada está disponível em diferentes tamanhos e tipos, podendo em algumas situações precisar de uma vasta área remota para se colocar os coletores onde os raios solares são abundantes, tal como é o caso daquelas usinas que usam espelhos concentrados côncavos para aquecer fluidos em tubos para gerar vapor e daquelas com espelhos planos que concentram a luz solar refletida em uma torre, onde há um receptor pelo qual também se produz vapor. Porém, esta localização não é uma necessidade rigorosa, existindo usinas desses mesmos tipos citadas com escalas médias e próximas de cidades. Há ainda tecnologias que usam concentradores parabólicos (*solar dishes*) de menor dimensão e que são aplicados para produzir energia elétrica, por exemplo, nos sistemas prato *Stirling*, em que pequenas máquinas *Stirling* são conectadas individualmente a cada refletor com potências elétricas geradas de 25 kW cada [33]. Estas técnicas são mais recentes, mas

trazem consigo uma diversidade maior tanto de localização, como capacidade de produção. A energia solar térmica concentrada é considerada, portanto, Geração Distribuída.

2.5 – A Relação de Geração Distribuída com Outras Áreas

Mesmo que a Geração Distribuída não seja um conceito novo, as tecnologias que fazem parte deste grupo mudaram enormemente com um grande desenvolvimento desde o início da Eletrificação. Além da própria definição que modifica as perspectivas operacionais, agora existe uma gama também maior de fontes primárias que trazem consigo implicações diversas, fora a participação de pessoas na produção que nem sequer imaginavam como funcionava a geração de energia elétrica em vários lugares distintos. Há diferentes e recentes equipamentos e métodos para se fazer a integração entre os geradores e o sistema elétrico. Ao mesmo tempo, os novos meios de produção de energia elétrica podem levantar consigo transformações radicais no comportamento social sobre a eletricidade, assim como também altera a simbiose energia elétrica-meio ambiente devido à diversidade de ferramentas produtivas e à variedade de locais de instalação. Todos estes pontos levam irreversivelmente a novos estudos que precisam ser feitos.

Para tanto, a Geração Distribuída se relaciona diretamente com outras áreas da engenharia elétrica já bem organizadas. Formuladas para pesquisas e trabalhos sobre a “geração tradicional”, elas passam a ser objetos da interação entre o “velho” sistema elétrico e a “nova” Geração Distribuída que cada dia mais o adentra. As técnicas antigas devem se adaptar a este fenômeno que perpassa a estrutura do sistema elétrico, mas também novos procedimentos de análise e instrumentos fazem e farão parte deste acontecimento.

Como há vários destes campos da engenharia elétrica que se relacionam à Geração Distribuída, existem, consequentemente, os mais diversos impactos em diferentes partes do sistema elétrico que precisam ser pesquisados mais a fundo para que o funcionamento tanto de um, como de outro, não seja prejudicado. Só assim a Geração Distribuída poderá existir em grande quantidade sem alterar as altas qualidade e confiabilidade que foram adquiridas ao longo dos anos em termos de consumo de eletricidade. Dentre estas muitas implicações, podem ser citadas algumas. No caso de problemas de proteção, inclui-se: ilhamento incorreto, religamento automático inadequado, mudanças nas correntes de falta, erros na coordenação de relés, aparecimento de ferro-ressonância, fluxo de potência anormal, entre outros [143]. Sobre os impactos no controle e na estabilidade (de regime permanente e dinâmico), podem ser citadas as mudanças no nível de curto-círcuito, o impacto na constante de inércia, as modificações nas ferramentas de análise, assim como as alterações na estabilidade da tensão [119]. Por último, quanto à qualidade de energia, tanto a Geração Distribuída quanto o sistema elétrico há possibilidades de serem afetados com aumento de sobretensões para grandes quantidades de Geração Distribuída e mitigação de subtensões com pequenas quantidades, injeção de correntes harmônicas na rede, diminuição das perdas nas linhas, melhora na situação das cargas e na confiabilidade, possível aumento de afundamentos e no nível de *flicker*, entre outras implicações [25]. Não são somente estas áreas que são afetadas, mas elas exemplificam o grande número de consequências que tem a introdução da Geração Distribuída no sistema elétrico (ou mesmo fora dele).

No capítulo 3, serão discutidas várias dessas implicações do envolvimento entre a Geração Distribuída e o sistema elétrico. Além disso, também serão analisados os meios de integração entre estes dois sistemas, assim como os métodos para que isso aconteça da melhor maneira, incluindo aí metodologias de estudo e novas arquiteturas.

A geração de energia elétrica com a entrada da Geração Distribuída modifica o panorama entre a interação do ser humano e da natureza com a eletricidade. São velhos conhecidos os impasses entre energia, sociedade e meio ambiente e estes novos métodos alteram ainda mais este cenário. E, efetivamente, estes novos impactos são mais importantes que aqueles técnicos. Esta extraordinária transformação coloca os cidadãos novamente próximos da produção de eletricidade, abrindo novas possibilidades inimagináveis para a vida moderna, e ainda traz consigo esperanças e dúvidas para o futuro do meio ambiente.

Em termos da sociedade, a Geração Distribuída tem implicações na política, na economia, no trabalho, na saúde, na educação, na pobreza, na desigualdade, na geopolítica, na migração, etc. Já sobre o meio ambiente, ela está intrinsecamente ligada às mudanças climáticas e à poluição em suas diversas formas. Tudo isso pode ser levado por um caminho de desenvolvimento sustentável para toda a humanidade e a natureza. Apesar desta diversidade de consequências, a maioria delas é simplesmente esquecida ou ignorada, principalmente em se tratando de estudos técnicos. É preciso lembrar e ressaltar novamente que tecnologia, sociedade e meio ambiente são indissociáveis. Por isso, mais uma vez é destacada a importância de um estudo completo, ou seja, que aborde todos estes elementos na Geração Distribuída. Desta maneira, no capítulo 4, alguns destes tópicos serão tratados.

3- Geração Distribuída e o Sistema Elétrico

“Sentimos que, mesmo depois de serem respondidas todas as questões científicas possíveis, os problemas da vida permanecem completamente intactos.”

(Ludwig Wittgenstein)

Quando uma tecnologia começa a se consolidar, os engenheiros e cientistas que estudam, pesquisam e trabalham sobre ela tendem e se esforçam a discutir amplamente seu funcionamento e suas implicações técnicas. Com a Geração Distribuída isto não poderia ser diferente, ainda mais se tratando de artefatos para conversão e produção de energia, objetos primordiais na vida humana no presente. Assim, é fundamental a compreensão da operação e das consequências de uma tecnologia. Entendendo mais estes pontos é possível tomar decisões mais acertadas para se tentar alcançar uma sociedade que viva cada vez melhor e um meio ambiente que seja cada dia menos deteriorado.

No caso particular da Geração Distribuída, os impactos são inúmeros. No capítulo 1 foi visto que o sistema elétrico foi erigido historicamente de tal forma que fosse dividido em quatro setores bem estabelecidos e assim nomeados: geração, transmissão, distribuição e consumo. No primeiro, fazem parte grandes usinas centralizadas para produção de eletricidade, aquelas que foram chamadas no capítulo anterior de “tradicionais”, cujas três formas são: hidroelétricas, termelétricas a combustíveis fósseis e termonucleares. No segundo setor, linhas quilométricas e interligadas com tensões altíssimas servem para transportar a energia elétrica gerada no primeiro setor para o terceiro setor. Este, por sua vez, é disposto em subestações e transformadores que abaixam os níveis de tensão para poder entregar diretamente a energia elétrica para o quarto e último setor dos consumidores formado por residências, indústrias e comércios, que usam a eletricidade, em geral transformada em outras formas de energia, para diversos propósitos. Desta maneira, o sistema elétrico definitivamente não foi elaborado para inserção da Geração Distribuída, incluindo aí o grande número de pequenos geradores espalhados por toda a rede elétrica, ainda mais dentro dos terceiro e quarto setores, com uma alta diversidade de fontes com características muito particulares antes impensáveis ou mesmo grandes plantas de energias renováveis que dependem de fatores climáticos de difícil previsão ligados ao segundo setor.

No entanto, nos últimos anos, por diversos motivos, tem havido um avanço expressivo da Geração Distribuída no sistema elétrico. Surgem, assim, enormes desafios para serem superados que levem a uma conciliação entre os dois, sem que este aumento cause distúrbios e problemas. Para que isso possa acontecer, estudos técnicos densos devem ser feitos, pois este método de produção de energia elétrica afeta diversas áreas da engenharia elétrica que pareciam inabaláveis. Ademais, para que esta relação seja compatível com um bom desempenho, novos procedimentos e equipamentos também devem adentrar o sistema elétrico, transformando sua própria estrutura física. As mudanças são tão expressivas que parece surgir um novo sistema elétrico do interior do antigo.

Assim, este capítulo tem como propósito um exame acerca destas múltiplas implicações estritamente técnicas da Geração Distribuída no sistema elétrico. Nele, portanto, será visto as decorrências no sistema e o possível planejamento a ser proposto, o funcionamento básico das diversas tecnologias de Geração Distribuída, como tem sido feita a assimilação entre a Geração Distribuída e o sistema elétrico e os respectivos impactos nesta integração, mas não só isso. Ainda serão explorados os novos meios e estruturas que nasceram para tentar resolver este imbróglio, dando uma nova feição ao arcaico sistema elétrico. As implicações na sociedade e no meio ambiente serão estudadas no próximo capítulo.

Há poucos livros que tratam da Geração Distribuída especificamente e suas implicações. Por outro lado, existem milhares de artigos abordando o próprio assunto e vários temas correlatos. Além destes últimos que serão citados ao longo do texto, alguns dos primeiros inspiraram bastante o que fala neste capítulo. Dentre eles está o livro “*Distributed Generation*” [109] de Jenkins et al., que trata da matéria de uma forma geral. O livro “*Integration of Distributed Generation in the Power System*” [24] de Bollen e Hassan influenciou o que é aqui exposto. Ele versa sobre os diversos impactos da integração da Geração Distribuída no sistema elétrico com busca de análises usando a metodologia da capacidade de hospedagem. O capítulo 9 do livro “*Electrical Power System Quality*” [55] de Dugan et al. traz reflexões sobre o tema, principalmente sobre os efeitos na qualidade da energia com a inserção da Geração Distribuída. Por fim, a tese de doutorado de Etherden [69] traz muitas informações sobre capacidade de hospedagem, armazenamento de energia, redes elétricas inteligentes e casos experimentais.

3.1 – Pensando o Novo Sistema Elétrico

Para que o sistema elétrico funcione adequadamente com a integração da Geração Distribuída, é preciso repensar não só como se produz energia elétrica, mas igualmente como ela é distribuída, transmitida e até consumida. Ou seja, para suportar o ingresso significativo deste procedimento de geração de energia elétrica, talvez seja necessário reelaborar todo o sistema elétrico com uma nova roupagem. Para tanto, o planejamento é peça-chave para que a transição não deixe nenhum agente do setor elétrico, seja ele um produtor, um operador, um usuário ou um híbrido dos três (algo possível no futuro próximo), possa ser flagelado com a interrupção de energia, a danificação de equipamentos, as falhas em operações e processos e os riscos de segurança a seres humanos e animais. A inserção da Geração Distribuída no sistema elétrico traz tanto benefícios quanto malefícios e como seu crescimento parece inevitável, devem-se buscar meios para que os últimos sejam irrigários e os primeiros abundantes. Para isso, os fenômenos técnicos da interação entre a Geração Distribuída e o atual sistema elétrico devem ser compreendidos, porque só assim poderá haver a atuação correta. O planejamento, portanto, passa pelo apontamento das modificações levantadas. Obviamente, ele também deve se servir de estratégias para mitigação dos problemas encontrados. Nesta seção, algumas dessas várias implicações são apresentadas, bem como certas respostas. No entanto, deve ficar claro que não será feita aqui uma lista exaustiva dos problemas e soluções. Esta é uma tarefa muito difícil ainda, mas que deve ser buscada por

todos os pesquisadores em conjunto para que seja possível uma transição suave para o “novo sistema elétrico” e que este tenha um funcionamento com alta confiabilidade e qualidade.

3.1.1 – Primeiro Passo: Pensando a Integração

Um dos maiores problemas da penetração da Geração Distribuída em larga escala é que tem se seguido uma política de “instale-e-esqueça” (“*fit-and-forget*”), onde os geradores são acomodados à rede de distribuição e poucas regras de controle são estabelecidas para isso como se assim ela suportasse, visando na maior parte somente sua instalação e não toda a sua participação. O que de fato deve ser seguido é uma verdadeira *integração* da Geração Distribuída no planejamento e na operação com aplicação de novos conceitos [129]. Ficará evidente nesta seção que a entrada aleatória de Geração Distribuída não pode acontecer, sobretudo se o ritmo deste ingresso continuar a crescer rapidamente. É preciso refletir profundamente a sua conexão no sistema elétrico.

Em um artigo, Guerrero et al. [86] apresentam seis maneiras para se fazer esta integração, que devem passar especialmente pelos objetivos das instituições e da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Para estes autores, os sistemas de energia integrados devem: aprimorar os componentes junto com o sistema, levando em conta a implementação rápida e eficiente sem perder a visão a longo prazo; ter espaço para sistemas de energia com múltiplas fontes e produtos diversos funcionando em conjunto; possibilitar a entrada de indústrias ecológicas, onde ciclos fechados de produção imitem os processos naturais; inserção de tecnologias novas e mais eficientes nas velhas e menos eficientes instalações para acelerar o processo de inovação; integração de diferentes setores e multiplicação de funções para os produtos, reduzindo custos e aumentando a sinergia. Estes pensamentos são aconselhados para a integração técnica.

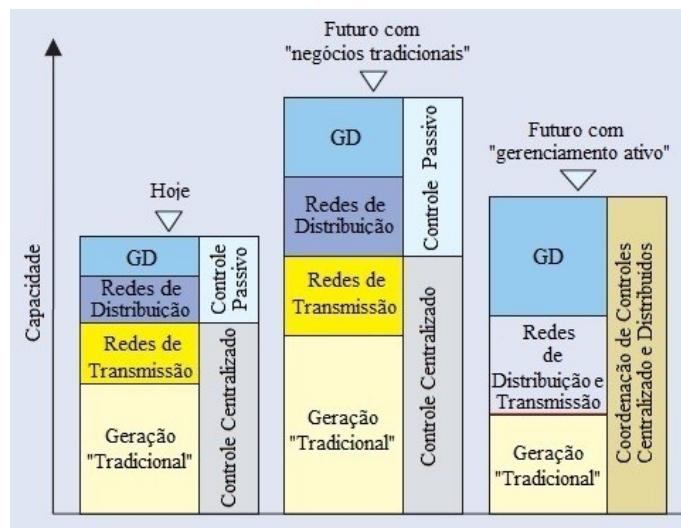
3.1.2 – Transformações no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

O maior volume de Geração Distribuída se encontra no sistema de distribuição. Dessa forma, o maior número de problemas e de melhorias se localiza neste setor do sistema elétrico. As mudanças são muitas e podem ocorrer conflitos operacionais entre o sistema e os equipamentos já instalados e a Geração Distribuída, mas podem ocorrer diversos aprimoramentos. Dentre as numerosas destas diferenças, algumas podem ser citadas: novos fluxos de potência (bidirecionais em alguns casos), a redução ou o aumento nas perdas elétricas, piora ou melhora na regulação de tensão, injeção de harmônicas a partir de geradores, alterações nos níveis de curto-circuito, problemas na coordenação de elos fusíveis, falhas no religamento automático instantâneo, diminuição do “alcance” de relés [9, 53, 54], etc. Se as transformações serão benéficas ou maléficas dependerá muito da atuação de seus participantes, que passa a ser um grupo muito maior, contando, além da concessionária e dos operadores, com pequenos produtores de energia elétrica, mas também de regulamentações, controles e, no primeiro caso, um bom planejamento e novas técnicas e tecnologias.

Todavia, a maior das transformações está no papel do sistema de distribuição. Este não foi elaborado nem construído para participação de geradores. Ao contrário, ele foi preparado ao longo do tempo para ser um sistema “passivo”, que recebe a energia elétrica da rede de transmissão e a repassa para os consumidores finais. Com a Geração Distribuída, os agentes do sistema elétrico devem se preparar para esta mudança de estado. A rede de distribuição, a partir da inserção de pequenos geradores e outros equipamentos, deverá ser um verdadeiro sistema “ativo”.

Para lidar com essa mutação, o conceito de “gerenciamento ativo da rede” foi proposto [50, 129, 109]. Sua ideia é maximizar habilmente o uso dos circuitos e equipamentos já existentes na rede de distribuição em oposição ao método de “instale-e-esqueça”, de tal maneira que seja facilitado o aumento da Geração Distribuída conectada neste sistema, reduzindo seus impactos negativos, e que eles sejam operados e controlados de maneira eficiente em benefício de toda a rede. Este conceito, por sua vez, pode ser considerado parte de outro mais amplo chamado “redes elétricas inteligentes”, mas este tema será mais detalhado na última seção deste capítulo.

Figura 3.1 – Capacidades relativas dos setores atualmente, em um futuro com “negócios tradicionais” e em um futuro com aplicação do “gerenciamento ativo”. Aqui, “GD” é abreviatura de Geração Distribuída.



Fonte: Adaptado de [50].

Sob a ótica de um gerenciamento ativo, há dois panoramas futuros possíveis (Figura 3.1). No primeiro, chamado “negócios tradicionais”, o enfoque “instale-e-esqueça” é seguido. Nele, o sistema de distribuição é passivo e mesmo com a potência ativa aumentada pela Geração Distribuída disponível neste local, seus impactos negativos não são abatidos, o que diminui seu poder de entrada no sistema. Além disso, ainda é necessária a “geração tradicional” porque sob controle somente centralizado ela possui funções que aumentam a integridade e a segurança do sistema completo. Como há ainda dependência destes grandes geradores centrais, é preciso reforçar não só eles, como ainda as linhas de transmissão e o investimento será maior. Por outro lado, no segundo horizonte do “gerenciamento ativo”, a Geração Distribuída é controlada, assim como o próprio sistema de distribuição e seus aparelhos já estabelecidos para uma operação coordenada. Para isso, dispositivos e técnicas de informação e comunicação serão imprescindíveis na maior parte dos casos. Desta maneira, os problemas serão reduzidos e o ingresso poderá ser maior. Com estas aplicações, as funções

exercidas pelas centrais “tradicionais” poderão ser exercidas pela própria Geração Distribuída. Como consequência, o sistema será menos dependente da “geração tradicional” e seu papel será reduzido, assim como o investimento nela e nas linhas de transmissão. Se se deseja um maior número de Geração Distribuída no sistema elétrico, a abordagem ativa deve ser adotada [50].

3.1.3 – Alterações nos Fluxos de Potência

O fluxo de potência é um dos pontos de grande alteração e maior importância com a inserção da Geração Distribuída no sistema elétrico. Esta área de estudo serve para o planejamento e o bom funcionamento de toda a rede elétrica. A energia elétrica antes seguia o caminho restrito das grandes gerações até a rede de distribuição chegando aos consumidores através das linhas de transmissão interligadas, indo da maior tensão para a menor. Estes estudos que já eram complexos e demandavam uso de ferramentas numéricas e computacionais iterativas, tais como os métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson, para se encontrar as soluções e, consequentemente, pensar sobre como agir no sistema elétrico, hoje com a nova abordagem da Geração Distribuída parecem relativamente mais simples do que agora podem se tornar.

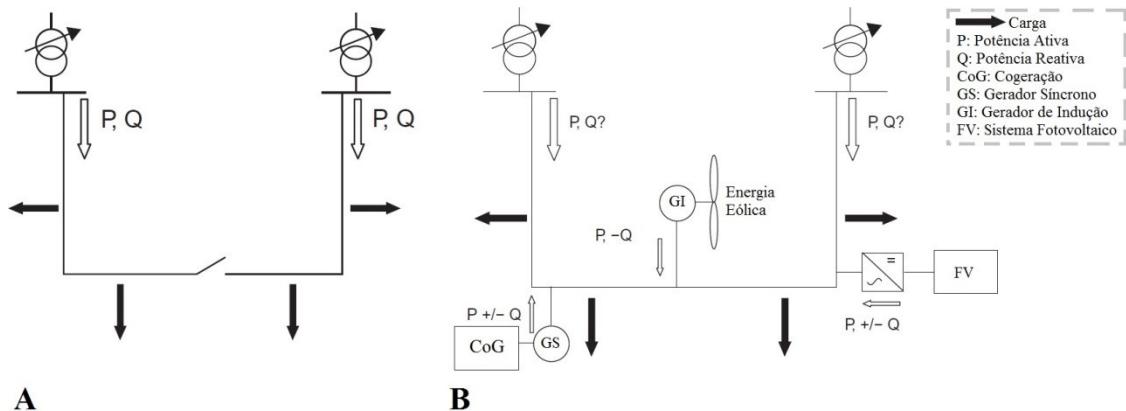
Efetivamente, no sistema tradicional, os circuitos possuem poucos elementos. Grandes geradores, barramentos, transformadores, linhas de transmissão ou distribuição, cargas e, algumas vezes, compensação de reativos são as peças que os formam. Os primeiros representando unicamente geradores síncronos de grande porte e os últimos na maioria das vezes bancos de capacitores. A operação, por sua vez, fica na mão de poucas pessoas. Com esta topologia, foram consagrados três tipos de barras para análise: a *barra de referência* que representa alguma das grandes usinas, onde se conhece as potências ativa e reativa demandadas (zero nos dois casos), especifica-se a tensão e o ângulo de potência (geralmente 1 pu para o primeiro e 0° para o segundo) e a solução resulta nos valores de potências ativa e reativa que devem ser geradas; a *barra PV* ou *barra de tensão controlada* pela qual conhece-se as potências ativa e reativa demandadas, é fornecida a tensão (esta é controlada) e a potência ativa gerada e descobre-se a potência reativa que deve ser produzida e o ângulo de carga pela solução, a qual pode servir para representar usinas; por fim, há a *barra PQ* ou *barra de carga* que, como indica seu nome, representa as cargas ou a demanda e, pela falta de equipamentos de geração, tem especificadas as potências ativa e reativa como zero, sendo apontadas as potências ativa e reativa absorvidas e tem-se como solução a tensão e o ângulo de carga [59]. No caso da distribuição, a *barra de tensão controlada* pode ser aquela da subestação ou aquela suprida por um regulador de tensão, enquanto a *barra de carga* pode ser distinguida pela conexão de banco de capacitores [111].

Este cenário é bastante alterado com a Geração Distribuída. Antes o número de geradores era diminuto, eles eram centralizados, de larga capacidade e na maior parte formado por máquinas síncronas. Atualmente e no futuro, passarão a pertencer à rede elétrica inúmeros geradores pequenos em vários pontos diferentes com tecnologias distintas. A separação entre as três categorias não serão mais tão claras. O sistema de distribuição, sobretudo, terá um papel mais ativo e os fluxos de potência podem ser revertidos e até mesmo negativos, sendo determinados tanto por geradores quanto cargas. Na situação com Geração Distribuída, a

barra de referência é um barramento forte. Onde há um gerador de indução, a representação pode ser feita por uma barra PQ com potência ativa negativa (exportada) e potência reativa positiva (absorvida), em uma espécie de carga negativa. Enquanto isso, os geradores com eletrônica de potência podem ser representados por uma barra PV se houver controle de tensão, mas se for feita somente correção do fator de potência, a escolha recai sobre uma barra PQ com potência ativa negativa [109]. Isto tudo no poder de vários agentes.

Ainda neste sentido, Jenkins et al. [109] apresentam três exemplos (ver Figuras 3.2A e 3.2B). A cogeração, que abarca geradores no interior de um consumidor e estão em lugares diversos da distribuição, pode fazer uso de máquinas síncronas para produção de energia elétrica. Estas, por sua vez, além de emitirem potência ativa, têm a capacidade de absorver ou entregar potências reativas. É o caso convencional de geradores, mas difere pela maior quantidade e pela localização. Algumas turbinas eólicas (velocidade fixa), assim como determinadas pequenas hidroelétricas e outras tecnologias de Geração Distribuída, têm na sua composição geradores de indução que precisam absorver reativos para o seu adequado funcionamento. Capacitores são até mesmo colocados na própria estrutura destes equipamentos para resolver esta situação. Energia solar fotovoltaica e células a combustível que fazem uso de conversores de eletrônica de potência podem exportar potência ativa com fatores de potência específicos.

Figura 3.2 – A. Fluxo de Potência em um sistema de distribuição sem Geração Distribuída. **B.** Fluxo de Potência em um sistema de distribuição com Geração Distribuída.



Fonte: Adaptado de [109].

Há ainda um ingrediente que faz os fluxos de potência serem ainda mais difíceis de serem analisados. Algumas das fontes, como será visto mais adiante, são variáveis e intermitentes. Isto quer dizer que não podem ser despachadas como as grandes centrais. Assim, os valores de potências ativa e reativa disponíveis por elas vão se alterando ao longo do tempo na ordem de horas, minutos e até segundos. Algumas vezes podem ser drásticas essas mudanças, com os valores sendo até mesmo nulos.

3.1.4 - Impactos no Sistema de Transmissão de Energia Elétrica

Como na distribuição, o fluxo de potência na transmissão será modificado. Isto levará em grande parte a benefícios. Se a Geração Distribuída estiver instalada no sistema de

distribuição, os fluxos poderão ser menores na transmissão, porque a mesma potência ativa que é produzida localmente será, na maioria dos casos, consumida localmente. Consequentemente, as perdas nas linhas de transmissão serão reduzidas, assim como o risco de sobrecarga. Concomitantemente, os riscos de instabilidade serão menores [24], pois, de fato, com uma potência transportada mais baixa, os ângulos de potência serão menores.

O quadro muda se a Geração Distribuída estiver ligada nas próprias redes de transmissão. A conexão pode até ser parecida com o que é feito com os “geradores tradicionais”, mas dificuldades podem aparecer posto que algumas das tecnologias são diferentes e a Geração Distribuída pode ser instalada em qualquer lugar. Esta última questão faz com que os engenheiros tenham empenho maior ainda sobre os trabalhos com o planejamento e a operação na transmissão, mas similarmente ao que já acontece com as grandes centrais. A primeira questão, por sua vez, é mais delicada. Além das funções diferentes e do uso de interfaces incomuns, como os geradores de indução e os inversores, algumas fontes são variáveis e intermitentes, como já foi falado, o que as faz depender de alterações climáticas ao longo de um tempo relativamente curto para seu funcionamento, fazendo com que os fluxos de potência também sejam mais imprevisíveis. É o caso das fazendas eólica e fotovoltaica que dependem, respectivamente, da velocidade do vento e da quantidade de nuvens encobrindo o céu. Também como consequência, o operador da transmissão deve ter em mente que as capacidades de reserva podem diminuir em relação àquelas proporcionadas pelos “geradores tradicionais”, dificultando a programação das potências ativa e reativa entregues com erros na previsão [24].

3.1.5 - Consequências nas Centrais Geradoras “Tradicionais” de Energia Elétrica

Há dois pontos importantes com a inserção de Geração Distribuída no caso das “gerações tradicionais” em termos técnicos. O primeiro é que a potência média de saída das centrais já instaladas diminuirá na proporção do aumento da produção de energia elétrica por Geração Distribuída e o segundo é que o papel delas pode passar a ser de usinas de reserva. Esta adaptação ocorrerá porque a incerteza na produção cresce com certas tecnologias de Geração Distribuída e o despacho talvez não possa ser feito de acordo com a demanda. À medida que for aumentando a quantidade de Geração Distribuída, as centrais “tradicionais” poderão ser desligadas e outra dificuldade surge. Os geradores “tradicionais” têm outras funções além da produção de potência ativa. É o caso das referências de frequência e tensão. Elas podem ser perdidas ou ao menos deterioradas se a acomodação não for feita de forma adequada e inteligente para a expansiva Geração Distribuída [109].

3.1.6 - Evitando Novas Grandes Construções

Se a Geração Distribuída for integrada apropriadamente como aqui foi exposto, então a construção de linhas de transmissão e grandes usinas poderão estar fora dos planos das empresas de energia elétrica e dos governos. Com efeito, com os fluxos de potência abrandados na transmissão e com a capacidade de produção da Geração Distribuída equilibrando com o consumo, o resultado é um menor investimento tanto no aparato completo

do sistema de transmissão, incluindo os cabos, os isoladores, as torres, os grandes transformadores e outros dispositivos necessários, quanto nas enormes edificações das “gerações tradicionais”. Como a rede da transmissão foi elaborada para suportar o transporte de potências altas, a redução destas alivia as linhas e permite um melhor aproveitamento dessas já existentes, sem haver maior preocupação com linhas novas. Técnicas como a aplicação de linhas de transmissão em paralelo para maior envio de energia elétrica poderão ser dispensadas em muitos casos. Simultaneamente, a confiabilidade é aumentada com geradores espalhados por todo o sistema elétrico e as interconexões terão menor importância.

3.1.7 – Participação nos Serviços Anciliares

Para que a Geração Distribuída possa substituir a geração centralizada integralmente ou ao menos cobrir a maior parcela da geração de energia elétrica, ela deverá tomar parte também nos chamados “serviços anciliares”. Isto porque, além de produzir potência ativa, a “geração tradicional” realiza outras tarefas essenciais para o bom funcionamento e a segurança de todo o sistema elétrico. A estas outras funções é que se dá o nome de serviços anciliares. Dentre eles, podem ser citados os controles de frequência e tensão, o equilíbrio entre geração e carga, disponibilidade de reserva de energia, melhorias na qualidade do serviço e o autorrestabelecimento (*black start*). Para se ter uma ideia mais precisa, no Brasil especificamente, para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em seus Procedimentos de Rede no submódulo 14.1 [147], são considerados serviços anciliares: controles primário e secundário de frequência das unidades geradoras, suporte de reativos, autorrestabelecimento parcial e integral e sistema especial de proteção.

Novamente, deve ser enfatizado que é fundamental a adoção de uma perspectiva ativa da distribuição para que estes trabalhos sejam proporcionados pelos vários pequenos geradores instalados neste setor. O planejamento deve ser orientado por esta questão e os operadores tanto na transmissão, quanto na distribuição devem se preparar para tais mudanças, além de se pensar na contribuição dos proprietários destes geradores nestas tarefas. Deve ser advertido também que, apesar da Geração Distribuída parecer não ser atrativa por sua diversidade de fontes para exercer os serviços anciliares em contraposição aos “geradores tradicionais” uniformes, bem estudados e estabelecidos, ela pode se beneficiar justamente desta característica aparentemente adversa. Porém, para que isso seja possível, é preciso uma gama de estudos para decidir quais das tecnologias melhor atendem cada um dos casos. Como exemplos do uso de tecnologias diferentes para funções diversas, indicam-se turbinas a gás de ciclo combinado e energia eólica fornecida por geradores de indução duplamente alimentados (*Doubly-Fed Induction Generators - DFIG*) para controle de frequência, enquanto geradores a diesel e microcogeração servem muito bem para energia de reserva [129]. A aplicação delas deverá ser completamente coordenada. É importante ressaltar que com a elevação da quantidade de Geração Distribuída no sistema elétrico há, consequentemente, um aumento na disponibilidade de serviços anciliares. Se feito corretamente, a Geração Distribuída poderá ter comportamento até mesmo superior ao dos “geradores tradicionais”.

3.1.8 – Implicações para os Consumidores

O consumidor que possui Geração Distribuída tende a ganhar bastante com isso. Além de suprir suas necessidades próprias de energia elétrica (potência ativa), ele dispõe de confiabilidade e qualidade da energia que estão em seu controle e não no de agentes externos como as concessionárias, além de poder abarcar um consumo maior. Em alguns casos, dependendo da tecnologia disponível, seja ele um simples morador, um comerciante ou mesmo um grande industrial, é possível operar sobre o gerador de tal forma que outros pontos sofram melhorias. É o caso da provisão de energia reativa. Quando necessária, ela pode ser controlada pelo próprio usuário, fazendo correção do fator de potência. Os níveis de tensão também podem ser modificados de forma positiva, de acordo com o que for preciso. As perdas nos alimentadores dentro de um raio pequeno da instalação da Geração Distribuída podem diminuir. Outra vantagem, apesar da dificuldade técnica, é o uso proposital de ilhamento [9] para uma determinada porção do sistema elétrico (uso emergencial) alimentando as cargas locais e vizinhas em casos de faltas a montante na rede, o que notadamente aumenta a confiabilidade. É claro que isto depende não somente das funções do dispositivo, mas também do modo que o consumidor o utiliza. Para que não ofereça mais problemas, em muitas das vezes é preciso supervisão técnica.

Não há, porém, somente vantagens para os consumidores. Ao mesmo tempo em que se aumenta a confiabilidade e a qualidade da energia para os consumidores proprietários da Geração Distribuída, para outros usuários do sistema elétrico nos arredores (usando os mesmos alimentadores, por exemplo) estes critérios podem ser reduzidos [53, 54]. Dois casos, anteriormente citados neste texto, são apresentados ainda por [53, 54], na regulação de tensão e no religamento automático instantâneo. No primeiro, se o nível de tensão for elevado no perfil de valores, como estabelecem as normas em estrita dependência da Geração Distribuída, para que ocorra aumento no número de cargas nas adjacências, em um caso de falta no sistema pelo qual seus geradores devem ser retirados, o afundamento de tensão pode ser agravado mais que o normal. Já no segundo caso, em uma falta, se no intervalo entre as tentativas de religamento a Geração Distribuída não for capaz de reconhecê-la e não se desconectar, a falta pode persistir por causa dela, parecendo permanente e não temporária. O religador automático pode abrir o disjuntor de vez e o fornecimento de grande parte da rede elétrica será parado levando a uma interrupção sustentada. Além do problema na qualidade do serviço, perde-se confiabilidade e os consumidores ao redor da Geração Distribuída são todos prejudicados. Um terceiro exemplo que pode ser aplicado ao caso dos consumidores é dado por [9]. Se não for feita a correta compatibilidade do arranjo do aterramento e também da configuração dos transformadores, “elevações momentâneas de tensão (*swells*) e sobretensões podem ser impostas ao sistema danificando equipamentos de consumidores e da concessionária [9]”.

É evidente que todas estas soluções e problemas proporcionados pela Geração Distribuída não podem ter como culpados os próprios consumidores. Se nem mesmo os engenheiros eletricistas ainda estão preparados para a maior parte destes impactos, o que poderá se dizer de um cidadão comum que nem ao menos tem conhecimentos básicos de eletricidade. Deve ser reforçado que uma supervisão técnica é necessária. A atuação de engenheiros eletricistas e outros profissionais qualificados para dar suporte ao consumidor é

imprescindível, independente de serem das concessionárias, das permissionárias ou consultores autônomos.

3.1.8 - Reduzindo o Consumo e Aumentando a Eficiência Energética

Novas maneiras de se produzir energia elétrica e novos sistemas para que isso ocorra. Este é o caminho que tem sido tomado. Com efeito, o consumo de eletricidade tem aumentado mundo afora, mas, mesmo diante de questões técnicas, tentar reduzir este consumo e aumentar a eficiência energética dos equipamentos, sejam eles de geração ou cargas, não seria um rumo mais simples, óbvio e que responderia aos problemas recorrentes do sistema elétrico? Fazer uso destes dois princípios, mais do que apoiar um crescimento desenfreado e a inserção de novos equipamentos de geração no sistema elétrico, seria algo a se pensar. Com eles, o sistema elétrico já existente não precisaria de tantas alterações e a transição seria mais simples da velha para a nova rede elétrica. Mesmo com apoio da entrada da Geração Distribuída, ainda assim haveria muitos benefícios. Reduzindo o consumo e aumentando a eficiência energética faria com que fosse necessário um menor custo, uma quantidade menor de geradores, uma consequente diminuição de perdas, um aumento na qualidade da energia e na confiabilidade, maior controle, melhor operação, etc. Para além da desordenada penetração de Geração Distribuída, talvez fosse melhor tecnicamente para o sistema elétrico na sua totalidade a simples mudança de postura no uso da eletricidade, assim como na melhora nos aparelhos de produção e consumo. Este é um ponto que deve ser refletido no planejamento do atual e futuro sistema elétrico.

3.1.10 – Maneiras de Planejar a Inserção da Geração Distribuída

Como pode se imaginar pelo que já foi discutido, o sistema elétrico é planejado sem supor efetivamente a integração da Geração Distribuída. Como toda a estrutura e funcionamento estão bem estabelecidos com grandes geradores centralizados e cargas incontroláveis, mas com perfis diários bastante previsíveis, algumas regras práticas simples para planejamento foram determinadas e são corriqueiramente usadas. Entretanto, isto deve mudar com a introdução da Geração Distribuída.

Normalmente, o que tem sido feito a décadas são duas apreciações básicas. A primeira consiste em observar e tentar antever o crescimento das cargas ao longo de um tempo e, com isso, aumentar a capacidade quando este consumo sobe, tomando os picos da demanda como referência principal. A segunda é atentar para falhas de equipamentos que podem trazer falta de segurança e menores confiabilidade e qualidade. Para resolver este último tipo de problema normalmente são feitos investimentos e reforços, como construção de novas linhas ou subestações. Com a Geração Distribuída, há um maior número de tecnologias, assim como de localizações e, mais ainda, os planejadores não estão preparados [52], porque as regras não valem como antes, tornando a prática mais complexa.

Existem várias metodologias de planejamento, especialmente com a entrada da Geração Distribuída no sistema elétrico. Nesta seção algumas delas são apresentadas para

elucidar como é difícil o planejamento, mas para também mostrar como ele é imperativo e pode trazer diversos benefícios para toda a rede elétrica e seus usuários.

A primeira das metodologias que pode ser explorada é a de “minimização de custos” [52]. Nela, os impactos negativos (baixa confiabilidade, aumento significativo de perdas, distúrbios na qualidade da energia, etc.) na rede são calculados e transformados em custos. Nenhuma atitude deve ser tomada enquanto as cargas não crescerem suficientemente para serem minimamente insuportáveis a confiabilidade e a qualidade do sistema. Na abordagem convencional, ao se passar desse limite ou se ao menos isto for previsto para acontecer brevemente, um investimento, como a construção de novas subestações e alimentadores, deve ser feito o mais rápido possível. Com a Geração Distribuída em mãos, este cenário pode mudar. Se a previsão ainda for de aumento elevado de cargas em um curto período de tempo, os reforços citados ainda devem ser mandatórios. Isto porque a inserção de muita Geração Distribuída em pouco tempo, mesmo que pelos próprios planejadores, traria problemas difíceis de serem resolvidos rapidamente devido à estrutura do sistema elétrico ainda não ser preparada para tal, o que alçaria outros custos, superando o investimento tradicional. No entanto, se a expansão das cargas for mais lenta, a inserção gradual da Geração Distribuída pode ser realizada e incentivada levando a um menor custo, uma vez que os planejadores podem preparar melhor a própria rede para a inserção e aproveitar seus benefícios técnicos. Apesar desta proposta parecer ser simples, deve ser lembrado que existe um grande leque de tecnologias de Geração Distribuída com suas particularidades. Então, fica subentendido que as estratégias devem ser específicas para cada caso. Maiores detalhes podem ser encontrados ainda em [52].

Uma segunda metodologia parte da localização ótima de instalação da Geração Distribuída e ainda é discutida em [52]. A localização da Geração Distribuída é essencial na melhora do desempenho do sistema de energia. No entanto, em sua maioria, os operadores da distribuição não têm controle sobre esta questão. Os produtores independentes geralmente buscam realizar suas próprias necessidades com a energia elétrica gerada e a instalação está sujeita a suas próprias escolhas. Isto não quer dizer que os operadores e planejadores não possam atuar neste ponto. Ao contrário, deve fazer parte do planejamento o conhecimento da localização ótima da Geração Distribuída. Ao menos saber como será o comportamento dela em determinada área é importante para as tomadas de decisão e orientação. Além disso, eles podem influenciar os produtores independentes a fazerem a escolha correta do local de instalação. Se estiver próxima de uma subestação, por exemplo, a Geração Distribuída não ajudará tanto a capacidade dos alimentadores. Porém, se a Geração Distribuída for instalada onde há uma grande carga, o sistema pode ser aliviado. Caso contrário, a própria concessionária também arcará com os custos.

Ainda sob este enfoque, mas agregando a capacidade da Geração Distribuída, uma força tarefa sobre planejamento e otimização do IEEE fez uma revisão crítica do estado da arte de vários métodos e técnicas, notadamente computacionais, de planejamento e otimização em [112]. Os autores observam que os operadores e planejadores não têm controle nem sobre a localização, nem sobre a potência instalada pela Geração Distribuída em muitas das vezes, mas que eles devem obrigatoriamente observar os limites elétricos e térmicos da rede onde ela é instalada. Os métodos e as técnicas enumeradas no artigo são: a *análise analítica*, no qual se estuda uma única Geração Distribuída inserida no sistema elétrico e somente um impacto associado em tempo determinado e sem uso de controles; a *análise exaustiva* que,

diferentemente da primeira, explora um problema técnico em todo um espaço de busca correspondente à localização e ao tamanho e permite levantar múltiplos objetivos com a contrapartida de exigir um tempo muito grande para resolução; a *programação linear* que nada mais é que a linearização do fluxo de potência ou dos resultados deste, o que permite diversas análises, mas sofre com a possibilidade de erros dependendo dos valores de capacidade; o *fluxo de potência CA ótimo*, que busca a melhor situação de fluxo de potência, já é bem conhecido por ser usado há muito tempo para despachos econômicos e, apesar de ser mais rigoroso que o método antecedente, abarca não-linearidade e um grande tempo de processamento da resolução, além de valer somente para problemas “fechados”; a *metaheurística* no qual fazem parte vários algoritmos que buscam necessariamente alcançar soluções precisas de otimização (quase-ótimas) mas não exatas e, por isso mesmo, permite uma grande variedade de problemas para análise e também soluções, que devem ser estudadas pelos planejadores, sendo este um empecilho e ao mesmo tempo um benefício, dado que a diversidade da Geração Distribuída acaba sendo representada; a *análise probabilística* que faz uso de métodos da probabilidade para estudar as incertezas causadas pela Geração Distribuída e seus efeitos na confiabilidade do sistema e que, por isso, é usada fundamentalmente para aquelas fontes variáveis e intermitentes. Estes métodos e técnicas podem auxiliar muito no planejamento e na otimização, mas ainda não são isentos de obstáculos, como a falta de conhecimento por parte dos planejadores e operadores e a dificuldade em transpor as situações, os dados e os parâmetros reais para suas aplicações. Na Tabela 3.1 estão resumidos os métodos e as técnicas com suas aplicações mais apropriadas. Referências para cada um deles podem ser encontradas em [112].

Tabela 3.1 – Resumo de métodos e técnicas e suas aplicações principais.

Método/Técnica	Aplicações
Análise Analítica	Perdas Elétricas
Análise Exaustiva	Múltiplos Objetivos
Programação Linear	Minimização do Custo de Contingenciamento Maximização da Capacidade da Geração Distribuída Maximização de Energia Eólica Alocação Ótima de Contingenciamento
Fluxo de Potência CA Ótimo	Perdas Elétricas Maximização da Capacidade da Geração Distribuída Minimização de Perdas de Energia
Metaheurística	Maximização da Capacidade da Geração Distribuída Planejamento de Investimentos Múltiplos Objetivos

Fonte: Adaptada de [112].

Além do mais, apontam os autores, no planejamento deve constar uma avaliação de múltiplos objetivos pelos quais alguns dos métodos e técnicas abrangem. Cada proprietário pode ter um fim com sua própria Geração Distribuída e isto pode levar a diferentes impactos. Os seguintes exemplos podem esclarecer este princípio. Para uma pessoa ou empresa que queira vender energia elétrica para o sistema em um mercado livre, seu interesse será gerar a máxima potência, sem se importar com as perdas na rede elétrica. Para uma indústria, além de gerar potência ativa, ela pode utilizar a Geração Distribuída para correção do fator de potência. Por fim, a Geração Distribuída de propriedade de uma concessionária pode usar vários dos recursos da tecnologia empregada para melhorar o funcionamento do sistema.

Outras duas metodologias ainda podem ser empregadas de acordo com [109]. Na primeira, os planejadores quando atuando na configuração da rede elétrica para a segurança e a confiabilidade devem usufruir da Geração Distribuída e não ignorá-la. Se esta já se encontrar presente no sistema elétrico, o que é diferente do que acontece no método da “minimização de custos” onde a Geração Distribuída será posteriormente implantada, os planejadores e operadores podem recalcular o uso dela em detrimento de aumentar reforços convencionais, como instalação de novos transformadores. No lugar de ser vista como uma barreira, a Geração Distribuída poderia ser tratada como mais uma ferramenta para aumento de segurança e confiabilidade. É possível mostrar [109] que para fontes não-intermitentes (e não variáveis; Tabela 3.2), quanto maior a disponibilidade de cada máquina e maior o número de unidades, maior a contribuição na segurança (representado pelo fator F, que pode ser considerado um nível de confiabilidade) e para fontes intermitentes (e variáveis; Tabela 3.3), esta mesma contribuição será tanto maior quanto menor for o tempo mínimo persistente T_m , que é o tempo no qual a geração deve operar continuamente acima de um nível determinado de potência de saída para manter a segurança [50]. Uma combinação dos métodos e técnicas de planejamento e otimização apresentados acima somada com esta metodologia de aproveitamento daria resultados de baixo custo com alta segurança.

Tabela 3.2 – Fatores F para fontes não-intermitentes (e não-variáveis).

Tipo de geração	Número de unidades									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10+
Gás de aterro	63	69	73	75	77	78	79	79	80	80
Cogeração por tratamento utilizando máquina de ignição por faísca	40	48	51	52	53	54	55	55	56	56
Desperdício para energia	58	64	69	71	73	74	75	75	76	77
Turbina a gás de ciclo combinado	63	69	73	75	77	78	79	79	80	80
Cogeração por tratamento utilizando turbina a gás	53	61	65	67	69	70	71	71	72	73

Fonte: Adaptada de [62].

Tabela 3.3 – Fatores F para fontes intermitentes (e variáveis).

Tipo de geração	Persistência, T_m (horas)							
	1/2	2	3	18	24	120	360	>360
Fazenda eólica	28	25	24	14	11	0	0	0
Pequenas hidroelétricas	37	36	36	34	34	25	13	0

Fonte: Adaptada de [62].

Na segunda, somente a capacidade da Geração Distribuída, especialmente a intermitente, é analisada em relação à “geração tradicional”. Para que não ocorra desequilíbrio entre geração e demanda, a produção deve estar sempre acima do valor de pico desta demanda, sendo que o excedente é chamado margem de reserva. A dúvida pertinente é: quanto a Geração Distribuída pode substituir a “tradicional” sem que ocorram problemas no suprimento? O critério de confiabilidade usado para mensurar isto é a probabilidade de perda de carga. Enquanto as centrais “tradicionais”, que são analisadas somente por dois estados de geração, sendo eles máxima potência ou nenhuma, as intermitentes devem ter múltiplos níveis de saída devido a sua variação ao longo do tempo e estes podem ser retirados de dados reais medidos da fonte anteriormente. O estudo inicia-se somente com cálculos para “geração tradicional”, que no valor mínimo de confiabilidade representa o nível de referência. Depois se adiciona estatisticamente a Geração Distribuída (o que aumenta a confiabilidade). Em seguida, vão sendo retiradas partes da “tradicional”. Quando se alcança o nível de referência,

tem-se a confiabilidade desejável. A razão entre a capacidade retirada de “tradicional” e a capacidade instalada de Geração Distribuída é a chamada capacidade de crédito desta Geração Distribuída. Com a capacidade de crédito obtida, é possível abalizar se a entrada da Geração Distribuída em termos de suprimento terá custos mais baixos ou altos e isto dependerá fundamentalmente da fonte escolhida [109].

Ainda há outros pensamentos que podem ser levados para o planejamento. Talvez algo prudente seja uma observação acurada e diária da evolução das cargas, além da análise de várias projeções de aumento delas, mas mais detalhadamente do que já se faz para que as pequenas produções acompanhem este desenvolvimento. Também se deve tentar fazer diferentes previsões do aumento da própria Geração Distribuída com especificação de suas tecnologias. Um mecanismo que faça o equilíbrio efetivo entre o ingresso de Geração Distribuída no sistema elétrico e o aumento das cargas deve ser perseguido. A instalação aleatória sem o respectivo consumo de sua energia produzida pode ser um custo desnecessário.

Além disso, como as concessionárias, as permissionárias e as agências regulamentadoras não possuem mais o mesmo controle que tinham sobre a geração e a distribuição, sobretudo em mercados desregulamentados, elas podem agir de modo a elevar o desempenho do sistema como um todo incentivando ou desestimulando a instalação da Geração Distribuída quando ligadas na rede elétrica, assim como a tecnologia usada por ela e a sua localização. Como possuem o conhecimento técnico necessário para estas decisões, elas podem passar a ter um relacionamento mais próximo do consumidor-produtor independente para que este tenha informações para as melhores decisões a serem tomadas para toda a coletividade. Isto é fundamental para que nem o próprio órgão que opere o sistema, nem a vizinhança de uma Geração Distribuída possam sofrer as consequências em termos de danos e custos. O diálogo neste contexto será fundamental. Algo inconcebível anteriormente no planejamento do sistema elétrico, este pode ser um ponto crucial futuramente.

Este é somente um número pequeno apresentado das ideias para o planejamento do sistema elétrico. Contudo, como já deve ter ficado claro, a complexidade neste tema não só permanece alta, como deve ser ainda maior, visto que não é só a Geração Distribuída que deve fazer parte da rede elétrica. Veículos elétricos, armazenamento de energia, microrredes (*microgrids*), redes elétricas inteligentes (*smart grids*) com seus dispositivos de comunicação e controle e cargas controláveis são alguns dos itens que em um futuro não muito distante estarão presentes em massa no sistema elétrico e que tornarão as já difíceis tarefas de planejamento e operação ainda mais árduas.

3.1.11 - Quantificando a Entrada da Geração Distribuída: a Capacidade de Hospedagem

Para que o planejamento seja lúcido foi criado um método para quantificar e ser discutida a introdução da Geração Distribuída, assim como de novas cargas no sistema elétrico. A esta ferramenta deu-se o nome de “capacidade de hospedagem”. Sintetizando, no caso da Geração Distribuída, ela permite indicar em quantidade se sua inserção está melhorando ou deteriorando o desempenho do sistema elétrico em um aspecto ou fenômeno determinado. Mais precisamente, a capacidade de hospedagem é o ponto no qual a quantidade

de Geração Distribuída faz com que o índice de desempenho torne-se baixo ou alto suficiente para ser inaceitável o aumento da inserção de Geração Distribuída, de acordo com os limites dados para certo aspecto ou fenômeno [24]. Estes aspectos ou fenômenos podem ser de uma grande diversidade, tais como sobrecarga, perdas, injeção de harmônicas, regulação de tensão, variações de tensão de curta e longa duração, etc. Este assunto será discutido com mais detalhes em seção posterior. Porém, deve ser destacado que esta é uma abordagem muito importante no planejamento.

3.1.12 – Uma Nova Estrutura do Sistema Elétrico

O sistema elétrico passará por várias mudanças com a introdução crescente de Geração Distribuída. Aqui foram discutidas muito mais as maneiras de se agir com estudos, estratégias e operações sobre isso do que com transformações físicas na estrutura do sistema elétrico ou inserção de outros aparelhos. Estas modificações são, contudo, inevitáveis e devem também fazer parte dos pontos levantados na hora do planejamento. Dentre as tecnologias mais importantes para o “novo sistema elétrico” estão: a introdução maior de dispositivos de armazenamento de energia e as novas composições das microrredes (*microgrids*) e das redes elétricas inteligentes (*smart grids*). Estes três casos introduzirão junto com a Geração Distribuída novos equipamentos, além de mais alterações no planejamento e na operação. Por se tratar de tema mais complexo, a introdução destes artefatos e a edificação destas novas estruturas físicas serão discutidas na última seção deste capítulo de maneira mais minuciosa.

3.2 – As Tecnologias de Geração Distribuída

As fontes energéticas de Geração Distribuída já foram discutidas no capítulo anterior. No entanto, para compreender as implicações que ela tem no sistema elétrico, é preciso entender o mínimo do funcionamento de cada uma das tecnologias. Com efeito, uma das particularidades que diferencia a Geração Distribuída da “geração tradicional” é justamente sua diversidade. Sendo assim, nesta seção, estes aparelhos serão apresentados em termos técnicos resumidamente. Não serão dados muitos detalhes dos processos físicos envolvidos, nem sobre os modelos e materiais ou sobre o modo de construção. Aqui o texto se atém tão-somente às questões mais importantes para o desenvolvimento do restante do trabalho.

Existem várias obras tratando destas tecnologias, principalmente as renováveis. Os livros já citados [109, 24, 55] discorrem sobre elas de forma sumária, cada um com uma perspectiva diferente. Recomenda-se para uma introdução simples no assunto o livro *Energia e Meio Ambiente* de Hinrichs e Kleinbach [96]. Já o livro *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future* de Boyle [33] trata minuciosamente as energias renováveis. O livro de Patel [153], aludido no capítulo anterior, também apresenta muitas informações, principalmente sobre energia eólica e solar fotovoltaica. Mais especificamente sobre estas duas últimas tecnologias, recomenda-se [158, 2] para a primeira e [179, 115] para a segunda. O artigo [61] dá um panorama recente (2014) das energias renováveis. O que segue sobre cada uma das tecnologias nesta seção é baseada inteiramente nestas referências e nos outros

artigos citados ao longo de todo o trabalho, mas o leitor pode encontrar diversas outras sobre os temas.

As subseções para cada uma das tecnologias são organizadas da seguinte maneira. Inicialmente, é feita uma rápida explicação sobre como é a conversão da energia da fonte para a energia elétrica e qual é sua forma elétrica final (CC ou CA). Em seguida, pontos na medida da importância para o texto são levantados, tais como materiais e configurações dos equipamentos, além das relações elétricas abarcadas, como curvas de corrente e tensão e o relacionamento entre a potência elétrica de saída e o fenômeno da fonte de entrada.

3.2.1 – A Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é aquela que transforma energia da radiação eletromagnética solar em energia elétrica. A conversão é feita por meio de células que são integradas entre si para formar placas (módulos). Estas, por sua vez, são ligadas em série (formação comumente chamada *strings*), em paralelo e em série-paralelo para aumentar a tensão, a corrente e a potência em geral do conjunto formando arranjos. De qualquer maneira, a saída obtida é CC. As aplicações vão de pequenas células em aparelhos portáteis até placas em telhados para consumo residencial, de um único módulo em sistema isolado para abastecimento de eletricidade onde não há rede elétrica até grandes parques com inúmeros arranjos de alta potência conectados ao sistema de transmissão.

Há, portanto, uma relação inseparável de como a luz do sol chega às placas e a quantidade de energia produzida por elas. Sendo assim, a energia solar fotovoltaica depende da posição do sol no céu, das mudanças ao longo do tempo, do dia para a noite, das estações do ano, da atmosfera (massa de ar), das nuvens, da poluição, do ângulo e da posição em que se encontram os módulos, de sombras e da posição geográfica. Como será visto adiante, são estas as peculiaridades que fazem desta tecnologia variável e intermitente.

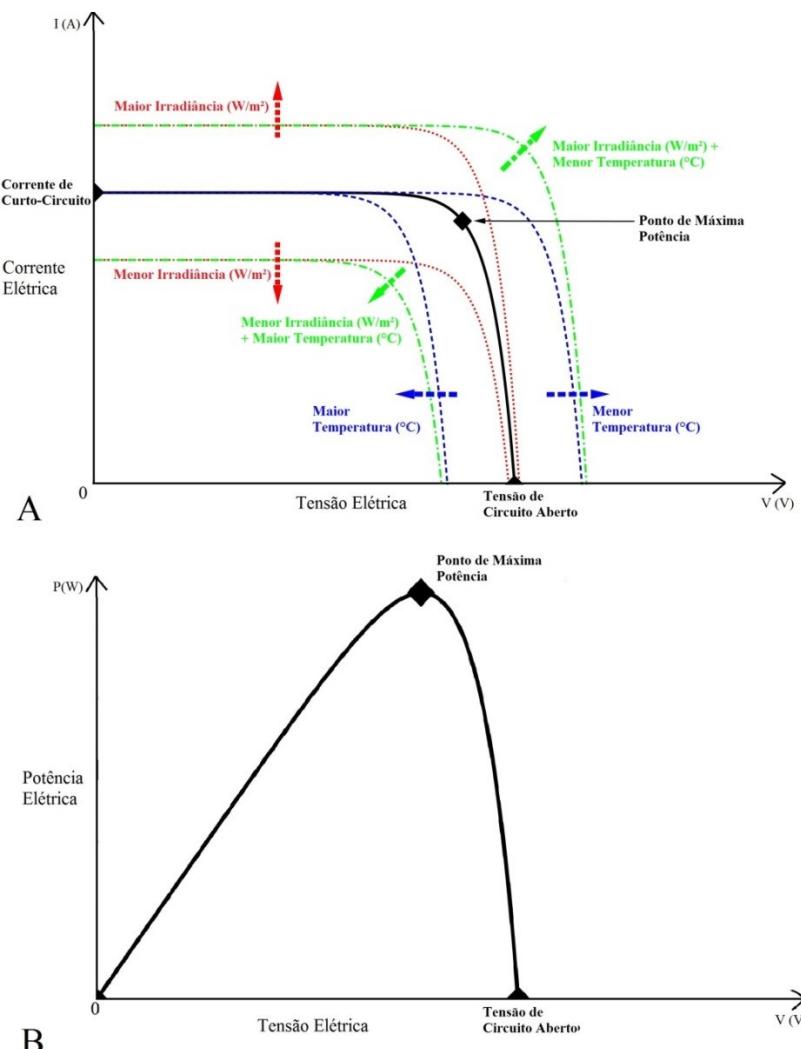
A radiação solar pode ainda ser dividida em direta, onde a luz do sol incide diretamente no plano, difusa, pelo qual a luz chega indiretamente através da difusão e reflexão em outros materiais e a global ou total que é a soma das duas. As medições da energia solar, por sua vez, são dadas de duas formas. A primeira é a irradiância, que é a potência por área (W/m^2) e a segunda é a irradiação (ou insolação), que mede a energia por área, comumente dada em Wh/m^2 . Os autores trocam estes nomes ou até usam outros. O que é importante é notar que a medida da energia solar, principalmente ao longo de determinado tempo, é dada por W/m^2 ou Wh/m^2 e que estes valores obtidos possibilitam saber quanto as células fotovoltaicas vão produzir de eletricidade. São estes valores também que são determinados pelas alterações citadas no parágrafo anterior.

Para fazer a conversão da energia solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico, diversos materiais são utilizados para as células. Os mais comuns atualmente são aquelas feitas de semicondutores, especialmente as células de silício monocristalino e as de silício policristalino. Cada uma delas possui um método de produção, assim como eficiências diferentes, sendo que as primeiras são mais caras e difíceis de serem feitas, mas apresentam eficiências mais altas (até cerca de 20%), enquanto as segundas são mais baratas e fáceis de produzir, mas têm eficiências menores (até cerca de 15%). Há ainda a categoria de filmes

finos que faz uso de materiais diversos e quantidade reduzida para criação de células inteiras bastante finas em vários tamanhos, não existindo distinção entre célula e módulo. Podem ser mencionadas ainda as células de silício amorfo, de mono-junção, de multi-junção e até orgânicas. A Figura 2.4 do capítulo anterior apresenta todos estes materiais, assim como a evolução das eficiências de cada um.

É importante ressaltar que a corrente elétrica produzida e, consequentemente, a potência é proporcional à área das células fotovoltaicas. Por outro lado, o aumento da temperatura diminui a tensão e vice-versa e, assim, a potência. Com estas duas propriedades, é possível traçar duas curvas características muito importantes nos estudos da energia solar fotovoltaica, a curva I-V (Figura 3.3A) e a curva P-V (Figura 3.3B). Observando a curva I-V na Figura 3.3A, vê-se que ela possui deslocamentos vertical para mudanças na irradiância e horizontal, para aumento ou diminuição de temperatura. Alterações em conjunto nos dois fenômenos claramente causam deslocamentos simultâneos.

Figura 3.3 – A. Curva característica I-V mostrando mudanças de corrente e tensão devido a alterações de, respectivamente, irradiância e temperatura. **B.** Curva característica P-V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser isolados (autônomos) ou conectados à rede elétrica. No primeiro caso, a potência CC pode estar em uma das seguintes situações: ser

diretamente usada por dispositivos CC; carregar baterias ou banco de baterias, necessitando de um controlador de carga; ser utilizada por equipamentos CA, pelo qual é preciso um conversor CC-CA. Estes dois podem ser usados em conjunto. No segundo caso, o sistema deve obrigatoriamente ser ligado a um inversor que permita uma saída igual àquela do sistema elétrico em que está conectado (mesma tensão e frequência). O que for produzido pode ser consumido pelas cargas localmente e o excedente pode ser exportado para a rede elétrica. Da mesma forma que nos sistemas isolados, é possível fazer uso de baterias para armazenar a energia produzida para uso em momentos diferentes.

Para alcançar o melhor desempenho dos módulos fotovoltaicos, dois métodos são comumente usados. O primeiro permite que as placas se movam para seguir a posição do sol (*tracker*), recebendo o máximo de sua radiação direta. Este movimento é habilitado por dois eixos, um que faz a placa ir do leste até oeste rastreando o sol durante o dia e outro que altera o ângulo do módulo fotovoltaico com o solo ao longo das mudanças de posição do sol ao longo do ano. O segundo é a aplicação do recurso de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*) que faz com que os módulos fotovoltaicos trabalhem sempre produzindo a máxima potência, sendo levadas a atuarem no “joelho” da curva I-V ou no pico da curva P-V, nomeado ponto de máxima potência (*Maximum Power Point - MPP*), para quaisquer irradiancias e temperaturas, independente de como está recebendo luz. Existem diversas técnicas para isso, tais como a de Perturba e Observa (P&O), Condutância Incremental, Tensão Constantes, etc.

3.2.2 – A Energia Eólica

A energia eólica é a energia cinética dos ventos transformada em mecânica e, por fim, em elétrica. Turbinas são ligadas a algum tipo de gerador elétrico rotativo. Estas turbinas podem ser de dois tipos: eixos vertical ou horizontal. Os primeiros são pouco utilizados, mas têm duas vantagens, que são a ausência de controles de ajuste e a possibilidade da instalação do seu maquinário todo no solo. Porém, justamente por estarem mais próximas do solo, estas turbinas recebem ventos que possuem velocidades baixas. As turbinas de eixo horizontal, por sua vez, podem ser construídas com torres muito altas que beneficiam de ventos de alta velocidade. Além disso, o vento incide perpendicularmente nas pás, trazendo alta eficiência. Fora isso, com os devidos métodos de controle e os projetos corretos das pás, a potência produzida é alta. Existem diversos tamanhos, alturas e potências de turbinas eólicas que crescem cada vez mais. Destes, o modelo de três pás de grande porte é o mais aceito atualmente [158].

A potência (W) de uma turbina eólica, fator mais importante em termos técnicos da tecnologia de Geração Distribuída, depende da densidade do ar ρ (1,2 kg/m³), da área ocupada pelas pás A (m²), da velocidade do vento v (m/s) e do coeficiente de potência da turbina C_p , que representa a eficiência da turbina, e é dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (1)$$

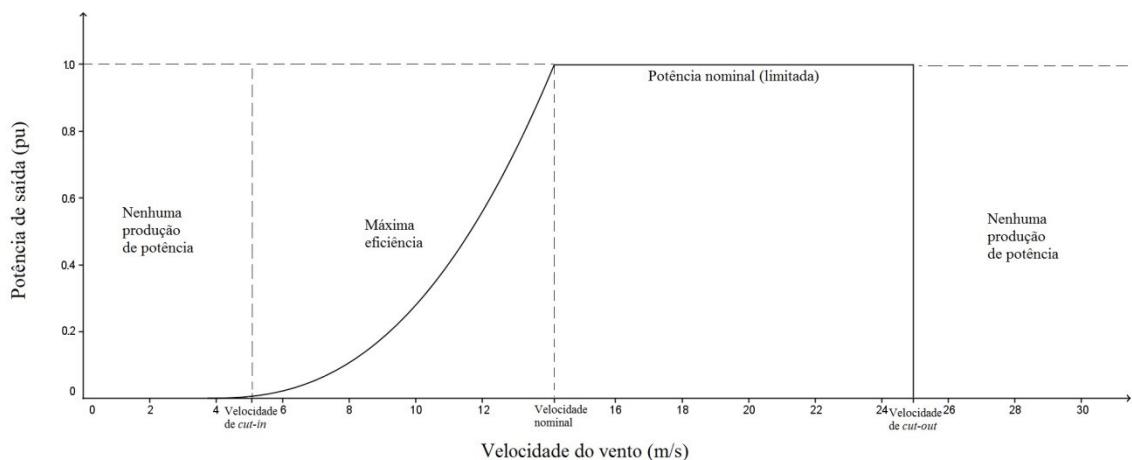
Como a potência é função do cubo da velocidade dos ventos, entende-se por que este termo é tão importante no momento de instalação e operação de uma turbina eólica e como

suas variações ao longo do tempo afetam tanto a previsibilidade de produção. É importante notar que existe para o coeficiente de potência um máximo teórico chamado limite de Betz, que vale $C_{p_{máx}} = \frac{16}{27} = 59,3\%$.

Há três tipos principais de controle de velocidade das turbinas. O primeiro é o controle de estol ou passivo (*stall control*), no qual as pás são fixas, mas em velocidades altas, a posição delas entra em estol, sem produzir força de sustentação, diminuindo a eficiência e limitando a potência [153]. O segundo é o controle de passo (*pitch control*), onde a velocidade do rotor é controlada a partir do giro das pás que diminuem seus ângulos de acordo com o aumento da velocidade do vento. Por fim, o terceiro é o método do estol ativo (*active stall*), onde as pás giram, mas no lugar de diminuírem o ângulo com as velocidades mais altas, elas são manipuladas para causarem um estol. Outro componente que pode estar incluído ou não é a caixa de engrenagens, que faz a mudança das baixas velocidades da turbina para as velocidades adequadas dos geradores. A adesão ou não deste equipamento depende da configuração da turbina, como será visto mais adiante.

A turbina eólica funciona com certas restrições de produção devido aos próprios requisitos dos componentes, devido à sua eficiência e para evitar agravos aos equipamentos. Isto fica mais claro observando a curva simplificada da potência em função da velocidade do vento da Figura 3.4, onde a potência é dada em por unidades (pu) e a velocidade em metros por segundo (m/s). Até uma velocidade de cerca de 5 m/s, chamada velocidade de *cut-in*, a turbina não gira e não produz potência, visto ser ineficiente. Depois disso, a potência cresce com o cubo da velocidade como a equação determina. É também nesta região que se tem a máxima eficiência C_p . Quando chega a velocidades altas, passando de sua velocidade nominal, que está por volta de 15 m/s, a potência é limitada e mantida constante (nominal) para evitar sobrecarga do gerador e dos dispositivos de eletrônica de potência, quando possui. Ao alcançar uma velocidade extremamente alta (normalmente, 25 m/s), nomeada velocidade de *cut-out*, a turbina é desligada para evitar danos mecânicos.

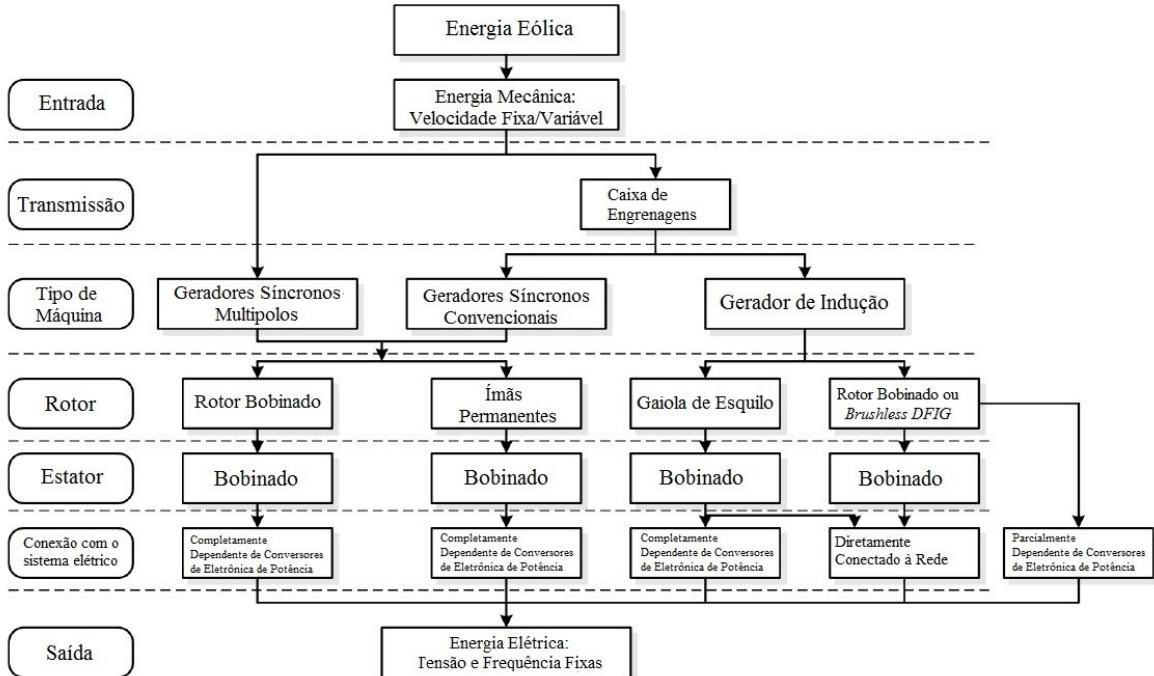
Figura 3.4 – Curva simplificada da potência em função da velocidade do vento para uma turbina eólica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para finalizar, a Figura 3.5 ilustra, resumidamente, todas as trajetórias possíveis atualmente da energia eólica para produção de eletricidade. A energia dos ventos pode ser transformada em elétrica de diversas maneiras até chegar ao sistema elétrico. Todos estes métodos serão vistos com mais detalhes mais adiante ainda neste capítulo.

Figura 3.5 – Possíveis trajetórias de uma turbina da energia eólica até a energia elétrica.



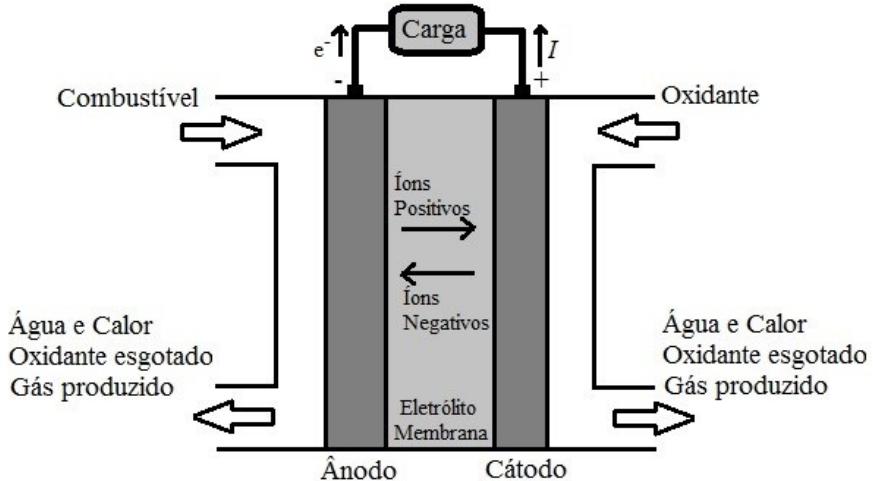
Fonte: Adaptado de [180], conforme representado em [20].

3.2.3 – As Células a Combustível

As células a combustível são dispositivos estáticos sem peças intermediárias que convertem energia química em elétrica com alta eficiência, tendo água e calor como únicos resíduos, desde que seja fornecido combustível. Sendo assim, podem produzir emissões praticamente nulas de gases do efeito estufa, além de não produzirem ruídos sonoros altos. A densidade de energia pode chegar a ser de 200 Wh/l, algo em torno de dez vezes aquela de uma bateria [40].

Elas são compostas por dois eletrodos, um cátodo e um ânodo, separados por um eletrólito/membrana. O ânodo recebe continuamente o combustível que fornece hidrogênio e o oxidante ou o oxigênio chega até o cátodo. No eletrólito/membrana, em qualquer um dos casos, há o surgimento e a passagem de íons (a maioria de hidrogênio) positivos ou negativos que atravessam de um eletrodo para outro. Enquanto isso, os elétrons liberados no ânodo não conseguem fazer o mesmo e se recombinar, porque o eletrólito/membrana age como um isolante. No entanto, um caminho até o cátodo por um circuito elétrico externo pode ser feito. A partir deste circuito é que se obtém energia elétrica. Já o resultado da recombinação dos íons nos eletrodos forma água pura ou oxidante esgotado e calor [116]. A Figura 3.6 apresenta uma ilustração do funcionamento de uma célula a combustível genérica.

Figura 3.6 – Representação genérica da operação de uma célula a combustível.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As células a combustível podem ser classificadas em seis diferentes grupos em decorrência do eletrólito e do combustível empregados [116]: a de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC*), que pode ser dividida ainda nas de ácido fórmico direto (*Direct Formic Acid Fuel Cell - DFAFC*) e de etanol direto (*Direct Ethanol Fuel Cell - DEFC*); as alcalinas (*Alkaline Fuel Cell - AFC*), também dividida em duas outras categorias, a de próton cerâmica (*Proton Ceramic Fuel Cell - PCFC*) e de borano (hidreto de boro) direto (*Direct Borohydride Fuell Cell - DBFC*); as de ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Fuell Cell - PAFC*); as de carbono fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC*); as de óxido sólido (*Solid Oxide Fuel Cell - SOFC*); as de metanol direto (*Direct Methanol Fuel Cell – DMFC*). Cada um possui suas vantagens e desvantagens, assim como determinadas aplicações. Estas não serão discutidas aqui, mas podem ser vistas com detalhes em [116, 40] e na Tabela 3.4, que resume cada categoria com todas as principais características.

Outra grande vantagem de algumas das células a combustível que deve ser destacada é a possibilidade de cogeração [40]. O calor liberado por elas pode ser usado para diversas atividades, tais como para criar vapor e aquecimento. Ele também pode ser reutilizado como reformador interno para converter o combustível gasoso nos componentes necessários.

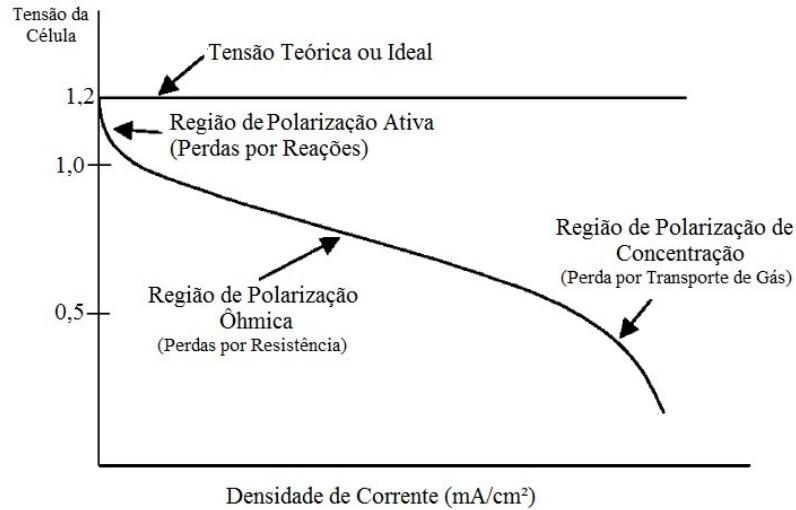
Em termos elétricos [40], a saída de uma célula a combustível é CC e sua tensão é pequena, em torno de 1,2 V, que é seu máximo teórico. Assim como os módulos fotovoltaicos, células a combustível podem ser conectadas em série para aumentar a tensão e também em paralelo para elevar a potência do sistema. Uma curva de tensão por densidade de corrente (característica V-I), vista na Figura 3.7, mostra que há uma região linear pela natureza ôhmica da célula, devido às perdas pela resistência dos componentes internos. Ao aumentar a densidade de corrente, a tensão cai rapidamente com a redução da eficiência das trocas de gás. Já com baixa densidade, as perdas ôhmicas são amenizadas e a tensão aumenta pelas reações químicas.

Tabela 3.4 – Comparação das diferentes categorias de células a combustível.

Parâmetros	Tipos de células a combustível					
	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Eletrólito	Membrana Polimérica Sólida (NAFION)	Solução Líquida de KOH	Ácido Fosfórico (H₃PO₄)	Carbonato de Lítio e Potássio (LiAlO₂)	Eletrólito de Óxido Sólido Estabilizado (Y₂O₃,ZrO₂)	Membrana Polimérica Sólida
Temperatura de Operação (°C)	50-100	50-200	~200	~650	800-1000	60-200
Reação de Ânodo	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2 + 2(OH^-) \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$H_2O + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$H_2 + O^2 \rightarrow H_2O + 2e^-$	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6H^-$
Reação de Cátodo	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2 + H_2O 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	$3O_2 + 12H^+ + 12H^- \rightarrow 6H_2O$
Carregador de Carga	H⁺	OH⁻	H⁺	CO₃²⁻	O²⁻	H⁺
Combustível	H₂ Puro	H₂ Puro	H₂ Puro	H₂, CO, CH₄, outros hidrocarbonetos	H₂, CO, CH₄, outros hidrocarbonetos	CH₃OH
Oxidante	O₂ no ar	O₂ no ar	O₂ no ar	O₂ no ar	O₂ no ar	O₂ no ar
Eficiência	40-50%	~50%	40%	>50%	>50%	40%
Cogeração	-	-	Sim	Sim	Sim	Não
Tensão de Célula (V)	1,1	1,0	1,1	0,7-1,0	0,8-1,0	0,2-0,4
Densidade de Potência (kW/m ³)	3,8-6,5	~1	0,8-1,9	1,5-2,6	0,1-1,5	~0,6
Capacidade	30 W-250 kW	10-100 kW	100 kW-1,3 MW	155 kW-2 MW	1 kW-1,7 MW	1 W- 1 MW
Aplicações	Residencial; UPS; serviços emergenciais; indústria; transporte; comercial	Transporte; ônibus espacial; equipamentos portáteis	Transporte; cogeração comercial; equipamentos portáteis	Transporte; indústria; usinas de energia elétrica	Residencial; usinas de energia elétrica; cogeração comercial; equipamentos portáteis	Substituição de baterias em celular, computador e outros portáteis
Vantagens	Alta densidade de energia; rápida inicialização; eletrólito sólido não corrosivo	Alta densidade de energia; rápida inicialização	Produz calor residual de alto grau; característica estável de eletrólito	Alta eficiência; não há necessidade de metais catalíticos	Eletrólito sólido; alta eficiência; produz calor residual de alto grau	Custo reduzido devido à ausência de reformador de combustível
Desvantagens	Catalisador de platina caro; sensível a impurezas de combustível	Catalisador de platina caro; sensível a impurezas de combustível	Eletrólito líquido corrosivo; sensível a impurezas de combustível	Alto custo; eletrólito líquido corrosivo; inicialização lenta; intolerância a enxofre	Alto custo; inicialização lenta; intolerância a enxofre	Baixa eficiência e densidade de energia

Fonte: Adaptada de [116].

Figura 3.7 – Característica V-I de uma célula a combustível.



Fonte: Adaptado de [40], conforme representado em [18].

3.2.4 – As Pequenas Hidroelétricas

As hidroelétricas são uma das formas mais antigas de geração de energia elétrica e, por isso, são altamente confiáveis, eficientes e compreendidas. A maior diferença entre as grandes centrais hidroelétricas da “geração tradicional” para as pequenas hidroelétricas está realmente no tamanho. Enquanto estas precisam de quantidades menores de água para produção de eletricidade, aquelas necessitam de volumes enormes do líquido. Como há essa distinção, as pequenas hidroelétricas são mais facilmente instaladas e usufruem de uma quantidade muito maior de locais para isso. A operação, porém, é a mesma em qualquer um dos casos, excetuando as adaptações.

As hidroelétricas aproveitam os fluxos de água em rios provenientes dos ciclos naturais d’água e dos desníveis entre uma região e outra para gerar eletricidade. A vazão de água é direcionada até turbinas que, ao serem movimentadas, acionam um gerador elétrico, produzindo potência elétrica CA. As turbinas hidráulicas mais comuns usadas são a Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo. A aplicação de cada uma depende da vazão e da altura da queda d’água. A potência (W) delas é dada por:

$$P = \eta Q \rho g H \quad (2)$$

em que η é a eficiência total, Q é a vazão (m^3/s), ρ é a densidade da água (1000 kg/m^3), g é a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) e H é a altura efetiva de queda d’água (m).

Existem duas configurações de sistema hidrelétrico. A primeira é chamada de reservatório, armazenamento ou acumulação. Para ela, são usados lagos naturais a montante ou são edificadas barragens, fazendo alagamentos, que servem para estocar certa quantidade de água que pode ser liberada para geração de energia elétrica. A produção pode seguir a demanda.

O segundo tipo, chamado de fio d’água ou de desvio, tem acumulação mínima ou nenhuma. Ele faz proveito da velocidade natural das águas de um rio para girar as turbinas.

Depende, assim, das vazões disponíveis no momento e, consequentemente, das precipitações. Em épocas de estiagem, a produção por esta configuração pode ser nula. As variações podem ocorrer diariamente.

3.2.5 – A Cogeração

A cogeração (também conhecida pelo termo inglês *Combined Heat and Power – CHP*) se trata mais de uma técnica de geração de energia elétrica do que uma tecnologia. A usina de cogeração pode advir, portanto, de diversas fontes diferentes, tais como grandes usinas termelétricas, pequenos geradores térmicos e mesmo de energia de biomassa e células a combustível. A cogeração pode ser definida como a produção simultânea de energia elétrica e calor útil.

Ela pode ser usada para processos industriais, agricultura e aquecimento distrital. Assim, a eficiência térmica do sistema pode passar de cerca de 40% a 90% quando se tem demanda constante e bem definida, como é o caso de várias indústrias [24]. Nas elas é possível a geração de vapor para várias aplicações. No entanto, isto dependerá essencialmente desta demanda de calor. Ele, por sua vez, é um subproduto da produção de eletricidade. Desta forma, o calor estará subordinado ao quanto se consome de energia elétrica. Cada tecnologia permite uma proporção entre eletricidade e calor gerados.

Um conceito que tem ganhado espaço é o da microcogeração (*micro-CHP*). A diferença desta para a cogeração convencional está somente na capacidade. Ela é empregada geralmente em residências, escritórios, hotéis e comércios, com geração de energia elétrica para consumo e calor para aquecimento local. Os pequenos geradores térmicos, como aqueles de combustão interna, e a energia de biomassa podem ser escolhidos. Outra opção mais recente são alguns modelos de células a combustível, tais como o PAFC, o MCFC e o SOFC, como mostra a Tabela 3.4.

3.2.6 – A Energia de Biomassa

A energia de biomassa (ou bioenergia) é a conversão da energia armazenada em materiais de origem vegetal ou animal em eletricidade e/ou calor. As plantas guardam a energia que geraram vinda do sol pelo processo de fotossíntese. Esta energia é repassada para os animais através da cadeia alimentar. Assim, diversas plantas, produtos agrícolas, dejetos animais, restos de comida e vários outros materiais formam o grande conjunto de biomassa.

Ela pode vir de plantações especificamente para bioenergia (biomassa primária) ou pode vir de resíduos e coprodutos (biomassa secundária), como restos da produção agrícola, como acontece com o bagaço da cana-de-açúcar, e de dispensa de materiais, como é o caso dos lixos compostos de resíduos municipais, animais, comerciais e industriais de origem orgânica [33]. Os biocombustíveis são combustíveis líquidos ou gasosos advindos da biomassa, tais como o etanol, originário principalmente de restos de milho e de cana-de-açúcar, e o biodiesel, que podem vir de óleos naturais até gorduras animais. Uma grande

vantagem destes biocombustíveis é que podem ser transportados e armazenados mais facilmente que a biomassa sólida.

Os processos para chegar à produção de potência elétrica podem ser térmicos ou químicos, aglomerando combustão, pirólise, gaseificação e digestão aeróbica [61]. Para geração de energia elétrica, o procedimento final pode ser feito por máquinas elétricas rotativas se houver queima da biomassa, usando vapor como em uma termelétrica “tradicional”, máquinas de combustão interna ou microturbinas. Quando, por exemplo, em algum destes processos é liberado metano ou se obtém etanol, a biomassa ou o biocombustível pode servir como matéria-prima para produzir eletricidade com células a combustível. Na primeira opção, a potência de saída é CA e nesta última, ela é CC. Como calor também pode ser liberado, a cogeração é uma opção para a bioenergia, aumentando a eficiência do sistema ou sendo usado em outros empreendimentos. Se feita a reserva da biomassa ou do biocombustível, a energia elétrica pode ser gerada de forma controlada e previsível.

3.2.7 – Os Pequenos Geradores Térmicos

Os pequenos geradores térmicos formam junto com as pequenas hidroelétricas as primeiras fontes de Geração Distribuída existentes desde o final do século XIX. Apesar disso, as tecnologias evoluíram e novos geradores apareceram desde então. Seu funcionamento é baseado na transformação de energia térmica em mecânica que, então, é usada para produção de energia elétrica. Atualmente, estas pequenas máquinas têm sido usadas com biomassa e biocombustíveis além dos habituais combustíveis fósseis, tornando-as mais atrativas em termos ambientais. Outra vantagem considerada ultimamente para estas máquinas, como já citada, é a cogeração. Existem três tecnologias empregadas: a máquina recíproca (*Reciprocating Engine*), as turbinas a gás ou combustão e as microturbinas.

As máquinas recíprocas convertem a energia obtida a partir da queima de algum combustível em movimento de pistões que, por sua vez, fazem girar um eixo produzindo energia mecânica que, finalmente, atua sobre um gerador produzindo eletricidade. Elas podem ser divididas ainda em três categorias. A primeira é a das máquinas de combustão interna ou de explosão que, como o nome indica, produz os movimentos necessários através da queima de uma mistura de combustível, que pode ser o diesel, gasolina, gás natural e biodiesel, com ar internamente à máquina. Ela pode ser de ignição por faísca ou por compressão. As outras duas categorias são de combustão externa. A segunda compreende as máquinas a vapor que fazem valer desta substância para mover os pistões, enquanto que a terceira é a máquina *Stirling* que opera um ciclo termodinâmico fechado de compressão e expansão contínuo. Pela simplicidade, esta última tem grande potencial na microcogeração e em pequenos geradores de energia solar térmica concentrada como será visto adiante. Em qualquer uma das categorias, normalmente a velocidade é relativamente baixa e controlada de tal modo que são ligadas diretamente na rede elétrica por geradores síncronos ou de indução.

As duas últimas tecnologias possuem princípio de funcionamento similar, sendo que as maiores distinções entre as duas estão na construção e na operação. As turbinas a gás ou combustão levam à produção de energia elétrica a partir da queima de algum combustível (gás

natural, álcool, diesel, etc.) que faz girar uma turbina acoplada a um gerador elétrico. Nas microturbinas o mesmo ocorre. A diferença é que nas primeiras há caixas de engrenagens que adaptam a velocidade e a frequência da turbina às dos geradores. Elas são de porte maior e comumente empregam geradores síncronos, sendo conectados diretamente ao sistema elétrico.

As microturbinas são uma tecnologia recente, sendo muito menores e compactas que a outra, visto que sua turbina é ligada diretamente no gerador em um único eixo de rotação, sem caixas de engrenagens. Por essa razão, a velocidade é altíssima, indo de 50000 rotações por minuto (RPM) até 120000 RPM com alta frequência, e, por isso, geralmente o gerador empregado é o síncrono de ímã permanente [15]. Sendo assim, a conexão à rede elétrica não pode ser direta. Por serem pequenas e poderem produzir calor excedente, elas são uma opção ideal para microcogeração, mas também para cogeração em instalações industriais.

3.2.8 – As Energias Oceânicas

As energias oceânicas (ou marinhas) agrupam diferentes tecnologias, todas instaladas nos mares e usando algum fenômeno associado aos oceanos. Apesar de todas terem um enorme potencial, elas se encontram ainda em estágio de pesquisas e não são comerciais. Apesar disso, serão apresentadas aqui algumas destas tecnologias. Maiores informações podem ser encontradas nos capítulos 6 e 8 de [33]. Os três fenômenos físicos comumente aproveitados para geração de energia elétrica nos oceanos são as marés, as ondas e as correntes marítimas.

A atração mútua pela gravidade entre a Terra e a lua faz com que os mares se elevem e se abaixem ao longo do dia e esta variação no nível das águas é chamada maré. O modo mais comum para produção de energia elétrica por este método é através da instalação de barragens. Turbinas são submersas na água abaixo destas construções e a diferença no nível da água entre os dois lados delas disponibiliza energia potencial que, pela passagem sob a barragem, é convertida em energia cinética. As turbinas acionadas giram o rotor de um gerador elétrico.

Os ventos podem exercer forças nos oceanos, fazendo com que suas superfícies sejam alteradas em forma de ondas. Para usufruir da energia delas, diferentes técnicas são usadas. Todas reagem às forças das ondas de maneira apropriada. Elas podem, entretanto, ser distinguidas em duas formas de instalação. Uma delas é através da fixação no fundo dos mares da estrutura e servem para os litorais. A outra inclui a instalação de diferentes tipos de boias que tem flexibilidade de movimentos com certa referência relativa para produção de energia elétrica e servem para instalações no meio do oceano para aproveitar melhor as ondas do alto-mar [33].

Por diversas forças naturais, nas profundidades dos oceanos existem movimentos de água que são chamadas correntes marítimas. Para gerar eletricidade a partir delas, o que se faz é simplesmente instalar turbinas em locais fundos do mar. O fluxo das águas é capaz de girar esta turbina para acionar um gerador elétrico.

3.2.9 – A Energia Geotérmica

A energia geotérmica é a geração de energia elétrica a partir da energia térmica produzida e armazenada no interior do planeta Terra. A energia geotérmica se encontra acessível em rochas, vapor e água líquida que se encontram nas profundidades da crosta terrestre. Áreas vulcânicas e locais onde existem gêiseres são ideais para energia geotérmica, mas novas técnicas têm permitido que a presença de regiões como estas não sejam obrigatórias. Geralmente se usa o vapor já presente ou ele é produzido pelo calor disponível, ambos servindo para se obter potência elétrica CA por uma turbina e gerador.

Os três tipos básicos de usina empregados são: de vapor seco, de vapor *flash* e de ciclo binário. No primeiro, o mais simples de todos, o vapor de altíssima temperatura é retirado dos reservatórios para ser usado. No segundo, o fluido pode ser vapor que surge de um processo de redução de pressão, o que faz com que ele seja evaporado rapidamente (*flash*), ou água em alta pressão. No terceiro, um fluido secundário (binário) com menor ponto de ebulição que a água é vaporizado para acionar a turbina [33]. Este último é uma das tecnologias promissoras de energia geotérmica para áreas alheias a atividades vulcânicas ou gêiseres. Os sistemas geotérmicos aprimorados (*EGS*) é uma tecnologia mais recente que aproveita das altas temperaturas encontradas em grandes profundidades da superfície terrestre. Novos caminhos ou alargamentos são criados no interior terrestre a partir daqueles já existentes. Água dos poços profundos ou água de temperaturas mais baixas da superfície circulam através de poços de injeção e produção para serem recuperados como água quente ou vapor e, assim, ser produzida eletricidade com turbinas [16]. Como usa energia térmica de temperaturas elevadas, ela serve muito bem para cogeração.

3.2.10 - A Energia Solar Térmica Concentrada

Além do efeito fotovoltaico, a energia solar pode ser convertida em eletricidade indiretamente. A tecnologia empregada para isso é chamada energia solar térmica concentrada. Seu princípio de funcionamento é a concentração dos raios solares para aquecimento em alta temperatura de um líquido ou gás que, por sua vez, aciona um gerador. Existem três estruturas diferentes, chamadas coletores, para realizar esta tarefa [33, 153].

O primeiro é o denominado coletor côncavo, calha parabólica (*parabolic trough*) ou linha de foco (*line focus*). Como expressa o nome, espelhos côncavos em formato de calhas são usados para concentrar a luz solar em seu centro, onde está instalado um tubo. Nele, há a passagem de algum fluido (água ou óleo, o que é mais comum, por exemplo) que, aquecido em 200 °C a 400 °C e transportado, é usado para produzir vapor e, com isso, eletricidade a partir de alguma máquina elétrica rotativa.

O segundo tipo de coletor é o de receptor central ou de torre. Vários espelhos chamados helióstatos, geralmente planos, são instalados e organizados no solo de tal forma que concentrem toda a luz solar em um único ponto, normalmente no topo de uma torre. Lá, a forte concentração permite que uma alta temperatura também produza vapor diretamente ou através de um líquido para ativar um gerador elétrico.

O terceiro e último coletor tem capacidade de potência muito menor que os dois outros, ficando na faixa de dezenas de quilowatts apenas, enquanto aqueles se encontram nas dezenas ou centenas de megawatts. Um espelho parabólico em formato de prato (*parabolic dish*), que designa este coletor, concentra toda a luz solar também em um único ponto, mas cujo sistema receptor é instalado nele próprio para gerar energia elétrica. As temperaturas podem chegar a 1500 °C e o que mais se tem usado para a produção de eletricidade neste caso é a máquina *Stirling* que proporciona alta eficiência e está apta, diferentemente das máquinas a vapor, a trabalhar nestas altíssimas temperaturas [33]. As unidades podem se direcionar automaticamente para o sol para aproveitar o máximo da luz solar ao longo do dia.

3.3 – A Interface com a Rede Elétrica

Qualquer equipamento deve possuir certas propriedades elétricas para ser ligado ao sistema elétrico. Para o correto funcionamento deste devem existir corrente e tensão alternadas (CA) basicamente. Isto quer dizer que, para que não ocorram problemas, a corrente e a tensão que ocupam a rede elétrica devem estar sob padrões dados de operação. No caso, as ondas de corrente e tensão devem ser perfeitamente senoidais com valores e frequência específicos. Geralmente, o que é disponível no sistema elétrico é a tensão, que tem valores nas faixas de 100 V até 500 kV e cuja frequência é de 50 ou 60 Hz. A corrente é determinada pelas cargas. Sendo assim, a potência que chega até o consumo passando pelas redes de distribuição e de transmissão com raras exceções deve seguir estas características. Os equipamentos elétricos de consumo são projetados em sua maioria para serem ligados em CA.

Como este é o modo de operação do sistema elétrico, a Geração Distribuída que for ligada nele deve estar sob estas regras. Ou seja, mesmo que uma tecnologia produza uma potência CC ou CA com forma e valores diferentes do exigido, ela deve ter algum meio para que sua saída final seja o mais próximo daquela que a rede elétrica dispõe. Este meio é chamado de “interface” ao sistema elétrico. Muitas vezes, a mesma tecnologia que faz a conversão da energia da fonte para eletricidade é também uma interface. Em outras situações, equipamentos adicionais são necessários. Além da saída de potência apropriada com tensão e corrente CA equivalentes às da rede elétrica, a interface pode ter outras atribuições e funções que permitem que a Geração Distribuída atue em serviços anciliares, seja controlada e faça o papel ativo da distribuição. Bollen e Hassan destacam os motivos pelos quais é importante estudar as interfaces e como elas impactam o sistema elétrico [24]: elas determinam a qualidade da energia da rede sobre a tecnologia de Geração Distribuída e aquela proporcionada por ela, assim como sua eficiência, sua disponibilidade, seu custo de instalação, sua complexidade de aplicação e seu controle.

Como a operação da Geração Distribuída no sistema elétrico depende essencialmente destes dispositivos de interface, eles serão vistos com mais detalhes nesta seção. A norma IEEE 1547 [103], assim como alguns autores [55, 143] dividem as interfaces em três categorias principais: os geradores síncronos, os geradores de indução (ou assíncronos), que juntos formam o grupo maior das máquinas elétricas rotativas, e os conversores de eletrônica de potência. Apesar desta divisão, muitas vezes máquinas elétricas rotativas são usadas em conjunto com conversores de eletrônica de potência.

3.3.1 – As Máquinas Elétricas Rotativas

As máquinas elétricas rotativas e, em particular os geradores síncronos, foram desde os primórdios do sistema elétrico as interfaces predominantes. As grandes hidroelétricas e termelétricas, assim como as usinas nucleares, todas usam geradores desta categoria para a produção de energia elétrica e interconexão à rede elétrica. Por outro lado, os geradores de indução, apesar de pouco usados até recentemente, têm funcionamento muito similar à operação inversa deste tipo de máquina, ou seja, os motores de indução, que dispõem de muitas informações por serem bastante usadas na indústria. Qualquer uma delas, seja síncrona ou assíncrona, transforma energia mecânica em elétrica. No que segue sobre estas interfaces, será discutido aquilo que é mais importante para a Geração Distribuída, sem empreender minuciosamente sobre cada uma. As referências consultadas foram [75] para os dois tipos de máquinas e [87] para as síncronas em particular.

Uma comparação entre os dois tipos de geradores para aplicações em Geração Distribuída foi feita através de simulações computacionais por Freitas et al. em [79]. Foram examinadas comparativamente as redes de distribuição em estudos de caso sem e com Geração Distribuída, sendo que nesta situação foram incluídos em cada etapa individualmente geradores síncronos com tensão constante, geradores síncronos com fator de potência constante e geradores de indução com capacitores fornecendo reativos em seus terminais. As análises foram feitas para perfil da tensão em regime permanente, perdas de potência ativa, estabilidade da tensão, estabilidade transitória, afundamentos de tensão e correntes de curto-circuito. Por exemplo, pelos resultados obtidos, pode ser observado que no perfil de tensão em regime permanente, em algumas barras as tensões podem alcançar níveis superiores aos limites máximos para geradores síncronos com fator de potência constante quando a demanda é baixa e níveis abaixo dos limites mínimos para geradores de indução quando a demanda é alta. Já em termos de perdas de potência ativa, para demanda máxima todos os geradores melhoraram a situação, com exceção de um número maior de geradores de indução. Na demanda mínima, todos agravam as perdas. Para os outros aspectos técnicos, cada máquina pode levar a uma consequência diferente [79]. Isto demonstra que, na visão do lado da rede de distribuição, as implicações dependendo da máquina são as mais diversas e não é fácil saber qual é melhor ou pior. Assim, é importante que cada caso seja analisado separadamente. Para a escolha final, quando é possível fazê-la para uma mesma fonte, a atenção deve estar não só sobre estes impactos no sistema elétrico, como também em termos do próprio comportamento da fonte e da tecnologia. O mais importante afinal é notar que cada máquina elétrica rotativa traz consigo múltiplos efeitos, bons e ruins.

3.3.1.1 – Geradores Síncronos

Os geradores síncronos são máquinas extremamente robustas. Como foram muito explorados ao longo do tempo, sua construção alcançou níveis altos de qualidade. Possuem velocidade fixa (chamada velocidade síncrona) de funcionamento em regime permanente que é diretamente proporcional à frequência e inversamente proporcional ao número de polos. Portanto, são aplicados em grande parte para fontes de velocidades constantes.

Eles são formados fisicamente por duas partes: o estator e o rotor. O primeiro é a parte imóvel e o segundo a parte girante da máquina. O rotor pode ser de polos salientes, que cobre diversas velocidades (geralmente mais baixas) e potências, com uso bastante difundido nas grandes hidroelétricas; polos lisos ou cilíndricos, que são aplicados para velocidades altas, como é o caso de turbogeradores, e de ímãs permanentes. O enrolamento de armadura, que normalmente se encontra no estator, é onde circula corrente alternada, enquanto no enrolamento de campo, geralmente no rotor, há corrente contínua, o que torna imprescindível uma fonte externa de excitação. Existem sistemas de excitação CC e CA com retificadores (ambos usando pequenas máquinas rotativas), e estáticos, que usam controle e dispositivos de eletrônica de potência. No caso dos geradores síncronos de ímãs permanentes, o enrolamento de campo é substituído por ímãs permanentes e a excitação é feita por estes aparelhos [75]. Microturbinas, turbinas eólicas e pequenas hidroelétricas podem fazer uso destes últimos.

A saída destes geradores é CA (trifásica na maioria das vezes). É uma máquina versátil, podendo produzir tanto potência ativa quanto reativa, sendo que esta última também pode ser absorvida, enviada ou nem existir. Para serem ligados ao sistema elétrico e funcionarem em paralelo, é indispensável fazer a sincronização das máquinas. Diferentes técnicas e equipamentos podem ser aplicados, mas, no fim, os geradores ligados devem ter forma de onda, valor eficaz, frequência, defasamento angular e sequência de fases iguais ao do sistema elétrico ou das máquinas em paralelo [87]. Para Geração Distribuída, as máquinas síncronas podem ser usadas para energia eólica, pequenas hidroelétricas, cogeração, energia de biomassa, pequenos geradores térmicos, energia geotérmica e energia solar térmica concentrada. Especificamente para eólica, pequenas hidroelétricas de fio d'água e microturbinas os geradores síncronos de ímã permanente são uma opção empregada.

3.3.1.2 – Geradores de Indução

As máquinas de indução, também chamadas máquinas assíncronas, são amplamente utilizadas, mas até pouco tempo atrás quase que exclusivamente como motores, sendo que este tipo, por sua vez, é um dos mais importantes na indústria. Na maioria das aplicações como geradores estas máquinas eram vistas como não satisfatórias [75]. Todavia, esta perspectiva tem mudado radicalmente com a ampliação no emprego da Geração Distribuída.

Os geradores de indução são construídos da mesma forma que um gerador síncrono com um estator e um rotor. No entanto, aqui além do estator ainda ser CA, o rotor também o é. A construção do rotor pode ser do tipo bobinado, que é formado por um enrolamento polifásico igual ao do estator com mesmo número de polos, e do tipo gaiola de esquilo, em que o enrolamento é composto por barras condutoras permeando ranhuras do rotor e curto-circuitadas em anéis condutores [75].

Diferentemente das máquinas síncronas, a velocidade das assíncronas não é fixa, como indica o nome. Existe uma diferença quando de sua operação entre a velocidade em que gira o rotor e aquela do campo do estator (velocidade síncrona). A esta diferença dá-se o nome escorregamento. Enquanto para motores o escorregamento é positivo, para geradores ele é negativo. De fato, para uma máquina destas funcionar como gerador, basta que ela seja alimentada com tensão alternada em seu estator, mas em contraste com o motor, seja aplicado

um torque no rotor que faça com que este tenha velocidade superior à síncrona. A maior diferença entre um gerador e um motor é essa e é por essa razão que os geradores de indução são bem compreendidos em termos de operação. Fundamentalmente eles são idênticos aos motores de indução, só tendo função contrária.

Uma vantagem destas máquinas é que não é preciso fazer sincronização com a rede, o que leva obviamente à ausência de equipamentos para este fim. Porém, um dos problemas dos geradores de indução é a necessidade de absorver potência reativa de uma fonte externa para o seu funcionamento. Esta potência pode ser provida pelo sistema elétrico ou ser fornecida localmente, isto é, capacitores para correção do fator de potência instalados junto com esta interface desempenham este papel. Por este mesmo motivo, a capacidade destes geradores pode ser relativamente limitada. Outra desvantagem está na partida da máquina que, para não afetar o sistema elétrico através de correntes de *inrush*, inevitavelmente precisará ser ligada a um dispositivo que suavize seu impacto.

Os geradores de indução são usados na Geração Distribuída praticamente para as mesmas tecnologias que os geradores síncronos. Algo, porém, determinante na escolha entre um ou outro é se a energia mecânica da fonte é constante ou não. Se for, é preferível o uso das máquinas síncronas. Por contrapartida, se existir grandes variações dela, as máquinas de indução servirão melhor os requisitos. Isto porque o escorregamento provê melhor amortecimento para oscilações [24]. De qualquer forma, caixas de engrenagens podem ser aplicadas nos dois tipos para adaptar a velocidade das fontes com a dos geradores.

3.3.2 – A Eletrônica de Potência

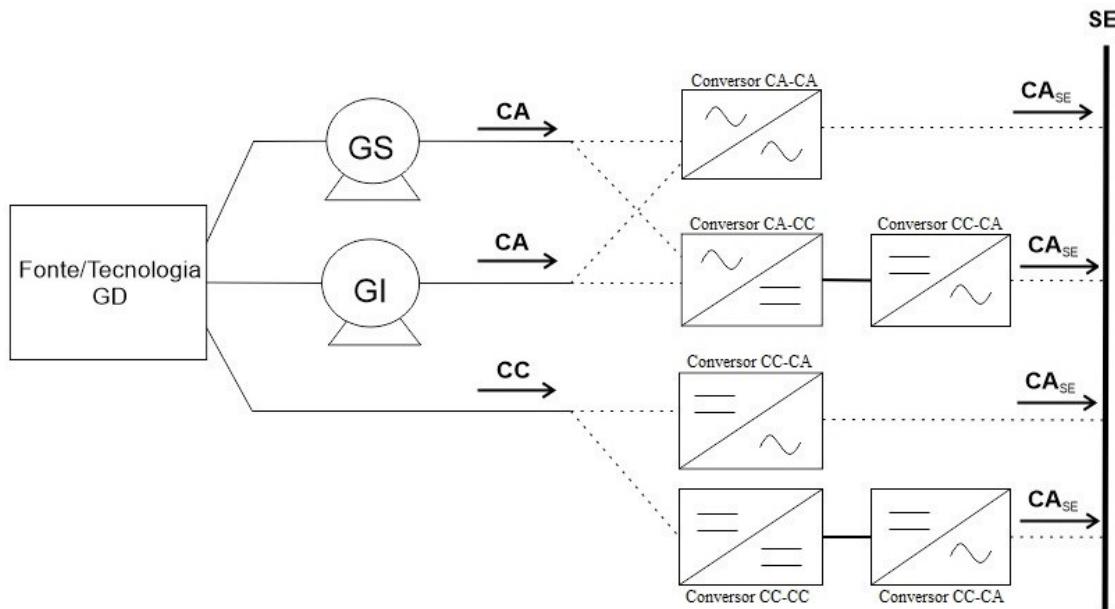
A eletrônica de potência tem imposto sua importância como ferramenta fundamental em diversos setores depois de anos de evolução e tem beneficiado muito sistemas industriais, de mobilidade e de energia aumentando produtividade e aprimorando qualidade [31]. Para alguns autores, juntamente à transição de fontes fósseis para renováveis, a eletrônica de potência de alta eficiência aplicada na geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica é uma das tecnologias de maior importância nas soluções dos problemas do crescente uso de eletricidade e das mudanças climáticas, sendo o ponto chave na conexão da Geração Distribuída e na mudança do sistema elétrico tradicional centralizado para um sistema mais distribuído e “inteligente” [20, 86]. Os conversores de eletrônica de potência são, assim, parte fundamental no sucesso da integração da Geração Distribuída, trazendo alto desempenho, grande eficiência, melhor controle, adequação aos requisitos do sistema elétrico e múltiplas funções benéficas tanto para a fonte, quanto para a rede elétrica [18, 19, 37, 20, 120].

A eletrônica de potência estuda a conversão da energia elétrica de uma forma para outra utilizando dispositivos semicondutores, como diodos, transistores e tiristores, elementos armazenadores de energia, como indutores e capacitores, e métodos de controle. Os conversores podem ser classificados em quatro categorias: o conversor CA-CC (ou retificador), que pode ser controlado ou não, e que transforma tensão CA em tensão CC; o conversor CC-CC (às vezes chamado *chopper CC*), que altera tensão e corrente CC reguladas para tensão e corrente CC diferentes; o conversor CC-CA (inversor), que tem em sua entrada

uma tensão e corrente CC fixas e em sua saída uma tensão e corrente CA e frequência fixas e/ou variáveis; o conversor CA-CA, que pode fazer mudanças de nível e frequência de um sinal CA [160, 91, 6].

Na Geração Distribuída, estes conversores encontram aplicações em quase todas as tecnologias. Para muitas delas, a eletrônica de potência é obrigatória como interface. Para aquelas cuja saída é CC, como é o caso das placas fotovoltaicas e das células a combustível, os conversores CC-CA são essenciais, permitindo que o que é extraído por equipamentos e pela rede elétrica seja satisfatório com nível e frequência adequados. Além disso, um conversor CC-CC pode ser ligado entre a saída da tecnologia e a entrada do inversor, isto porque o *chopper* CC permite obtenção de níveis variados de tensão CC, elevando a tensão (*boost*) quando necessário e aumentando as funções da interface, como é o caso na aplicação de MPPT. Mesmo naquelas fontes que sejam acopladas por máquinas elétricas rotativas, a eletrônica de potência pode ou simplesmente adaptar a onda de saída CA para a forma que o sistema elétrico exige com conversores CA-CA, ou podem ir mais à frente, incorporando funções diferentes e melhorando o desempenho do conjunto com aplicação, por exemplo, de conversores CA-CC e CC-CA em cascata (configuração conhecida como *back-to-back*). A Figura 3.8 mostra estas diferentes topologias principais ligando a fonte/tecnologia de Geração Distribuída ao sistema elétrico.

Figura 3.8 – Fonte/Tecnologia de Geração Distribuída (GD) ligada ao sistema elétrico usando as principais interfaces e configurações com eletrônica de potência para saída CA adequada. Aqui, “GS” e “GI” são abreviaturas de gerador síncrono e gerador de indução, respectivamente. Já “SE” denota o sistema elétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas vezes, o posto da eletrônica de potência para um gerador vai ainda mais longe, não servindo como interface, mas como parte imperativa em sua operação normal. Para os síncronos, a excitação do rotor, como foi dito, pode ser feita por retificadores ou outros conversores e combinações deles com saída CC. Para os assíncronos, quando os reativos são fornecidos por capacitores, dispositivos semicondutores podem controlar a saída destes, e equipamentos, como o *soft-starter* (CA-CA), podem diminuir os efeitos negativos de partida. Além disso, sendo interface, a eletrônica de potência apresenta diversos benefícios para o

sistema elétrico, com funcionalidades adicionais, como: melhora na qualidade da energia, suporte de reativos, regulação de tensão, aumento de compatibilidade diminuindo as contribuições de falta e flexibilidade na operação com outras tecnologias de Geração Distribuída [120]. Nesta seção, por essa importância, por ser multifacetada e porque é uma tecnologia de avanço recente, algumas aplicações da eletrônica de potência na Geração Distribuída serão discutidas.

3.3.2.1 - Eletrônica de Potência e Energia Eólica

As turbinas eólicas podem ser divididas em três categorias ou configurações principais em relação à forma em que são ligadas ao sistema elétrico [18, 19]: independentes, parcialmente dependentes ou totalmente dependentes de conversores de eletrônica de potência como interface. As divisões também podem ser feitas quanto à velocidade, sendo fixa ou variável [39, 20, 37]. As categorias independentes fazem parte do primeiro grupo, enquanto as outras duas são de velocidade variável. As topologias de conversores que podem ser usadas são várias, tais como os multiníveis. Os detalhes sobre cada uma delas podem ser encontrados em [21]. Já em [19] são discutidos os métodos de controle e sincronização para Geração Distribuída em geral, incluindo a energia eólica. Em [39], as melhorias na qualidade da energia e na estabilidade ao se usar eletrônica de potência são discorridos. Abaixo são apresentadas as configurações quanto ao grau de dependência da eletrônica de potência sem se examinar minuciosamente as topologias de seus conversores, os métodos de controle e sincronização ou os pormenores do aprimoramento de desempenho das turbinas.

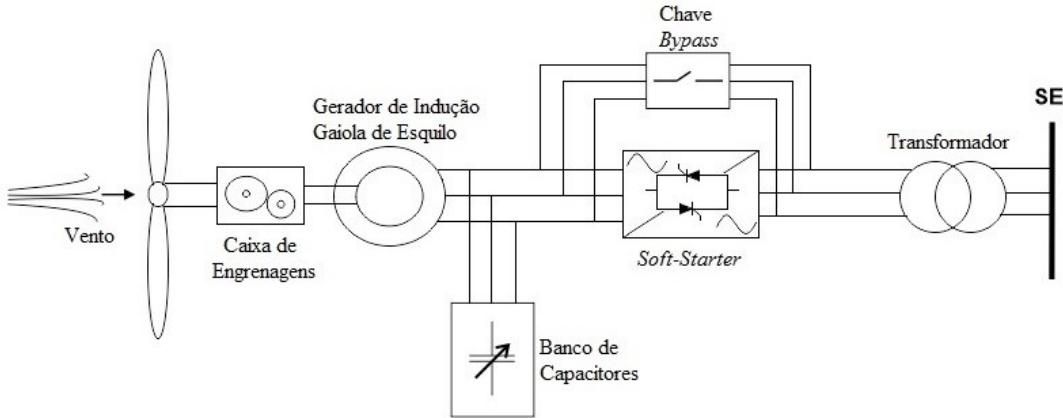
A primeira categoria é a das turbinas eólicas independentes de eletrônica de potência (Figura 3.9). Também conhecida como “conceito” ou “modelo dinamarquês”, ela foi bastante popular nos anos 1980 [20]. Em sua grande maioria, estas turbinas são ligadas diretamente à rede elétrica através de um gerador de indução com rotor gaiola de esquilo através de um transformador. São de velocidade fixa, porque mesmo sob variações de torque, ela sofre variações de apenas 1% a 2%, sendo que a potência aerodinâmica é limitada pelos três métodos de controle de turbina já apresentados quando se discutiu a energia eólica anteriormente [18, 39].

Apesar de serem chamadas aqui de independentes de eletrônica de potência, não se quer dizer com isso que elas não usufruem dela. Ao contrário, a maioria faz uso de dispositivos semicondutores controlados. Como a máquina de indução precisa absorver reativos, uma compensação é necessária. Normalmente, esta é feita localmente através de um banco de capacitores chaveado continuamente, que varia com a carga entre 5 e 25 passos [18, 20]. A conexão do gerador de indução na rede elétrica faz surgir transitórios com correntes elevadas de *inrush*, o que deve ser evitado. Portanto, um conversor a tiristor, o *soft-starter*, é amplamente usado para amenizar o valor eficaz da corrente de *inrush* em até duas vezes a corrente do gerador somente [39]. Assim que passa o momento transitório da conexão, o *soft-starter* é curto-circuitado por uma chave *by-pass*.

Existem vantagens e desvantagens no uso desta configuração. Como vantagens podem ser mencionadas a simplicidade na construção, o custo baixo e a própria ausência de conversores complexos. As desvantagens estão na necessidade de operar em velocidade

constante e em uma rede elétrica forte, e de requerer reforços mecânicos para evitar desgastes [39]. Outra desvantagem no caso destas turbinas de velocidade fixa é que as flutuações do vento levam a flutuações elétricas, podendo haver *flicker* no ponto de conexão se a rede for fraca [20].

Figura 3.9 – Configuração de turbina eólica independente de eletrônica de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

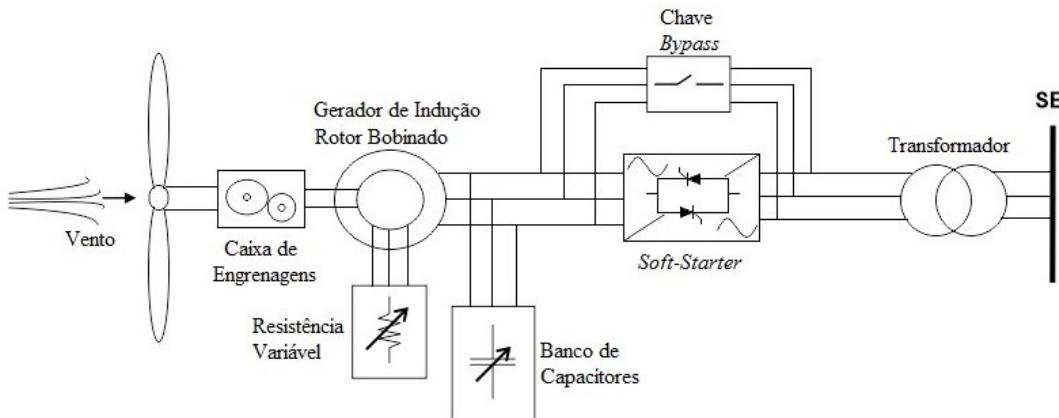
A segunda configuração é a das turbinas eólicas parcialmente dependentes de eletrônica de potência. Este já é um modelo de velocidade variável. Há dois tipos de turbinas dentro desta categoria: o de rotor ligado a uma resistência variável e o de gerador de indução duplamente alimentado (DFIG). Apesar de precisar de mais recursos, ser mais complexo e caro, existe um desempenho aprimorado graças às novas funções e ao controle proporcionado. As desvantagens das turbinas de velocidade fixa são sanadas. Em contraposição a estas, as turbinas de velocidade variável conseguem aumentar a energia obtida em cerca de 5% anualmente, têm potências ativa e reativa controladas, assim como tensão, sofrem menos com estresses mecânicos e eliminam o possível *flicker* [37].

O primeiro tipo (Figura 3.10) tem sua velocidade parcialmente variável. Toda a sua configuração e disposição são idênticas às das turbinas independentes de eletrônica de potência, ou seja, ainda são ligadas diretamente à rede e beneficiam de bancos de capacitores e *soft-starter*, com duas grandes diferenças: o gerador de indução é de rotor bobinado e a este rotor é ligado uma resistência variável externa. A resistência total do rotor é, assim, controlada por conversores de eletrônica de potência que alteram o escorregamento e, por consequência, variam, mesmo que de forma pequena, a velocidade do gerador e também a potência de saída [20, 39].

O segundo tipo dentro das turbinas parcialmente dependentes é o modelo DFIG (Figura 3.11). Ainda é usado um gerador de indução de rotor bobinado, mas aqui o rotor, através de anéis deslizantes, é ligado ao sistema elétrico por um conversor *back-to-back*, ou seja, um conversor CA-CC atrelado a um CC-CA (bidirecionais) através de um barramento CC (capacitor). Este conversor controla a frequência do rotor e, assim, sua velocidade [20]. A conexão com a rede pode ser feita por um transformador de três enrolamentos. O estator, por sua vez, é conectado diretamente à rede. A superioridade desta configuração para os outros apresentados está especialmente em proporcionar uma variação de velocidade muito maior com um pequeno conversor. Com efeito, uma variação de 30% maior ou menor da velocidade

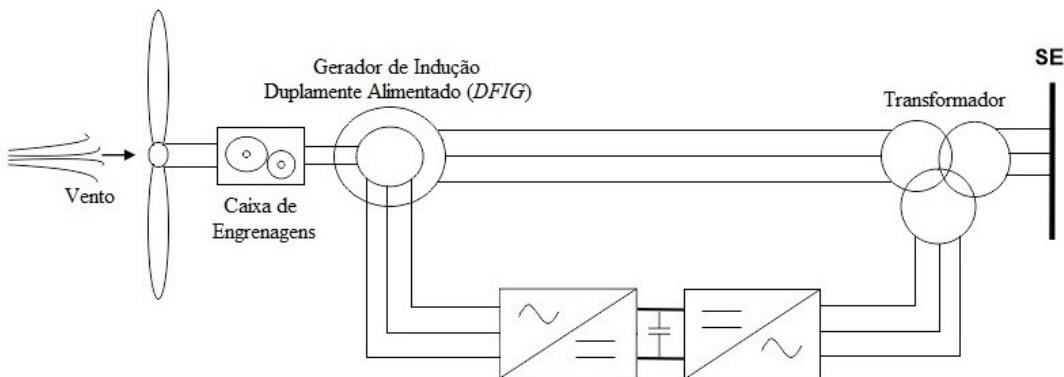
síncrona é obtida com um conversor cuja potência é apenas 30% da potência nominal da turbina, sendo que na operação sub-síncrona a potência elétrica é da rede para o rotor e na super-síncrona ela é entregue por ambos, rotor e estator, para a rede [18].

Figura 3.10 – Configuração de turbina eólica parcialmente dependente de eletrônica de potência com resistência variável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.11 – Configuração de turbina eólica parcialmente dependente de eletrônica de potência *DFIG*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

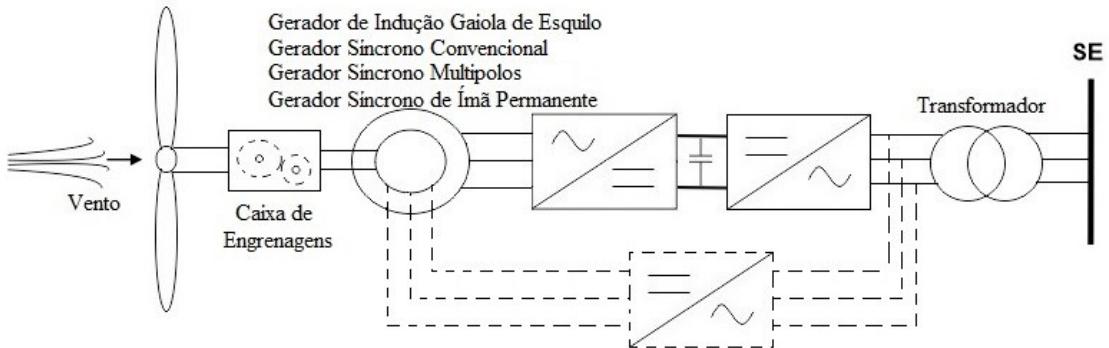
As vantagens, porém, não terminam na maior faixa de variação da velocidade. O uso de um conversor de eletrônica de potência disponibiliza diversas funções benéficas que sobrepõem os custos e a complexidade de tê-lo em uma configuração. Com ele é possível controlar tanto a potência ativa, quanto a reativa. O sistema, portanto, prescinde de compensação externa e de meios para suavizar a conexão à rede como antes. Esta configuração traz melhor funcionamento com a rede, abrindo espaço para a energia eólica atuar nos serviços anciares, disponibilizando funções operacionais que podem impactar na qualidade da energia, na tensão e na estabilidade positivamente. Além disso, o ruído sonoro das turbinas pode ser reduzido, pois elas têm velocidade baixa quando os ventos são calmos. Um problema que pode ser apontado é a obrigatoriedade da instalação de filtros devido à produção de correntes harmônicas na faixa de quilohertz (kHz) pelos conversores [39].

Na terceira e última configuração das turbinas eólicas totalmente dependentes de eletrônica de potência (Figura 3.12), a conexão ao sistema elétrico é feita diretamente através de um conversor *back-to-back*. Enquanto se ganha com variações completas de velocidade,

suprimento direto de reativos, conexão suave à rede [20] e desempenho técnico muito elevado com controle rápido e completo de potências ativa e reativa [39], o conversor aumenta as perdas na conversão de energia [18], fora a maior complexidade e a alta sensibilidade da eletrônica de potência.

O gerador nesta categoria pode ser de quatro tipos diferentes. Podem ser usados geradores de indução gaiola de esquilo e geradores síncronos convencionais (com poucos polos). Por outro lado, também podem ser empregados geradores síncronos multipolos e geradores síncronos de ímã permanente. A diferença destes dois últimos para os primeiros é que eles dispensam a caixa de engrenagens. A remoção dela traz benefícios diversos, tais como menor manutenção, perdas reduzidas, custos menores (eliminação de componentes caros) e maior confiabilidade (retirada de componentes mecânicos rotativos) [37]. No caso da adoção de geradores síncronos, com exceção dos de ímã permanente, a excitação do campo pode ser obtida da própria rede elétrica usando um retificador de pequeno porte.

Figura 3.12 – Configuração de turbina eólica totalmente dependente de eletrônica de potência.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2.2 – Eletrônica de Potência e Energia Solar Fotovoltaica

Para a energia solar fotovoltaica, a eletrônica de potência é imperativa. Como sua saída é CC, para a conexão ao sistema elétrico, ao menos um inversor é necessário. De fato, estes inversores fotovoltaicos têm duas tarefas principais a serem cumpridas: assegurar que o sistema fotovoltaico injete na rede elétrica uma corrente senoidal adequada e fazer com que ele opere sempre no seu ponto de máxima potência (MPP). Além destas, os inversores fotovoltaicos devem ser capazes de preencher outros requisitos para melhor funcionamento com o sistema elétrico. A fim de exercer a primeira tarefa e obedecer a normas, as correntes harmônicas produzidas que fluem até a rede devem ser baixas. A possível corrente CC gerada deve ser praticamente eliminada, pois pode saturar transformadores de distribuição. Esta corrente CC é completamente extinguida se o inversor possuir um transformador (isolação galvânica). Por último, é fundamental para a segurança de pessoas, animais e equipamentos a detecção da condição de ilhamento. A evolução, por sua vez, tem sido da passagem de inversores de grande porte com tiristores para pequenos que usam transistores, principalmente transistores bipolares de porta isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistors - IGBTs*) [117].

Da mesma forma que as turbinas eólicas, os módulos fotovoltaicos podem ser classificados de acordo com a configuração utilizada em relação aos conversores de eletrônica de potência. Normalmente, são quatro as configurações existentes [117, 18, 37, 20],

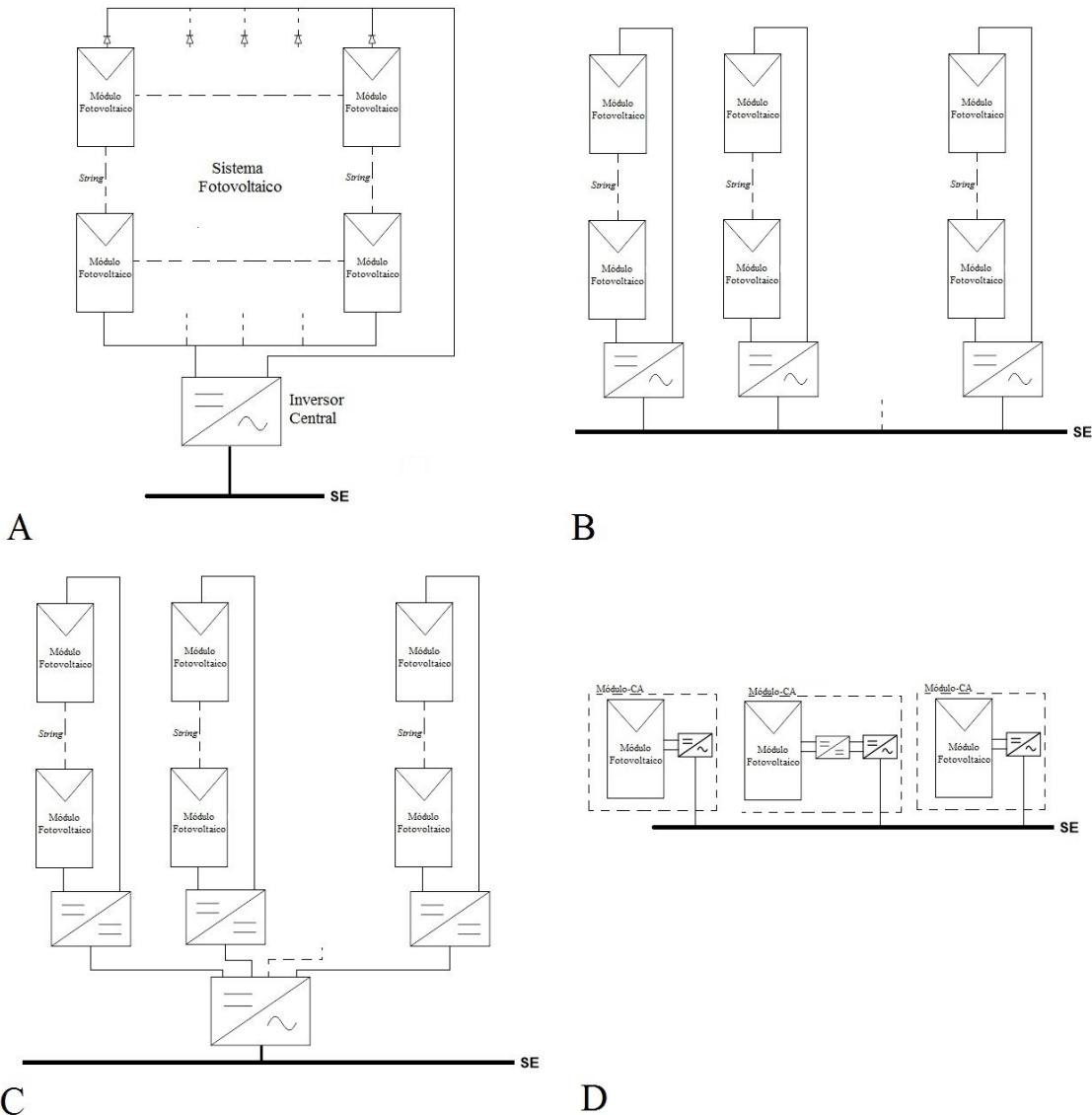
apresentadas a seguir. É importante relembrar que os módulos fotovoltaicos podem ser ligados em série, no que se chama *string*, para que a tensão do conjunto seja elevada, e em paralelo, sejam módulos individuais ou *strings*, de tal maneira que a potência total seja aumentada. Estas disposições e o modo como o inversor fotovoltaico é ligado a cada uma delas é que determina a sua classificação, as condições e o desempenho do sistema como um todo. Para que fique claro nas Figuras apresentadas, *strings* são arranjos de módulos fotovoltaicos em série, enquanto denota-se como sistema fotovoltaico qualquer arranjo possível indo de um único módulo, *strings* individuais e diversos módulos em série-paralelo.

A primeira configuração de inversores fotovoltaicos é usada há muito tempo e é aplicada comumente em plantas com um grande número de módulos em *strings* conectados em paralelo [117, 18, 37, 20]. A eles é dado o nome de Inversores Centrais (Figura 3.13A). Por apresentarem potências maiores (dezenas de quilowatts até megawatts), eles geralmente são trifásicos. Para evitar correntes reversas, diodos são empregados em cada *string*. Se uma quantidade suficiente de módulos for colocada em série (o que normalmente é feito), pode ser alcançada uma tensão adequada que dispensa o uso de dispositivos elevadores de tensão, como conversores CC-CC *boost* ou transformadores. Em compensação, existem diversas desvantagens que tendem ao desuso desta configuração, como as perdas de potência pelo uso de um único MPPT para todos os módulos, pela incompatibilidade entre os módulos e pelos diodos de *strings*. São também outras desvantagens a necessidade de cabos CC de alta tensão entre os módulos e o inversor, a falta de confiabilidade por se depender de um único inversor para todo o sistema fotovoltaico [20] e o impedimento de produção em massa por ser um inversor exclusivo para cada arranjo, o que encarece o produto.

A segunda configuração é chamada de Inversores de *Strings* ou Fileiras [117, 18, 37, 20]. Como o próprio nome indica, inversores fotovoltaicos são empregados em cada *string* (Figura 3.13B). Da mesma maneira que para os Inversores Centrais, um número suficiente em série exclui a necessidade de dispositivos elevadores de tensão. Porém, caso exista uma quantidade menor, conversores CC-CC ou transformadores com frequência da rede podem ser usados. Como cada *string* possui seu próprio inversor, o MPPT é por conjunto de módulos em série e não para todo o sistema. Além disso, esta categoria dispensam diodos. Estas duas características somadas elevam a eficiência do sistema fotovoltaico se comparado com o dos Inversores Centralizados, porque reduzem as perdas. Fora isso, a produção em massa é admitida, o que reduz o preço destes inversores.

A terceira configuração é a dos Inversores de *Multi-Strings* [117, 18, 37, 20]. Ela emprega um inversor comum ligado ao conjunto de *strings*, mas cada *string* possui seu próprio conversor CC-CC (Figura 3.13C). Esta é sua grande vantagem. Por cada um ter um conversor CC-CC, também possui MPPT individual e maior controle, o que aumenta a eficiência. *Strings* de tecnologias e orientações diferentes podem ter uma conexão única [37]. Isto também aumenta a flexibilidade, visto que o proprietário pode ligar mais módulos em momentos distintos.

Figura 3.13 – Configurações para sistemas fotovoltaicos com eletrônica de potência. **A.** Inversor Central. **B.** Inversor de *Strings* ou Fileiras. **C.** Inversor de *Multi-Strings*. **D.** Módulos-CA ou Microinversores.



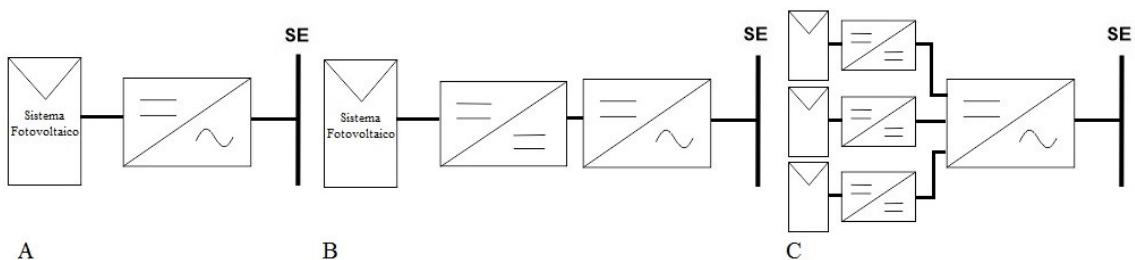
Fonte: Elaborado pelo autor.

Por último, são incluídos os Inversores Módulos-CA e Células-CA [117, 18, 37, 20]. Os Inversores Módulos-CA também são chamados Microinversores (Figura 3.13D). Nesta categoria, cada módulo fotovoltaico possui um inversor embutido que o liga à rede elétrica, tendo ou não um conversor CC-CC consigo. O MPPT é individualizado, o que aumenta a eficiência e a extração de energia de cada módulo à sua operação ótima, reduzindo ao máximo a incompatibilidade. Outra vantagem interessante é a capacidade de ser um equipamento do tipo “ligar-e-usar” (“*plug-and-play*”), ou seja, cada módulo pode ser ligado facilmente mesmo por pessoas que não são especialistas, além de aumentar a flexibilidade. Há duas desvantagens maiores. A primeira é que a eficiência total do sistema fotovoltaico é menor, decorrente da elevação de tensão. A segunda é o custo alto pela necessidade de um inversor por módulo fotovoltaico. Os Inversores Células-CA [117, 18] possuem as vantagens e desvantagens dos Módulos-CA com a diferença de serem conectados em células fotovoltaicas. Isto é preferível

e atingível para os modelos de filmes finos. O desafio se encontra em elevar a pequena tensão em torno de 1 V e potência de 100 W/m^2 para valores adequados para a rede elétrica [117].

As topologias para os inversores são inúmeras. Elas podem ser classificadas de várias formas, mas geralmente isto é feito de quatro maneiras [117]: pelo número de estágios de processamento de energia em cascata; pela localização dos capacitores de desacoplamento da rede; por usarem ou não transformadores e pelo tipo de interface com a rede. Detalhes sobre cada uma destas classificações podem ser encontrados em [117], assim como de diversas topologias para as configurações de Inversores de *Strings*, *Multi-Strings* e Módulos-CA, todos monofásicos. Particularidades também podem ser encontradas em [18]. Delas, ficará restrita a discussão acerca do número de estágios completamente baseada em [117]. Na Figura 3.14, elas podem ser vistas. Para Inversores Centrais, um estágio basta, porque é recomendável conseguir a tensão necessária tendo módulos suficientes por *string* (Figura 3.14A). Este conceito também pode ser suficiente para Inversores de *Strings*, se o mesmo for feito. Módulos-CA podem ter este modelo. Todas as funções são realizadas por este único estágio que é formado exclusivamente por um conversor CC-CA, tais como MPPT, elevação de tensão e adequação da corrente para a rede. A seguir, vêm as duas formas de topologias de dois estágios. No primeiro (Figura 3.14B), um conversor CC-CC e um conversor CC-CA são conectados e intermedian o sistema fotovoltaico e a rede elétrica. Este conceito é adotado para Inversores de *Strings*, Módulos-CA e Células-CA. No *chopper CC* é feita elevação de tensão e o MPPT, enquanto o inversor propriamente dito também pode fazer a elevação de tensão, mas é responsável pela adaptação da corrente para o sistema elétrico. Por fim, o segundo (Figura 3.14C) tem um inversor (CC-CA) comum, mas conversores CC-CC para cada sistema fotovoltaico, podendo ser módulos ou *strings*. Este claramente é o modelo usado para os Inversores de *Multi-Strings*.

Figura 3.14 – Classificação de topologias pelo número de estágios de processamento de energia em cascata. **A.** Estágio único (somente um conversor CC-CA). **B.** Dois estágios com um conversor CC-CC e um conversor CC-CA. **C.** Dois estágios com vários conversores CC-CC e um conversor CC-CA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

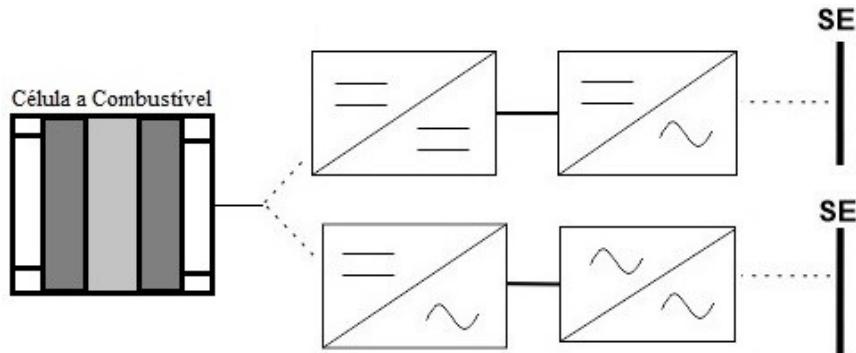
Dentre os inversores fotovoltaicos, aqueles sem transformadores (*transformerless*) possibilitam uma alta eficiência, além de diminuírem peso, tamanho e custos. Apesar de perderem certa isolamento e permitir o fluxo de correntes CC, os benefícios são considerados superiores e estes inversores são muitas vezes escolhidos para sistemas fotovoltaicos. Em [20], as topologias mais empregadas são apresentadas e discutidas. A topologia de ponte H ou ponte completa (*full-bridge*) é amplamente usada, podendo ter modulação PWM bipolar, unipolar ou mesmo híbrida, sendo a segunda inadequada para inversores fotovoltaicos sem transformadores. Há ainda outras topologias derivadas da ponte H, tais como HERIC, H5, com desacoplamento CC e Retificador de Tensão Zero. A topologia de meia-ponte (*half-bridge*) também é aplicada, assim como a de ponto neutro grampeado (*Neutral Point Clamped*

– NPC). Todas estas são monofásicas. Em [113] são apresentados e discutidos experimentos e simulações sobre algumas destas topologias de inversores sem transformadores, além das trifásicas. Estas últimas, formadas pela topologia de ponte completa trifásica (*full-bridge*), a meia ponte (*3xHB*), que nada mais é que três da monofásica, e a de ponto neutro grampeado (*3xNPC*), que é formada por três do mesmo tipo monofásicas. Os resultados mostraram que, no caso monofásico, a escolha deve recair pela modulação bipolar se comparada com a unipolar, em concordância com o primeiro artigo, porque esta última tem correntes de fuga maiores. A NPC também é uma boa escolha, porque tem flutuações de tensão menores. Já no caso trifásico, a ponte completa trifásica é desaconselhada por ter grandes flutuações de tensão e correntes de fuga. As outras duas trifásicas, por outro lado, possuem correntes de fuga muito baixas.

3.3.2.3 – Eletrônica de Potência e Células a Combustível

Os sistemas de interface das células a combustível são muito similares com os de energia solar fotovoltaica [19]. Como já se comentou, as células a combustível têm saída CC e possuem um máximo teórico de tensão de 1,2 V, podendo ser ligadas em série e em paralelo. Mesmo assim, elas geralmente precisam de um estágio de elevação de tensão. A configuração mais comum empregada com dois estágios para células a combustível usa um conversor CC-CC e outro CC-CA para conexão à rede, mas existem também propostas de interface com um inversor com saída CA em alta frequência seguido por um cicloconversor (CA-CA) para adaptação ao sistema elétrico [18], conforme ilustra a Figura 3.15.

Figura 3.15 – Principais configurações de dois estágios de eletrônica de potência usadas para células a combustível ligadas ao sistema elétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os conversores de um estágio, usando somente um inversor, e dois estágios podem ser comparados [116]. Os primeiros são adequados para aplicações de potência média, enquanto os últimos servem para média e alta. Os conversores de um estágio usam menos componentes, as perdas por chaveamento e as ondulações de frequência são menores e a eficiência é mais alta. Neles pode ser necessário um transformador de frequência da rede de elevado custo. Para os de dois estágios, basta um transformador de alta frequência com custo menor.

Os conversores CC-CC para células a combustível têm duas funções: criar uma isolamento CC, visto que um transformador de frequência da rede é de alto custo, volumoso e pesado e elevar a tensão em nível adequado. Dentre eles, os isolados comumente usados são: *chopper CC* em ponte H; *chopper CC* em ponte H série ressonante e *chopper CC push-pull*.

Quando não há necessidade de isolação e a conversão de tensão não é grande, conversores CC-CC não isolados podem ser aplicados, como os elevadores (*boost*) e os abaixadores (*buck*) [18]. Os inversores, por sua vez, podem ser tanto de ponte completa (*full-bridge*) quanto de meia ponte (*half-bridge*) quando monofásicos. Já para saídas trifásicas, há várias topologias que podem ser vistas em [40], assim como uma comparação entre elas. Algumas das topologias dos *choppers* CC e dos inversores podem ser encontradas em [116] e em [18].

3.3.2.4 – Eletrônica de Potência e Pequenas Hidroelétricas

Diferentemente das grandes hidroelétricas “tradicionais” que praticamente não usam eletrônica de potência, com exceção para excitação do rotor e para transmissão em corrente contínua de alta tensão (*HVDC*), as pequenas hidroelétricas podem beneficiar bastante dos conversores desta categoria como interface com a rede elétrica. Em contraste com as grandes hidroelétricas, para as pequenas, geradores de indução têm sido preferidos no lugar dos geradores síncronos convencionais.

Para conexão direta com o sistema elétrico, uma turbina de velocidade fixa pode ser acoplada com um gerador síncrono de ímã permanente através de uma caixa de engrenagens [144]. Porém, as pequenas hidroelétricas podem ter funcionamento aprimorado se a moderna operação com velocidade variável for aplicada [144, 168], pois, se fixa, podem provar variações no fluxo de água, comuns neste tipo, e a consequente instabilidade. Os benefícios vão da maior eficiência, flexibilidade e estabilidade até a redução das áreas alagadas. Na parte mecânica, a turbina Francis tem sido apontada como a de melhor desempenho para esta operação. Já na estrutura elétrica, duas configurações podem ser usadas, ambas similares àquelas das turbinas eólicas. Em uma, totalmente dependente de eletrônica de potência similar ao de energia eólica, um conversor *back-to-back* intercala o gerador, que pode ser de indução gaiola de esquilo, síncrono convencional e de ímã permanente, com o sistema elétrico [144]. Em outra, o modelo DFIG, idêntico àquele encontrado nas turbinas eólicas com as respectivas adaptações, pode ser escolhido, formando uma configuração parcialmente dependente de eletrônica de potência [144, 168]. Discussões mais profundas acerca desta última categoria para pequenas hidroelétricas podem ser vistas em [168] com uma interessante comparação entre ela e às com máquinas síncronas.

3.3.2.5 – Eletrônica de Potência e Microturbinas

Outro caso interessante que sofreu alteração com os avanços tecnológicos e passou a integrar em sua estrutura para conexão à rede elétrica conversores de eletrônica de potência foram as turbinas, mais especificamente as modernas microturbinas. Com fontes que vão desde os combustíveis fósseis até a energia de biomassa e cogeração como possibilidade para ambas, as microturbinas funcionam em velocidades de rotação altíssimas, conforme já se explicou. Por esse motivo, apesar de terem geradores de ímãs permanentes para produção CA, esta não se encontra na frequência do sistema elétrico. Para adequação desta alta frequência, à saída da máquina elétrica é ligado um retificador trifásico de onda completa com diodos [15] ou tiristores [124], seguido de um barramento CC com capacitor e um inversor tipo fonte de tensão (*voltage-source inverter - VSI*) até a rede elétrica. Ultimamente, o retificador PWM tem sido uma escolha favorável em virtude da diminuição das componentes harmônicas produzidas que podem aumentar as perdas e a temperatura do gerador [114].

3.4 – Geração Distribuída, a Variabilidade e a Intermitência

Variabilidade significa inclinação a mudanças ao longo do tempo, caracteriza aquilo que não é constante, enquanto intermitência é a propriedade de sofrer paradas, interrupções. Algumas das tecnologias da Geração Distribuída possuem esses dois atributos e, por ser uma característica praticamente inexistente na “geração tradicional”, ela deve ter destaque e ser estudada separadamente. De fato, para alguns autores esta variação com o tempo das fontes não só é uma das diferenças com as termelétricas “tradicionais”, como é a maior delas [24]. Geralmente, a energia elétrica produzida deve ser consumida instantaneamente e a total desconexão entre o momento que se produz e que se consome, muitas vezes sem a devida previsão, faz de grande parte da Geração Distribuída um grande desafio.

Muitos autores utilizam apenas o termo “intermitente” para denotar estas duas qualidades, algo que pode ser equivocado porque elas são efetivamente diferentes e causam efeitos distintos. No caso da Geração Distribuída, a palavra intermitente pode ser definida como aquela tecnologia que produz energia nula ou muito próxima de zero em algum ou vários momentos do período estudado. É o caso inevitável, supondo a análise diária, da energia solar fotovoltaica que na chegada da noite até o próximo amanhecer não gera energia. Da mesma forma, quando os ventos têm velocidades muito baixas e as pás de uma turbina eólica se encontram em situação abaixo do ponto de *cut-in*, sua produção é nula. Por outro lado, uma Geração Distribuída “variável” é aquela cuja potência de saída se altera razoavelmente em um determinado espaço de tempo, sem necessariamente chegar a se anular. Como exemplos de variabilidade da Geração Distribuída podem ser citadas a passagem de nuvens no céu acima de módulos fotovoltaicos que muda a potência de saída enquanto a luz solar é barrada de chegar neles e a mudança no regime de ventos em um momento do dia que variam muito suas velocidades e, consequentemente, a potência das turbinas eólicas. Evidentemente, uma tecnologia pode apresentar ambas as características.

A definição de variabilidade parece vaga, mas ela foi assim tomada aqui para servir diferentes casos a serem estudados. De qualquer forma, o que se entende por “alteração razoável” é aquela que seja notável para a situação pesquisada. Em termos numéricos, essa variação poderia ser de 1%, 10% ou até mesmo 100%; estes valores com certeza podem ser arbitrários, porque precisam passar pelo crivo de cada análise, só não podendo ser zero, mas devendo ser apontados a partir do tempo. No caso da produção de energia elétrica, principalmente para a Geração Distribuída, o “determinado espaço de tempo” está mais relacionado a períodos menores que um dia, mas também podem ser especificados sobre cada estação ou até mesmo em um ano inteiro.

Outro termo também comumente utilizado para caracterizar a Geração Distribuída a estas mesmas duas características, atrelando-as, é “flutuação de potência”. Há dois motivos que levam o autor a não adotar esta expressão. O primeiro é para que sejam destacadas abertamente as diferenças entre os dois atributos. O segundo é pelo fato do termo “flutuação” estar associado ao fenômeno de *flicker* dentro da qualidade da energia, mesmo que esta seja de tensão e não de potência. Para evitar qualquer confusão neste sentido, o emprego deste fica descartado aqui.

3.4.1 – A “Geração Tradicional”, a Variabilidade, a Intermitência e o Despacho

O que representa uma grande diferença da Geração Distribuída para a “tradicional” neste assunto é que algumas das tecnologias do primeiro grupo são muito mais variáveis e algumas delas são realmente intermitentes, tornando-as muitas vezes imprevisíveis, enquanto as do último quase não variam, raramente são intermitentes e são prontamente previsíveis, como já se afirmou. Com efeito, as grandes termelétricas e as usinas nucleares têm suas potências de saída totalmente controladas enquanto estiverem funcionando e os operadores podem saber exatamente quanto elas gerarão dentro de suas capacidades. Elas normalmente cessam de produzir devido exclusivamente a acidentes ou interrupções previstas para manutenção, por exemplo. Fora isso, elas funcionam por quanto tempo se desejar. As grandes hidroelétricas, por sua vez, são variáveis dentro de um ano, dado que dependem das precipitações. Porém, a variação ocorre lentamente. A interrupção na produção é difícil de acontecer e quando ocorre não é em um pequeno espaço de tempo. Isto é ainda mais forte visto que as grandes hidroelétricas muitas vezes são construídas com barragens, o que as proporciona reservas. Assim, pela variação ser pequena, o tempo dela ocorrer ser de vários dias ou meses e as paradas advirem muito raramente, as grandes hidroelétricas podem ser consideradas não-variáveis, não-intermitentes e bastante previsíveis.

Sob a sombra da incerteza, distinção que no sistema elétrico estava ligada muito mais ao consumo do que à produção, a Geração Distribuída que é variável e/ou intermitente perde um dos atributos mais importantes do planejamento e da operação da rede elétrica: o despacho. Chama-se despacho na engenharia elétrica a possibilidade de se controlar quanto de energia elétrica é produzido pelos geradores e é enviado para os usuários em um pequeno espaço de tempo.

Antes, no sistema elétrico convencional era preciso estudar o comportamento dos consumidores e traçar curvas que mostrassem quanto de energia seria utilizada ao longo de um dia completo. Os engenheiros eletricistas passaram até mesmo a dividir os momentos do dia entre aqueles onde se consome grande quantidade de energia, os chamados horários de pico, e aqueles onde há pouquíssimo uso. Com escassas exceções, estas análises permitiam que a energia elétrica produzida pelos “geradores tradicionais” fosse diretamente proporcional ao que fosse consumido, trazendo equilíbrio e baixo custo.

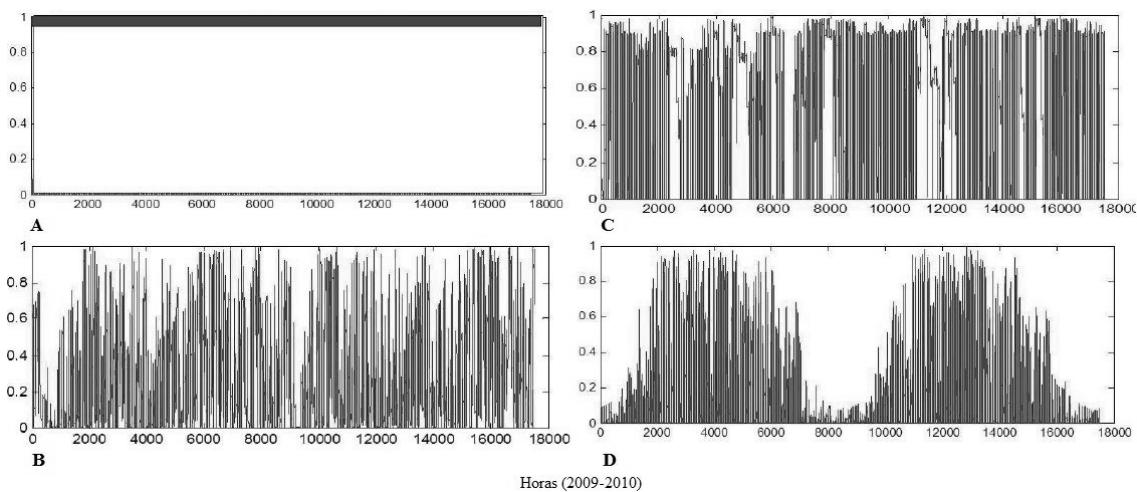
Hoje em dia e no futuro, além desta análise da demanda, também é preciso realizar a difícil tarefa da previsão da geração, uma vez que, enquanto o consumo ainda é baseado quase que inteiramente no comportamento social, algumas tecnologias da Geração Distribuída dependem fortemente de aspectos climáticos, geográficos e físicos. Não é escolha do ser humano quando ou como a luz do sol deve chegar a qualquer lugar, nem se haverá ou não ventos. Também não está nas mãos de qualquer pessoa se os rios fluirão continuamente ou se haverá estiagem. Mais ainda, a quantidade de cada um destes fenômenos naturais também é totalmente incontrolável.

3.4.2 – Um Exemplo Prático de Variabilidade e Intermitência de Geração Distribuída

Algumas fontes de Geração Distribuída sofrem de alta variabilidade e de alta intermitência, enquanto outras são despacháveis assim como a “geração tradicional”. Para exemplificar, na primeira categoria podem ser destacadas a energia solar fotovoltaica, a energia eólica, as pequenas hidroelétricas e a cogeração caseira, enquanto na segunda, tem-se a energia de biomassa e a cogeração industrial.

Para se ter uma noção comparativa de quão problemáticas e diversas são essas características de variabilidade e intermitência de algumas fontes de Geração Distribuída, abaixo são apresentados e discutidos os experimentos realizados por Etherden e Bollen [71]. As análises foram feitas a partir de instalações reais e simulações baseadas em medições. A rede estudada e as fontes foram fundamentadas em uma região central da Suécia. O tempo de análise foi de dois anos completos (2009 e 2010). Uma usina de cogeração usando biocombustíveis foi modelada e como pode ser visto na Figura 3.16A, ela é despachável, tendo uma produção constante ao longo dos dois anos. A produção de energia eólica é baseada em dados medidos de uma fazenda eólica de 34 MW com 17 turbinas (Figura 3.16B). A produção da hidroelétrica foi retirada de dados de uma planta real de 5,4 MW regulada diariamente e semanalmente. Ou seja, ela é variável e intermitente (Figura 3.16C). Por fim, a produção de energia solar fotovoltaica foi determinada através da medição de irradiações globais e de atributos de uma pequena usina real de 3 kW em Ludvika na Suécia (local dos experimentos), sendo que as simulações foram validadas com dados reais de produção (Figura 3.16D).

Figura 3.16 – Comparação entre a produção (normalizada) de quatro fontes diferentes em dois anos (2009-2010), hora por hora. **A.** Produção constante por cogeração a partir de biocombustíveis (despachável). **B.** Produção de uma fazenda eólica com 17 turbinas/34 MW. **C.** Produção de uma hidroelétrica de 5,4 MW regulada. **D.** Produção simulada de energia solar fotovoltaica baseada em medições de irradiação global.



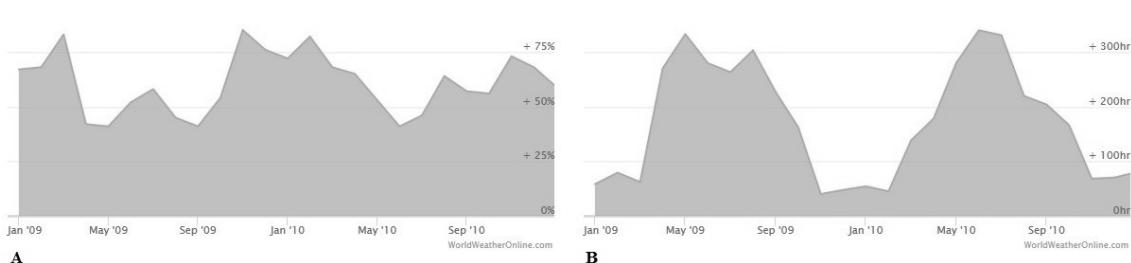
Fonte: Adaptado de [69] e [70].

A diferença entre fontes não-variáveis e não-intermitentes com as altamente variáveis e intermitentes fica nítida com este exemplo prático. Enquanto a produção despachável mantém seu máximo durante todos os dois anos, as outras praticamente não alcançam este valor. No caso da hidroelétrica, ela varia diariamente e em muitos momentos do ano tem

variações de cerca de 20%, enquanto em outras ocasiões elas são de 40% e 60%. Há também situações que a produção se anula (intermitência).

A energia eólica e a solar fotovoltaica, por sua vez, são radicalmente variáveis e intermitentes. A fazenda eólica apresenta diversas variações que não seguem qualquer padrão. É possível perceber como as mudanças de hora em hora e dia a dia são grandes. No início de cada ano a produção é quase nula, ficando abaixo de 20%. Os módulos fotovoltaicos, por outro lado, parecem apresentar um padrão ao longo de um ano completo. Isto se deve às estações. Como se vê, a produção inicia pequena, cresce até chegar a valores mais altos que se mantêm por alguns meses no meio de cada um dos dois anos e depois decresce para ficar novamente em valores baixos. Esta época de ascensão e queda da produção coincide com a chegada e o fim do verão europeu, respectivamente, sendo que a quantidade maior produzida está ligada a esta estação. Já os momentos de baixa produção equivalem principalmente ao inverno europeu. No primeiro caso há menos nuvens no céu e mais horas de sol, ocorrendo o oposto no segundo. Isto pode ser confirmado observando os dados mostrados na Figura 3.17 que trazem, respectivamente, a cobertura (média) das nuvens e o número de horas de sol em Ludvika nos dois anos estudados. De qualquer forma, são perceptíveis as variações diárias e horárias, chegando a zero em diversos pontos (noites) e mesmo sofrendo alterações dentro de pequenos períodos.

Figura 3.17 – A. Cobertura (média) de nuvens em porcentagem da cidade de Ludvika na Suécia de Janeiro de 2009 até Dezembro de 2010. **B.** Horas de sol da cidade de Ludvika na Suécia de Janeiro de 2009 até Dezembro de 2010.



Fonte: Adaptado de [186].

No que segue nesta seção, o enfoque maior será dado à energia solar fotovoltaica e à eólica, em particular a primeira. O motivo não é só pela popularidade que estas fontes têm ganhado nos últimos anos, mas é também por apresentarem alta variabilidade e alta intermitência em relação às outras fontes, como o experimento apresentado retratou.

3.4.3 – Dependência do Tempo e do Clima

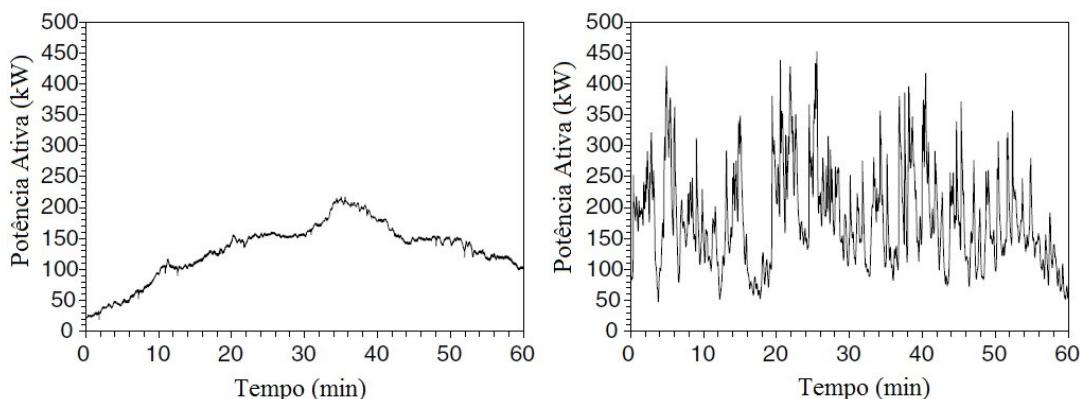
As mudanças na produção das fontes variáveis e intermitentes ocorrem ao longo do tempo de forma diversa. Pode ser que em alguns casos ela mude de forma expressivamente aleatória em poucos segundos, em alguns minutos, em horas ou durante um dia completo, apresentando produções muito diferentes entre si na manhã, na tarde, na noite e na madrugada, como pode ser a situação da energia eólica. Ou ela pode ter certo padrão de comportamento ao longo de um dia inteiro, como ocorre com a solar fotovoltaica que não produz durante a noite, mas muitas vezes tem valores baixos que sobem e descem, respectivamente, na aurora e no crepúsculo, culminando em um valor máximo ao meio-dia.

Mesmo neste caso, o padrão é frequentemente rompido. Salvo a noite, no dia não há garantia do alcance dos valores esperados. Já as pequenas hidroelétricas dependem da vazão da água nos rios e, portanto, podem ter alterações de minutos, horas e até dias.

A variabilidade e a intermitência que surgem ao longo das diferentes escalas de tempo se devem principalmente ao clima em seus múltiplos aspectos. No caso da energia eólica, a velocidade dos ventos é função de vários fatores climáticos. A solar fotovoltaica, por sua vez, é refém das muitas ou poucas nuvens que passam rápida ou lentamente no céu e impedem o caminho da luz do sol até os módulos. As pequenas hidroelétricas, por fim, dependem da quantidade de água que passa pelos rios que, por sua vez, é decorrência dos processos de evaporação, de precipitação e de degelos. Resumindo, a conjuntura climática na qual a Geração Distribuída está inserida é determinante em sua variabilidade e sua intermitência. Estes pontos precisam ser analisados com mais detalhes.

A produção de energia eólica é de difícil previsão mesmo em poucas horas, sendo que os desvios podem ser de 0,1%, 3% e 10% para escalas de tempo de, respectivamente, 1 segundo, 10 minutos e 1 hora. Para turbinas individuais, no primeiro caso, a capacidade de produção se deve ao choque do vento na torre ao redor da turbina. No segundo, a causa é a turbulência [24]. A Figura 3.18 mostra, para um mesmo local, duas horas distintas de produção de potência elétrica de uma mesma turbina eólica.

Figura 3.18 – Variabilidade de uma mesma turbina eólica em um mesmo local em duas horas completas distintas.



Fonte: Adaptado de [24].

A variabilidade da produção por energia solar fotovoltaica ocorre durante um ano completo devido à posição da Terra ao redor do sol em seu movimento de translação. O planeta possui um pequeno ângulo de inclinação em relação ao seu eixo de translação, o que permite a existência das diferentes estações e o que altera a radiação que chega nos módulos durante o período de, aproximadamente, 365 dias. O verão é o momento que os hemisférios recebem mais luz solar, enquanto o contrário ocorre no inverno. No norte, o verão ocorre no meio do ano e o inverno no início e no fim dele. No sul, se passa justamente o oposto. Em ambos os casos, quanto mais afastado da linha do equador, maior é a diferença entre as horas do dia e da noite ao longo das estações. No verão os dias são mais longos e no inverno, as noites é que são. Nos equinócios de primavera e de outono, o dia e a noite têm a mesma duração, enquanto nos solstícios de verão e inverno, alcança-se o máximo de horas de dia e de noite, respectivamente. Na linha do equador, no entanto, a radiação solar é a mesma durante todo o ano e o dia e a noite têm a mesma duração. Já o dia completo terrestre se deve à sua

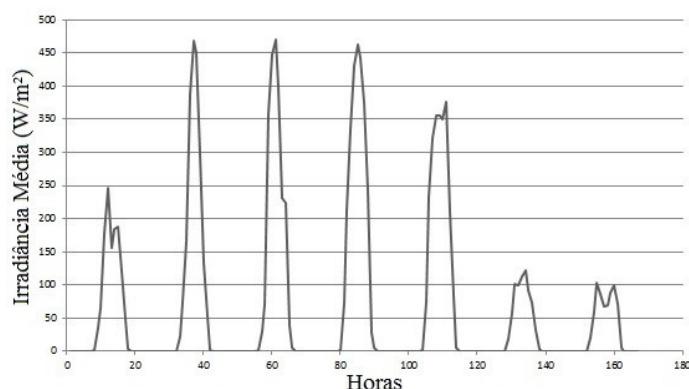
rotação ao redor de seu próprio eixo em uma duração de 24 horas. O sol “nasce” no leste e se “põe” no oeste. Assim, a radiação solar que alcança determinado lugar na Terra é mínima no início do dia após o fim da madrugada, vai crescendo até chegar a um máximo ao meio-dia (não necessariamente o horário das 12 horas), depois diminui até parar de chegar ao local com a entrada da noite. Devido às estações, sua posição em um dia muda ao longo do ano, no que se chama altura solar. Para um observador no hemisfério sul, o sol estará mais alto no verão ou mais baixo no inverno em uma trajetória aparente circular se estiver olhando para o norte. O mesmo se dará para um observador no hemisfério norte olhando para o sul.

A seguir, são apresentados diversos gráficos de medições de irradiância (W/m^2) global horizontal de várias localidades e horários diferentes nos Estados Unidos para demonstrar a variabilidade e a intermitência da energia solar fotovoltaica. Todos foram retirados da base de dados “*Measurement and Instrumentation Data Center*” (MIDC) da NREL [136], sendo que o levantamento de cada instituto é referenciado na respectiva imagem.

As três próximas Figuras são de dados de 2017 do Laboratório Nacional (*Oak Ridge National Laboratory*) [138] da cidade de Oak Ridge no estado do Tennessee nos Estados Unidos da América, no leste do país (Latitude: 35.92996° Norte, Longitude: 84.30952° Oeste). A Figura 3.19 mostra que, mesmo tomando apenas os valores médios de irradiância por hora em uma semana completa (25 de dezembro de 2017 até 31 de dezembro de 2017), os valores podem variar muito em cada dia. Já a Figura 3.20 mostra a irradiância máxima diária durante todo o ano de 2017 para o mesmo local. Fica claro como a produção de energia elétrica por um sistema fotovoltaico pode variar ao longo de um ano.

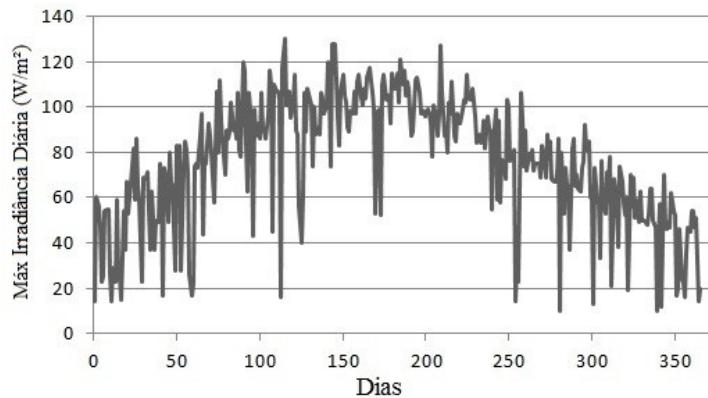
Apesar destas variações ao longo de uma semana, de um ano e de um dia completo e sua intermitência, os movimentos do planeta Terra e, consequentemente, a posição do sol no céu são bastante previsíveis. O que traz realmente maior imprevisibilidade aos sistemas fotovoltaicos são sombras nas células, quase que totalmente devido à passagem de nuvens. Este fenômeno é extremamente difícil de antever e, portanto, a variabilidade e a intermitência são maiores no decorrer de um dia inteiro, podendo ter mudanças e até paradas muito rápidas em segundos e minutos. A Figura 3.21 ilustra isso. Ela mostra a irradiância para um dia aleatório (27 de abril de 2017) inteiro na mesma localização. Percebe-se como as mudanças ao longo de minutos e horas pode ser bastante grande.

Figura 3.19 – Variações da irradiância média por hora ao longo de uma semana completa (25 de dezembro de 2017 até 31 de dezembro de 2017).



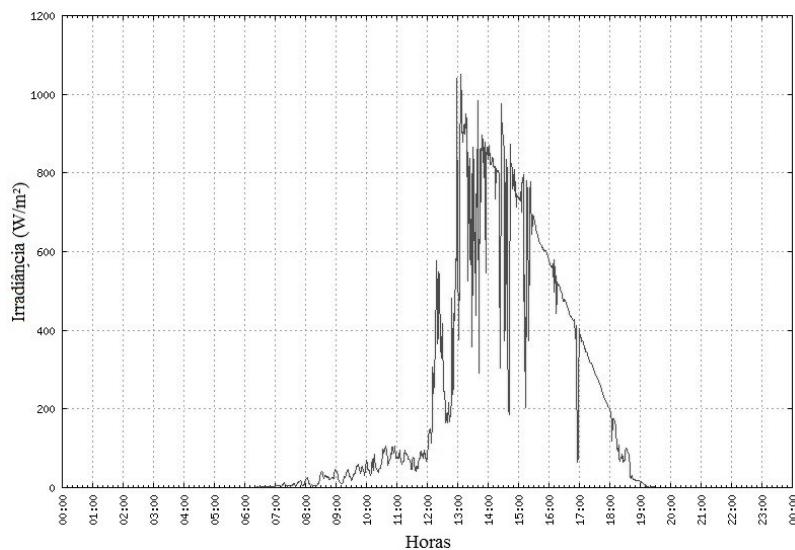
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados obtidos de [136, 138].

Figura 3.20 – Variações da máxima irradiância ao longo do ano completo de 2017.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados obtidos de [136, 138].

Figura 3.21 – Variações da irradiância de um dia completo (27 de abril de 2017).



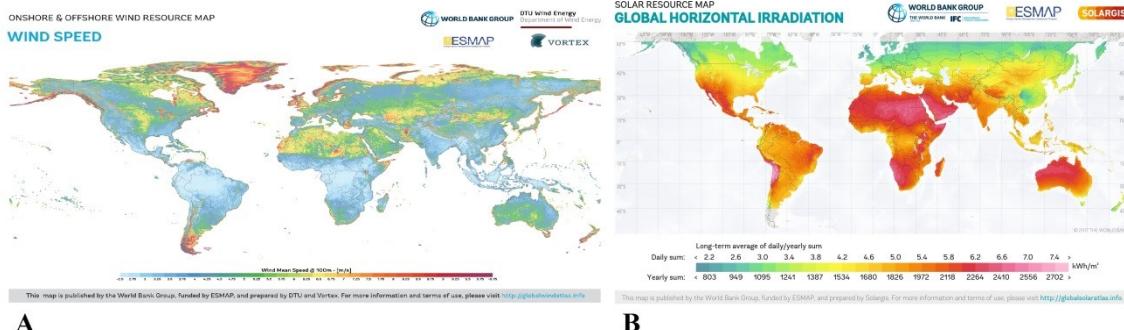
Fonte: Adaptado de [136, 138].

Como para as pequenas hidroelétricas a vazão é menor e muitas são do tipo fio d'água, a irregularidade é maior do que a das grandes hidroelétricas “tradicionais” que podem ser despachadas. Para as pequenas hidroelétricas, portanto, a variabilidade pode ser muito alta ao longo do tempo. Em um mesmo dia, uma precipitação forte é capaz de elevar subitamente a geração de energia elétrica e, com seu fim, logo depois esta geração pode voltar a diminuir. Além disso, a própria quantidade de chuva varia bastante ao longo dos minutos.

3.4.4 - Dependência da Localização Geográfica

Além do tempo e do clima, a variabilidade e a intermitência dependem daquilo que é próprio da Geração Distribuída conforme definido neste trabalho: de sua localização geográfica e física. Em cada região, os ventos, a irradiação solar e o fluxo das águas podem ser muito diferentes. Consequentemente, como estes fenômenos naturais variam ao longo do tempo também é muito distinto. A Figura 3.22 ilustra a multiplicidade de velocidades do vento e de irradiação solar em um mapa-múndi.

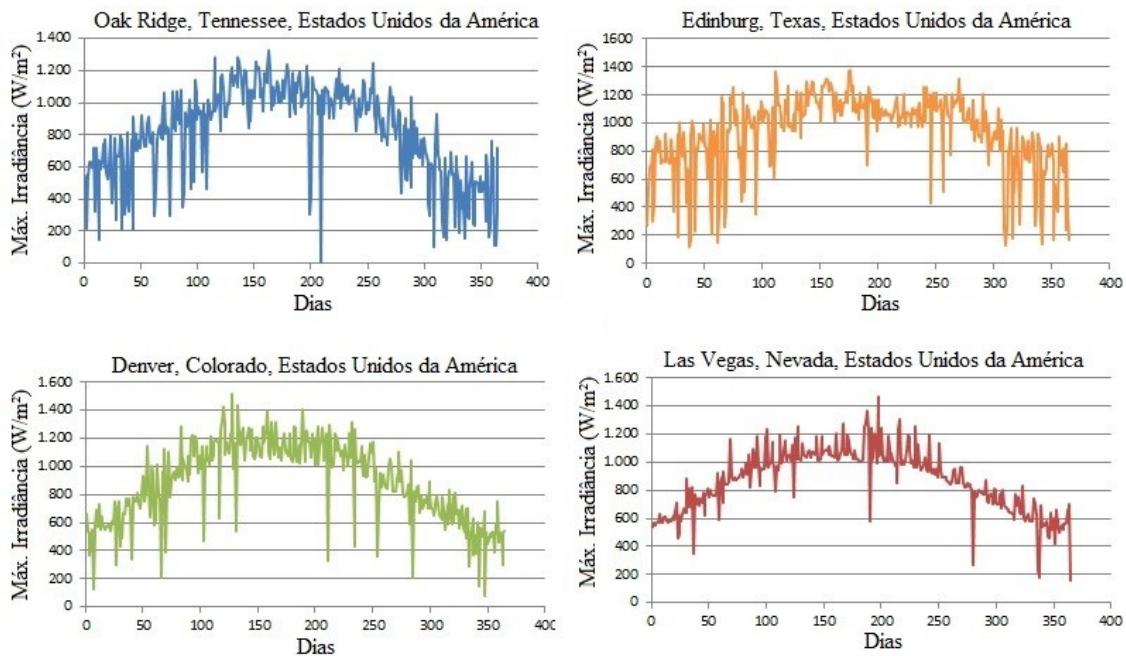
Figura 3.22 – A. Mapa-múndi mostrando velocidades do vento (2,5 a 9,75 m/s²). **B.** Mapa-múndi mostrando as somas diárias e anuais (escala de 2 a 7,6 kWh/m²) de irradiação solar.



Fonte: [183] para 3.22A e [182] para 3.22B.

A Figura 3.23 ilustra o caso da energia solar fotovoltaica, mostrando a variação da irradiação máxima diária para o ano completo de 2014 de quatro cidades de estados diferentes dos Estados Unidos da América: Oak Ridge em Tennessee (Lat.: 35,92996° Norte, Long.: 84.30952° Oeste) [138], Edinburg em Texas (Lat.: 26.3059° Norte, Long.: 98.1716° Oeste) [139], Denver em Colorado (Lat.: 39.75685° Norte, Long.: 104.62025° Oeste) [137] e Las Vegas em Nevada (Lat.: 36.107° Norte, Long.: 115.1425° Oeste) [140]. É interessante observar que esta última, uma cidade que fica no interior de um deserto e que, por isso, recebe luz solar praticamente o ano todo com poucas nuvens, apresenta menores variações do que as outras cidades.

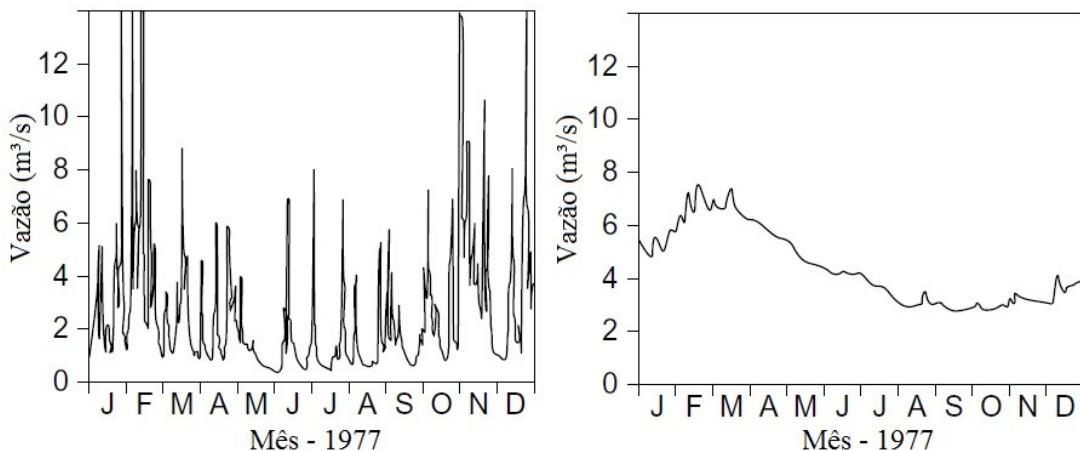
Figura 3.23 – Variações da máxima irradiação ao longo do ano completo de 2014 para quatro cidades de estados diferentes dos Estados Unidos da América.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados obtidos de [136, 138, 139, 137, 140].

Cada rio tem uma vazão diferente e, assim, a região geográfica influenciará a produção de energia elétrica pelas pequenas hidroelétricas. A Figura 3.24 demonstra este caso, apresentando a vazão em m³/s de dois rios diferentes em um mesmo ano. Fica claro como a localização geográfica pode determinar como será a variabilidade desta tecnologia.

Figura 3.24 – Variabilidade de vazão diária ao longo de um mesmo ano (1977) para dois rios diferentes.



Fonte: Adaptado de [109].

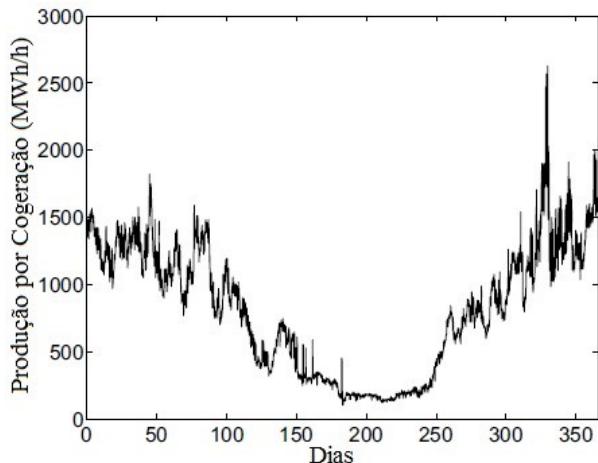
3.4.5 - Dependência da Localização Física

A localização física também influencia diretamente na variabilidade e na intermitência. A energia eólica pode apresentar características diversas devido à altura das torres, se os lugares são planos ou não e da turbulência do local. Quanto mais alta a torre, maior a potência produzida e menor a turbulência. Esta última, por sua vez, pode ser muito diferente dependendo se há montanhas, rios, árvores e edifícios próximos de onde a turbina foi instalada [24].

Um sistema fotovoltaico pode ter diferentes variações e mesmo paradas dependendo da posição dos módulos, de seus ângulos em relação ao sol, mas também de onde foi instalada. Se os módulos fotovoltaicos foram colocados em locais incorretos, eles poderão facilmente ser sombreados. Por exemplo, quando são postos onde há a passagem de pessoas entre eles e o sol, fatalmente haverá intermitência nestes momentos. Ou ainda, em uma planta fotovoltaica existe uma distância ótima para que os módulos não façam sombras uns nos outros. Também é possível que os módulos sejam instalados em áreas onde ocorra uma grande queda de quaisquer substâncias em cima deles. Tampados por elas, os módulos passarão por variabilidade e intermitência. É, portanto, importante planejar bem a localização em que o sistema fotovoltaico será instalado.

Um caso especial é o da cogeração. Independente de fatores climáticos que parecem ser os maiores causadores de variabilidade e intermitência, ela pode sofrer destes males dependendo de onde foi instalada. Na indústria, a demanda por calor é praticamente constante durante um ano inteiro e a produção de eletricidade por cogeração é constante e despachável. Já no emprego da microcogeração, principalmente caseira, a demanda por energia térmica para aquecimento muda durante vários períodos diferentes [24]. A Figura 3.25, retirada de [24], ilustra isso. Ela mostra a produção horária de energia elétrica por cogeração na Suécia durante o ano de 2008. Enquanto no início e fim de ano, ou seja, no verão europeu, a geração é mais alta, no inverno (meio do ano), ela diminui bastante.

Figura 3.25 – Produção por hora de energia elétrica por cogeração no ano de 2008 na Suécia.



Fonte: Adaptado de [24].

3.4.6 - Problemas com Geração Distribuída Variável e Intermittente

A variabilidade e a intermitência podem causar problemas para o sistema elétrico. Algumas que podem ser destacadas são as flutuações de tensão (*flicker*), flutuações de potência na rede e efeitos na frequência da rede [167]. As flutuações de tensão consistem em variações rápidas na tensão padronizada da rede, o que é causado pela passagem de nuvens para sistemas fotovoltaicos e das súbitas mudanças na velocidade dos ventos para turbinas eólicas. As alterações na potência ao longo do tempo podem afetar dispositivos sensíveis ligados às fontes variáveis e intermitentes pela rede elétrica. Por fim, a frequência pode sofrer grandes variações pela variabilidade e intermitência presente, principalmente se a usina eólica ou fotovoltaica for de grande porte.

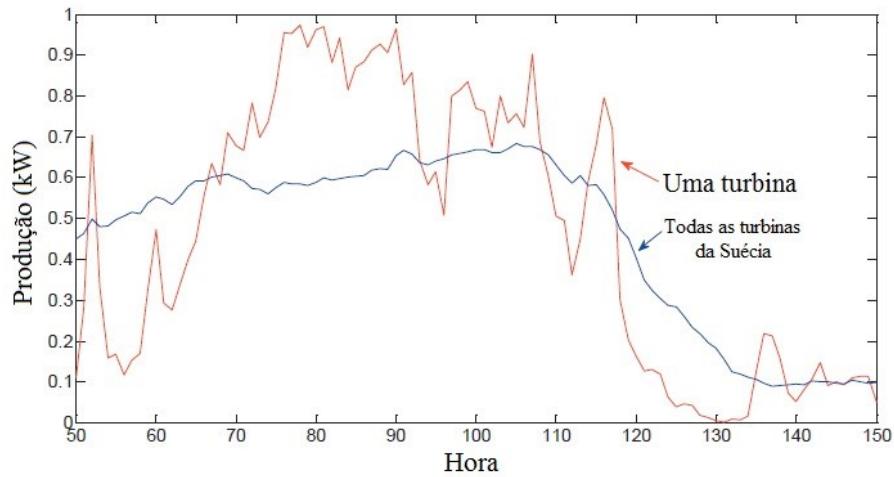
Outro problema já apontado é a falta de despacho das tecnologias que apresentam variabilidade e intermitência. A produção não consegue acompanhar a carga, visto que a primeira depende de fatores incontroláveis pelo ser humano, tais como o clima, enquanto a segunda se deve principalmente a fatores sociais. A ausência de correlação entre a geração e o consumo de energia elétrica é identificada como uma das justificativas para não se trocar a “geração tradicional” pela Geração Distribuída, principalmente as renováveis que costumam ter estas características. A seguir serão vistas algumas maneiras que permitem romper com estas dificuldades.

3.4.7 - Meios para Abrandar a Variabilidade e a Intermitência

Tendo como dependência as localizações geográfica e física para a variabilidade e a intermitência, uma das soluções para diminuí-las é espalhar os geradores em uma maior área. Elas poderão não cessar, mas existirá uma maior previsibilidade, sendo suavizadas principalmente as variações dentro de uma faixa menor de tempo com a dispersão geográfica [167]. As Figuras 3.26 e 3.27 mostram como um maior número de turbinas eólicas e sistemas fotovoltaicos, respectivamente, espalhados em uma grande região podem suprimir as variações de curto tempo para trazer uma produção mais previsível de energia elétrica. Na

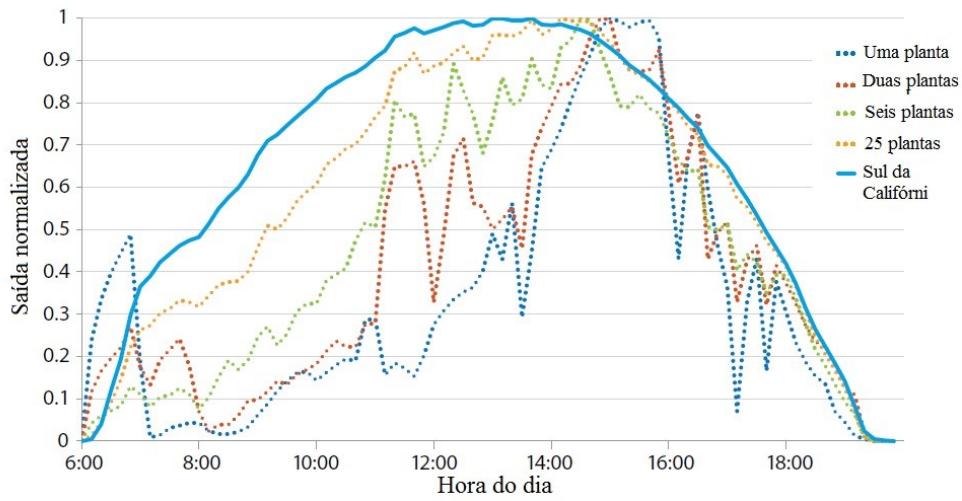
Figura 3.26 [69], duas situações são apresentadas entre as horas 50 e 150 do ano de 2008, sendo uma a geração de uma única turbina eólica na Suécia e em outra a produção de todas as turbinas eólicas do mesmo país. Já na Figura 3.27 [128], é apresentada a produção normalizada de sistemas fotovoltaicos com diferentes quantidades e localizações geográficas dentro do sul da Califórnia nos Estados Unidos, assim como toda esta região, ao longo de um dia parcialmente coberto de nuvens.

Figura 3.26 – Mitigação da variabilidade com dispersão geográfica para energia eólica apresentando produção de potência elétrica (kW) para uma única turbina eólica na Suécia e para todas as turbinas do mesmo país entre as horas 50 e 150 do ano de 2008.



Fonte: Adaptado de [69].

Figura 3.27 – Mitigação da variabilidade com dispersão geográfica para energia solar fotovoltaica apresentando produção normalizada para diferentes configurações em quantidade e localização para a região do sul da Califórnia nos Estados Unidos, incluindo toda a região, em um dia parcialmente coberto por nuvens.

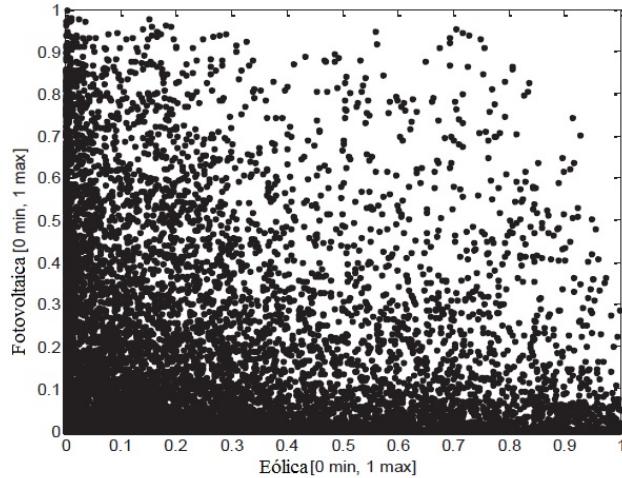


Fonte: Adaptado de [128].

A diversidade de fontes é outra proposta para amenizar os problemas consequentes da variabilidade e da intermitência, principalmente na falta de correlação entre produção e consumo. As energias eólica e solar fotovoltaica podem ser usadas em conjunto para produzir potência durante mais tempo e com menores variações, visto que o máximo de produção das duas são muito improváveis de acontecer no mesmo momento como mostra a Figura 3.28

[71]. Assim, há grandes chances de que quando uma tiver redução na produção, a outra terá aumentado este valor. O resultado é que a rede elétrica enxergará menores variações de potência e possivelmente não verá interrupções.

Figura 3.28 – Correlação entre produção por energia eólica e energia solar fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de [71].

Mais uma possibilidade para amenizar a variabilidade e a intermitência é através do uso de armazenamento de energia. Este tema será tratado em outra seção adiante, mas vale destacar que empregar baterias ou outros dispositivos desta ordem podem fazer com que as fontes variáveis e intermitentes sejam totalmente controláveis, tornando-as despacháveis.

Algumas vezes, a variação da produção pode exceder certos valores que fazem com que os limites permitidos de tensão pelas concessionárias para o sistema elétrico sejam ultrapassados. Assim, o que também pode ser feito é o contingenciamento [71], ou seja, reduzir a potência produzida por determinadas fontes quando a geração puder afetar negativamente o sistema elétrico. O benefício vai além de se manter dentro dos limites. Dependendo do bom uso de contingenciamento, a quantidade de Geração Distribuída conectada à rede elétrica pode ser aumentada. Em [71], casos sem e com contingenciamento são analisados para diferentes configurações de matriz energética para limites de corrente.

Por fim, o recurso de MPPT é amplamente usado para que seja sempre obtida a máxima potência tanto para energia solar fotovoltaica, quanto para energia eólica. Mesmo que existam sombras ou os ventos variem a velocidade, existem condições de operação ótima de potência. Assim, aplicando o MPPT, a queda rápida na produção de energia elétrica por ambas as tecnologias não precisa ser tão profunda, suavizando a variabilidade.

3.5 – Geração Distribuída, a Qualidade da Energia e a Capacidade de Hospedagem

A Geração Distribuída afeta e é afetada pela qualidade da energia e algumas destas dificuldades já foram apontadas de forma discreta, entremeadas nos diversos assuntos tratados neste capítulo. Mas, que é isto, a qualidade da energia? Para Dugan et al. em [55], um problema de qualidade da energia consiste em qualquer problema de “desvios de tensão, corrente ou frequência que resulte em falhas ou má operação dos equipamentos dos usuários

[55]”. Já para Bollen em [26], qualidade da energia se refere à combinação entre a qualidade da tensão e a qualidade da corrente. Assim, “a qualidade da energia se concentra nos desvios de tensão e/ou corrente do ideal [26]”. Para esta última definição, é bom ressaltar que a qualidade da tensão está associada a como a tensão de alimentação afeta as cargas, enquanto a qualidade da corrente versa sobre como a corrente das cargas impactam o sistema elétrico. A discussão é mais extensa e pode ser vista nestes dois livros supracitados. O mais importante é entender que a qualidade da energia trata dos desvios das principais entidades relacionadas à energia elétrica, sendo elas tensão, corrente e frequência.

A qualidade da energia tem uma estreita relação com a Geração Distribuída e parece ter tido um caminho paralelo a ela ao longo dos anos. De forma semelhante, a expressão “qualidade da energia” parece ter surgido no fim dos anos 1960 e início dos anos 1970, apesar dos problemas nesta área já serem tratados muito tempo antes [26]. Como a Geração Distribuída, o interesse e as pesquisas sobre qualidade da energia aumentaram substancialmente a partir dos anos 1990 para não mais pararem de crescer. Atualmente, as pesquisas nas duas estão intimamente ligadas [154, 27].

De acordo com [55], há quatro problemas principais pela qual a qualidade da energia sofre com a Geração Distribuída: interrupções sustentadas (confiabilidade), regulação de tensão, harmônicas e afundamentos de tensão. Já para [28], existem três aspectos que relacionam qualidade da energia e Geração Distribuída. Primeiro, as tecnologias de Geração Distribuída são afetadas pela qualidade da energia como qualquer outro equipamento. Segundo, as tecnologias de Geração Distribuída afetam a qualidade da corrente e, através da rede elétrica, consequentemente, a qualidade da tensão para outros usuários. Terceiro, indiretamente, a retirada (*trip*) da Geração Distribuída pode afetar o sistema elétrico de diferentes maneiras [28]. Um exame minucioso de cada um pode ser encontrado no próprio artigo. Alguns dos conflitos específicos entre a integração da Geração Distribuída e a qualidade da energia são debatidos em [9].

O propósito desta seção, todavia, não é discorrer detalhadamente sobre cada um dos benefícios e malefícios entre as duas. O escopo dela é a análise de uma metodologia pela qual se tenta estabelecer quantitativamente a coesão entre a inserção da Geração Distribuída no sistema elétrico e a qualidade de energia: a capacidade de hospedagem.

O termo “capacidade de hospedagem” foi introduzido por André Even nas discussões em 2004 para o projeto EU-DEEP e posteriormente elaborado por seus colaboradores, conforme contam [24, 29]. O EU-DEEP (*“The birth of a European Distributed Energy Partnership that will help the large-scale implementation of distributed energy resources in Europe”*), por sua vez, se tratava de um projeto de pesquisa e desenvolvimento reunindo diversos grupos para, como o longo nome indica, estudar e apresentar metodologias para acelerar a integração da Geração Distribuída no sistema elétrico e no mercado de energia elétrica da Europa [45]. Sua abordagem principal não era apresentar grandes modificações na rede elétrica, mas sim explorar as tecnologias e práticas já existentes, sendo o uso de novas técnicas algo complementar para integração da Geração Distribuída [81].

Estas ideias do EU-DEEP embasaram a conceituação da capacidade de hospedagem. A ideia progrediu e foi aplicada em diversas ocasiões, mostrando seu potencial. Rapidamente a expressão ganhou força e passou a ser empregada por vários pesquisadores e também por órgãos reguladores e operadores do sistema elétrico, tais como o grupo regulador europeu

“European Regulator Group for Electricity and Gas” (ERGEG) [68] e o representante de diversos operadores europeus do sistema de transmissão, chamado “European Network of Transmission System Operators” (ENTSO-E) [65], que sempre são mencionados pelos estudiosos criadores do conceito, como método para realização do “futuro sistema elétrico”. Uma revisão bibliográfica exaustiva sobre as aplicações do método da capacidade de hospedagem pode ser encontrada em [69]. Diversas aplicações desta abordagem também são apresentadas e discutidas em todos os trabalhos mencionados nesta seção. No entanto, o estudo mais profundo e que trata de forma minuciosa o tema é [24].

Mas, afinal, o que é a capacidade de hospedagem e como ela pode ajudar a Geração Distribuída a ser integrada no sistema elétrico sem danificá-lo? A capacidade de hospedagem é a máxima quantidade de Geração Distribuída que pode ser inserida no sistema elétrico sem que ele seja afetado negativamente [28]. Ela quantifica de forma transparente a penetração da Geração Distribuída na rede elétrica e isto permite discussões mais claras e estimativas mais precisas para que se possa avaliar e agir nesta situação mais facilmente. Atualmente, a abordagem da capacidade de hospedagem serve tanto para produção como para equipamentos de consumo, tais como veículos elétricos que são conectados à rede elétrica. Sendo assim, a capacidade de hospedagem se apresenta como uma ótima ferramenta para planejamento [70].

A metodologia da capacidade de hospedagem se aproveita de um artifício que é bastante comum nos estudos de qualidade da energia. Nela é usada índices de desempenho e limites são definidos para determinar a quantidade de Geração Distribuída que deteriorará ou não o funcionamento do sistema elétrico. Diversos fenômenos podem ser escolhidos para o estudo. Eles não precisam estar diretamente ligados à qualidade da energia ou à confiabilidade, mas podem estar relacionados. Alguns exemplos são distorção harmônica, afundamentos de tensão, sobrecargas, perdas, regulação de tensão, desequilíbrio, *flicker*, etc.

Após se optar pelo fenômeno a ser investigado usando a capacidade de hospedagem, os índices de desempenho e os limites devem ser determinados. Este é um dos problemas da abordagem, pois para que sua aplicação seja satisfatória, ela depende de muitas particularidades. Se os valores para os índices de desempenho e para os limites não forem escolhidos adequadamente, erros podem surgir. Mais ainda, a capacidade de hospedagem serve apenas para casos específicos. Quando há mudanças do dia e momento do ano, da tecnologia de Geração Distribuída e de sua localização, ela também pode ser alterada [44]. Os dados usados são também de suma importância. Apesar destes alertas, com cuidado é possível obter ótimos resultados.

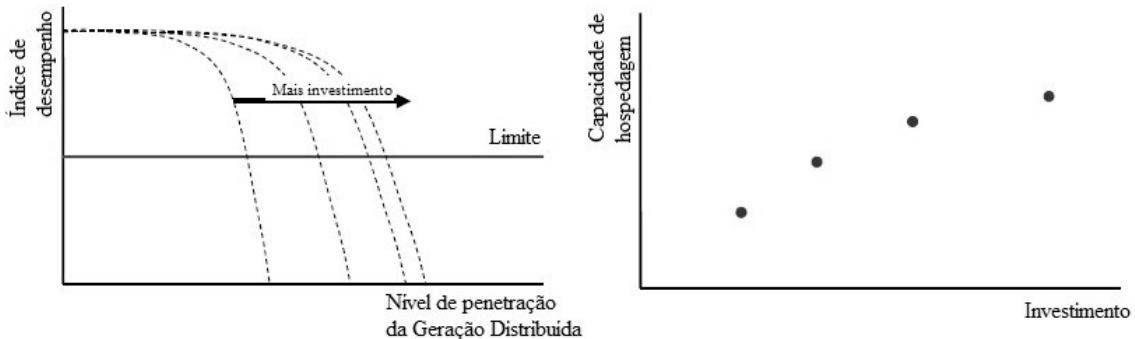
Em [30], são apresentados os quatro passos a serem seguidos para se aplicar o método da capacidade de hospedagem:

- Escolhe-se um fenômeno e um ou mais índices de desempenho;
- Determina-se um limite aceitável ou limites;
- Calcula-se o índice de desempenho ou índices como função da quantidade da Geração Distribuída;
- Obtém-se a capacidade de hospedagem.

Algo que deve ser notado é que várias vezes a Geração Distribuída pode melhorar a operação do sistema elétrico e não necessariamente deteriorá-lo. Há ainda situações em que o nível de degradação da rede elétrica é aceitável. Outro ponto para se destacar é que

investimentos no sistema elétrico que o torne mais robusto e preparado para a penetração da Geração Distribuída obviamente aumenta a capacidade de hospedagem, como pode ser visto na Figura 3.29A. A Figura 3.29B relaciona a capacidade de hospedagem como função do investimento [28].

Figura 3.29 – A. Índice de desempenho em função do nível de penetração da Geração Distribuída se alterando com investimento. **B.** Capacidade de hospedagem em função do investimento.

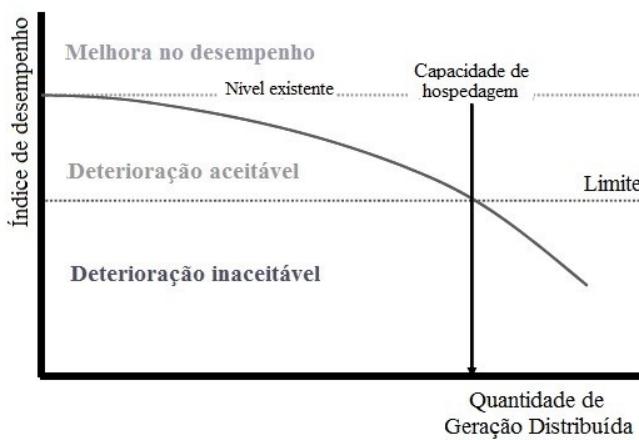


Fonte: Adaptado de [28].

A seguir, são apresentadas três Figuras plausíveis, porém hipotéticas, de capacidade de hospedagem. Estas Figuras foram retiradas de [24] e a análise que segue é inteiramente baseada nesta referência somente para ilustrar como funciona a aplicação da capacidade de hospedagem.

Na Figura 3.30, qualquer aumento na quantidade de Geração Distribuída levará o sistema a uma situação de deterioração aceitável. Quanto mais se acrescentar, menor será o índice de desempenho. Em um determinado momento, se continuar a crescer a Geração Distribuída, o limite será ultrapassado e o sistema elétrico estará sendo degradado de forma inaceitável, seja para seu funcionamento adequado, seja para os impactos que podem ser causados em outros usuários.

Figura 3.30 – Capacidade de hospedagem para alto índice de desempenho favorável.

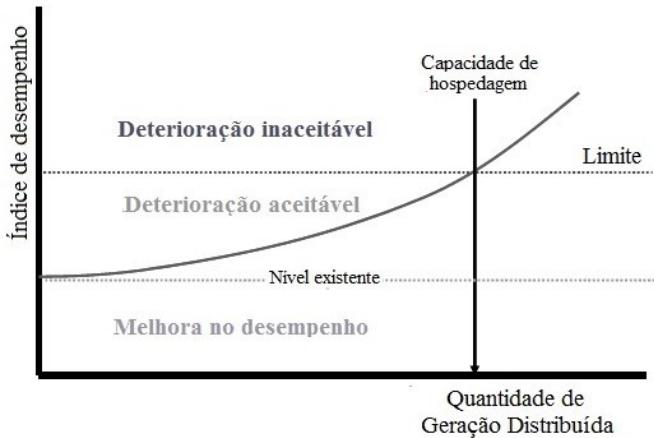


Fonte: Adaptado de [24].

Na Figura 3.31, a única diferença para a Figura 3.30 é que o aumento na quantidade de Geração Distribuída também fará crescer o índice de desempenho, sendo que sua subida

indica deterioração e não melhora. Da mesma forma, quando o índice de desempenho alcança um valor limite, a capacidade de hospedagem pode ser ultrapassada e o sistema elétrico passa a ser afetado em excesso.

Figura 3.31 – Capacidade de hospedagem para baixo índice de desempenho favorável.



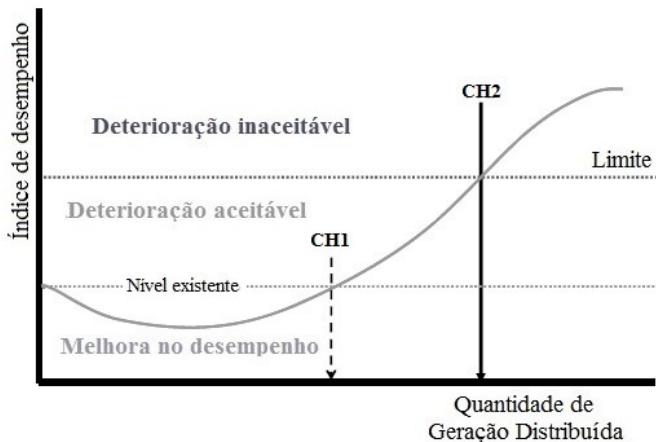
Fonte: Adaptado de [24].

Antes de prosseguir para a Figura 3.32, os índices hipotéticos das Figuras 3.30 e 3.31 podem ser comparados com aqueles usados em normas, que é o mais aconselhável a se fazer. Tomando a Figura 3.31, o índice de desempenho pode ser a distorção harmônica. Se a Geração Distribuída contribuir com seu aumento, o sistema elétrico pode ser deteriorado. Se, por exemplo, for determinado que este valor deve estar obrigatoriamente abaixo de 5%, este número pode ser o limite e representa a capacidade de hospedagem. Acima dele, a situação se torna inaceitável e a maior penetração da Geração Distribuída será problemática.

A Figura 3.32 já traça outra situação para a capacidade de hospedagem. Desta vez, duas capacidades de hospedagem são indicadas. Isto acontece porque inicialmente o aumento da Geração Distribuída contribui com a melhora do desempenho do sistema elétrico. Ao se aumentar mais sua penetração, o índice de desempenho que decaía, começa a subir. Um primeiro ponto de capacidade de hospedagem (CH1) pode ser ultrapassado e então o sistema elétrico entra em uma deterioração aceitável. Se mais Geração Distribuída participar desta rede elétrica, ainda outro ponto de capacidade de hospedagem (CH2) pode ser passado, levando o índice de desempenho ao seu patamar limite, o que traz deterioração insustentável.

Por fim, deve ser apontado que existem inúmeras formas de fazer com que a capacidade de hospedagem seja aumentada, como aquelas discutidas ao longo de todo este trabalho. Além do investimento convencional, um bom planejamento pode fazer com que mais Geração Distribuída possa ser integrada no sistema elétrico. Outras práticas que não envolvam adicionar ou modificar com equipamentos a rede elétrica também são possíveis, tal como é o caso do contingenciamento para variabilidade e intermitência. No entanto, novas soluções tecnológicas que introduzem equipamentos ou modificam a própria estrutura do sistema elétrico são promissoras para aumento da capacidade de hospedagem e, consequentemente, ampliação da quantidade de Geração Distribuída. Algumas delas serão vistas na seção seguinte.

Figura 3.32– Situação com dois pontos de capacidade de hospedagem em que inicialmente há melhora do sistema elétrico para depois ocorrer deterioração dependendo do crescimento da quantidade de Geração Distribuída.



Fonte: Adaptado de [24].

3.6 – Geração Distribuída e as Soluções Tecnológicas de Integração

Para resolver o impasse de integrar uma maior quantidade de Geração Distribuída no sistema elétrico e ao mesmo tempo aprimorá-lo, algumas soluções tecnológicas têm sido propostas. Elas introduzem equipamentos que eram pouco comuns para a própria operação da rede elétrica e alguns novos. Elas também incorporam técnicas e métodos advindos de outras áreas para melhorar o funcionamento da rede. As mudanças são tamanhas que elas podem alterar a própria estrutura física e operacional do sistema elétrico, trazendo um novo e rompendo com o convencional.

Três em especial têm ganhado destaque. São elas: os recursos energéticos distribuídos, que aglomeram a Geração Distribuída ao armazenamento de energia; as microrredes (*microgrids*) e as redes elétricas inteligentes (*smart grids*). Cada uma será apresentada e discutida a seguir de forma simples e resumida para que o leitor tenha uma noção do que está por vir no “novo sistema elétrico”.

3.6.1 – Recursos Energéticos Distribuídos (Geração Distribuída e Armazenamento de Energia)

Os recursos energéticos distribuídos consistem na Geração Distribuída somada ao armazenamento de energia. Esta última, através de suas várias tecnologias, é uma ferramenta que proporciona melhor desempenho da Geração Distribuída em relação às exigências do sistema elétrico. Suas duas maiores contribuições estão no abrandamento dos efeitos da variabilidade e da intermitência e, consequentemente, nos seus impactos na qualidade da energia e confiabilidade e no ajuste entre a produção pela Geração Distribuída e a demanda, trazendo equilíbrio entre as duas, tornando estas tecnologias despacháveis. Mais precisamente, em [142], o papel e as funções técnicas do armazenamento de energia que podem ser listados são: suportes de tensão e frequência à rede, estabilidade transitória angular da rede, nivelamento de carga/produção de pico (*peak shaving*), reserva de prontidão

(*spinning reserve*), melhora na qualidade da energia, confiabilidade, suportabilidade a faltas e compensação a desequilíbrio de carga. Ou seja, o armazenamento de energia é capaz de alargar os serviços anciares que a Geração Distribuída pode fornecer.

Qualquer aparato que seja capaz de transformar eletricidade e guardar alguma forma de energia obtida dela para depois ser facilmente convertida de volta em energia elétrica é considerado um armazenamento de energia. Uma das maiores dificuldades de se trabalhar com eletricidade é justamente o de que ela deve ser consumida assim que é gerada. O armazenamento de energia tenta desmantelar isso, ao transpor energia elétrica para outra forma de energia e, depois, voltar ao seu estado inicial elétrico. Existem diferentes tecnologias para armazenamento de energia, que incluem seis principais, nomeadamente: *Flywheels*, baterias, hidrogênio, supercapacitores, armazenamento por ar comprimido e armazenamento por usinas hidroelétricas reversíveis ou de bombeamento. A seguir, estas tecnologias são descritas baseadas em [88, 142].

As *Flywheels* são equipamentos eletromecânicos de armazenamento de energia que guardam energia cinética. Uma máquina elétrica conectada a uma massa girante permite a conversão de energia elétrica para mecânica e vice-versa. Ao se ligar estes dispositivos ao gerador ou sistema elétrico, a máquina elétrica opera como motor e faz acelerar e girar a massa em velocidades que vão de 6000 RPM até 50000 RPM, sendo que a energia armazenada é proporcional a elas. Para que ela libere energia elétrica, basta desacelerar a massa e fazer da máquina elétrica um gerador que proporciona a eletricidade através de, geralmente, um conversor de eletrônica de potência.

As baterias são a forma mais antiga de se armazenar energia elétrica. Elas consistem em dispositivos recarregáveis que transformam eletricidade e a guarda na forma de energia química através de células eletroquímicas, sendo formada por dois eletrodos e um eletrólito separando-os. O processo pode ser revertido para gerar novamente energia elétrica a partir da energia química. As baterias mais usadas atualmente são as de: chumbo-ácido, baseadas em níquel e íon-lítio.

O armazenamento por hidrogênio é uma tecnologia mais recente e está em desenvolvimento. Esta substância pode estar em diferentes configurações, como em gás, em líquido, pressurizado, hidretos metálicos e usando nanofibras de carbono. Para ser liberado como eletricidade, uma célula a combustível pode ser usada.

Os supercapacitores ou ultracapacitores são capacitores que, pela construção, conseguem armazenar uma grande energia por terem uma alta capacitância. A energia elétrica é guardada como em qualquer outro capacitor através do campo elétrico gerado entre suas duas placas com seu dielétrico. As placas geralmente ficam separadas por uma camada muitíssimo fina e possuem áreas maiores que os capacitores convencionais.

O armazenamento por ar comprimido é feito usando energia elétrica fornecida fora do horário de pico para bombear ar dentro de uma caverna subterrânea com alta pressão. Para retornar a energia elétrica, principalmente no horário de pico, o ar é aquecido vagarosamente para acionar uma turbina acoplada a um gerador para produção de potência elétrica.

Finalmente, o armazenamento por usinas hidroelétricas reversíveis ou de bombeamento trata-se de dois reservatórios de água com uma grande diferença de altura entre si. No momento de baixo consumo de eletricidade, a água do reservatório do nível baixo é

bombeada até o reservatório do nível mais alto. Chegando os horários de pico, a água então escoa por uma turbina do reservatório mais alto para o mais baixo produzindo energia elétrica. De todas as tecnologias discorridas, esta é a que possui maior capacidade de armazenamento. As turbinas com seus geradores podem ser reversíveis para bombear e produzir eletricidade quando exigidas.

3.6.2 – Microrredes (*Microgrids*)

As microrredes (*microgrids*) são um conceito recente dentro da engenharia elétrica sobre o sistema elétrico. Trata-se de um aglomerado local e de controle único de tecnologias de Geração Distribuída de pequeno porte, de equipamentos de armazenamento de energia e de cargas, sejam elas residenciais, comerciais ou industriais, onde eletricidade e calor são providos dentro de sua área, podendo ser entendido como um subsistema do próprio sistema elétrico [125, 126]. A aplicação desta ideia abarca vários benefícios para uso da Geração Distribuída. Uma das funções mais interessantes das microrredes é a possibilidade de funcionar conectado à rede de distribuição ou em ilhamento intencional, isolando-se do sistema elétrico. Esta última forma de operação é extremamente vantajosa do ponto de vista da confiabilidade, visto que permite que as cargas continuem sendo alimentadas mesmo em situações de distúrbios na rede.

Para que as microrredes operem satisfatoriamente, alguns requisitos devem ser atendidos. Em primeiro lugar, por questões econômicas e ambientais, a Geração Distribuída empregada deve ser de pequena escala e deve poluir de forma irrigária. Por esse motivo, sistemas fotovoltaicos, células a combustível e microturbinas são opções favoráveis, fora a cogeração e a microcogeração. O segundo requisito é que o sistema disponha de controle avançado, sobretudo nos geradores, para que em todas as conjunturas, nem a própria microrrede e seus componentes, nem a rede elétrica sejam prejudicadas. A eletrônica de potência é a tecnologia adequada e imperativa para isso. Como a maior parte das fontes de Geração Distribuída têm como interface algum conversor de eletrônica de potência, tal qual é o caso das três supracitadas, este controle imprescindível às microrredes é seguramente obtido, sendo o inversor o artefato ideal neste caminho. Assim, de acordo com Lasseter [125], a arquitetura das microrredes deve ser necessariamente composta de três componentes capitais: controles locais das tecnologias de Geração Distribuída, otimizador do sistema e proteção distribuída. Geralmente, elas são conectadas por um único ponto à rede elétrica e um dispositivo de separação, como uma chave estática, deve estar presente nele.

Para assegurar um baixo custo e flexibilidade, a arquitetura das microrredes deve agregar duas características: “par-a-par” (“*peer-to-peer*”) e “ligar-e-usar” (“*plug-and-play*”) [126]. A primeira se refere à independência de qualquer dos componentes do sistema. Ou seja, na perda de um gerador ou de um controlador, o restante da microrrede não pode ser afetado. Para garantir isso, o método (N+1) para a geração é aconselhado, pelo qual um gerador adicional, que é mais do que a quantidade suficiente para o sistema, deve ser instalado. Já a segunda característica de “ligar-e-usar” está relacionada à possibilidade de conectar a geração em qualquer ponto do sistema e em qualquer momento, sem impactar o controle geral.

Os métodos de controle das microrredes não serão detalhados aqui, mas é importante notar que se usa controle de inclinação (“*droop control*”) de potência reativa x tensão e frequência x potência ativa, assim como é feito para máquinas síncronas isoladas em paralelo. Regulação do fluxo de potência, seguimento de carga e transferência suave de conexão com a rede para ilhamento e vice-versa são alguns dos objetivos. Os inversores são os mediadores para aplicação destes controles. Relevante também é o fato de que o controle é individual e deve responder ao sistema, se abstendo de comunicação com os outros componentes da microrrede [126].

As microrredes parecem ser uma solução admirável para a integração da Geração Distribuída. Em [92], diversas microrredes de projetos de pesquisa e desenvolvimento em lugares como Europa, Estados Unidos, Japão e Canadá são apresentadas e discutidas. As aplicações delas podem ser bastante diversificadas e não ficam restritas à conexão com o sistema elétrico. Microrredes autônomas têm sido exploradas, principalmente em regiões fora do alcance de redes elétricas, tal como é o caso de ilhas. Enfim, pelo que tudo indica, o futuro das microrredes parece ser proeminente.

3.6.3 – Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*)

Passaram-se mais de 100 anos desde que o sistema elétrico ficou estabelecido definitivamente conforme foi mostrado no capítulo 1 e pouco mudou desde então em sua infraestrutura. Apesar de vários dispositivos terem sido melhorados e outros criados ao longo desse tempo, o modelo básico da rede elétrica continua o mesmo, assim como seu funcionamento. Sua complexidade e grandiosidade explicam parte desta inércia. Até agora ela tem operado de maneira formidável com qualidade e confiabilidade de alto nível inegáveis. Entretanto, ainda há espaço para melhorias. A Geração Distribuída foi um grande passo para sua transformação, além de provar que é preciso modificá-la para que opere de forma ainda mais aprimorada. Todavia, a mudança mais radical virá com as redes elétricas inteligentes (*smart grids*).

É difícil dar uma definição exata para o que são as redes elétricas inteligentes, pois ela é muito mais que simples transformações estruturais e de dispositivos. É possível, porém, apontar várias de suas características que não podem faltar em qualquer uma de suas acepções. São muitas as tecnologias, métodos e técnicas que compreendem uma rede elétrica inteligente.

O ponto central é trazer “inteligência” para o sistema elétrico. Isto quer dizer que é preciso incluir dispositivos de informação, computação, comunicação, automação e controle que não sejam centralizados e estejam dispostos em todos os geradores, subestações, equipamentos de proteção e mesmo dentro dos aparelhos de consumo. O sistema então passará a ser autorregenerativo, corrigindo erros e problemas rapidamente e trazendo alto desempenho e confiabilidade, além de poder ser monitorado em tempo real e permitir que os componentes sejam do tipo “ligar-e-usar” (“*plug-and-play*”) [7]. Para se alcançar isso, o DOE indica cinco tecnologias e métodos [178]: comunicação integrada; dispositivos de medida e sensores; componentes avançados; métodos de controle avançados e interfaces aprimoradas e suporte a decisões. A Tabela 3.5 mostra as principais características de mudança comparadas entre a rede elétrica convencional e a inteligente.

Tabela 3.5 – Comparação entre as características de mudança da rede elétrica convencional para a inteligente.

Rede convencional	Rede inteligente
Eletromecânica	Digital
Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração Distribuída
Hierárquica	Rede
Poucos sensores	Sensores por toda parte
Cega	Automonitorada
Restauração manual	Autorrestauração
Falhas e apagões	Adaptativa e ilhamento
Teste/Checagem manual	Teste/Checagem remoto
Controle limitado	Controle generalizado
Poucas escolhas para os usuários	Muitas escolhas para os usuários

Fonte: Adaptada de [74].

As mudanças deverão ter início na rede de distribuição [74], pois é aí que residem os maiores defeitos e é também nesta área do sistema elétrico que as maiores alterações já estão ocorrendo, com a inclusão da Geração Distribuída, do armazenamento de energia e das microrredes. As redes elétricas inteligentes permitirão cumprir o papel ativo que, como já se discutiu, a rede de distribuição precisa ter. Para exercer essa tarefa, elas deverão funcionar não só com comunicação bidirecional, mas também medições bidirecionais. Os medidores inteligentes (*smart meters*) entram com esta função. Estes medidores são controláveis, bidirecionais e possuem comunicação. Desta forma, as concessionárias poderão ter acesso completo e instantâneo aos dados de consumo e demanda dos usuários da rede, além de conseguirem atuar com seus parâmetros pela carga e pela Geração Distribuída instalada no local, para que todo o sistema funcione da maneira mais eficiente possível, alcançando grandes níveis de qualidade, confiabilidade, gerenciamento e proteção [74].

Vale reiterar que os medidores inteligentes são uma ferramenta-chave para as *smart grids*, mas que eles não são conceitos equivalentes [178]. Em outras palavras, a rede elétrica inteligente, apesar de usufruir deste aparato, é muito mais que a simples medição e controle. Ela engloba vários outros métodos e tecnologias. É importante notar também que os recursos energéticos distribuídos, assim como as microrredes e os novos equipamentos consumidores, como os veículos elétricos, não fazem parte do conceito de redes elétricas inteligentes. Contudo, elas são extremamente beneficiadas por elas. Aliás, pode se afirmar que as redes elétricas inteligentes formam o meio mais promissor para a integração correta destas tecnologias. Elas cobrem todos os princípios operacionais que a Geração Distribuída necessita para trabalhar da melhor maneira que pode, provendo as ferramentas para que ela ofereça serviços anciliares e tendo controlados seus fluxos de potência bidirecionais, realizando todo o seu potencial tecnológico.

O processo para se passar do sistema elétrico convencional para as redes elétricas inteligentes é uma transformação revolucionária de infraestrutura conceitualmente, mas evolutiva e não imediata na prática. Por isso, será preciso um longo tempo até que elas sejam bem estabelecidas com todos seus aparelhos e meios de operação. O caminho até lá, no entanto, deve ser de amadurecimento. A rede elétrica atual deve ir passando para uma mais inteligente de pouco em pouco. Antes de se chegar a uma *smart grid*, uma *smarter grid* deve ser perseguida, onde pequenas alterações são feitas, já tornando o sistema mais eficiente, confiável, “verde” e, claro, inteligente [178].

Não há dúvidas de que as redes elétricas inteligentes são o futuro do sistema elétrico e que isto trará mudanças que, assim como a Geração Distribuída tem feito e este trabalho demonstra, vão muito além da tecnologia em si, impactando a sociedade e o meio ambiente. Elas transformarão radicalmente estilos de vida e como o ser humano se relaciona com a natureza para usufruir de suas invenções. Ao que tudo indica e se espera, tudo isso mudará para melhor a vida humana e como o meio ambiente é tratado.

4- Geração Distribuída, o Meio Ambiente e a Sociedade

“A preocupação com o ser humano e seu destino deve constituir sempre o interesse principal de todos os esforços técnicos. Nunca se esqueça disso em seus diagramas e em suas equações.”

(Albert Einstein)

“A natureza tem suas leis e vinga-se de qualquer abuso.”

(Alfred Döblin)

A energia em suas várias formas é uma entidade fundamental na vida humana desde a Revolução Industrial. Ela permitiu que se pudessem produzir objetos e tarefas antes inalcançáveis e inimagináveis com um mínimo de esforços físico e mental e em um tempo curtíssimo. Mais especificamente, a introdução do uso controlado da energia elétrica no fim do século XIX acelerou ainda mais estes processos fecundos e fez avançar tecnologias que abriram novas possibilidades para alterar todo o modo como as pessoas trabalham, se comunicam, interagem entre si, se locomovem, etc. Desde então, com o enorme aumento do consumo de eletricidade, também cresceu a dependência do ser humano com os equipamentos que fazem uso dela.

A geração de energia elétrica é, assim, desde seus primórdios, ponto central da vida moderna. Ela é planejada pelos governos para atender a população, ela degrada, polui e modifica a natureza, suas fontes são motivos de guerras, a construção de usinas causa transformações sociais e ambientais, a falta de produção causa tumulto no cotidiano das pessoas, ela interfere diretamente na produção industrial e nos comércios e, consequentemente, no emprego, etc. Estas são só algumas das consequências da geração de energia elétrica e elas mostram como ela é indissociável da experiência contemporânea sempre passando por alterações na natureza.

Esta dependência, que hoje parece ainda mais inabalável, é reconhecida desde o século passado. O grande sociólogo alemão Max Weber investiga em seu mais famoso livro, “A Ética Protestante e o ‘Espírito’ do Capitalismo” de 1904-05, como a conduta religiosa da crença protestante proporcionou os alicerces para o surgimento do capitalismo moderno e o consequente comportamento social na busca cotidiana pela prosperidade financeira. No final do livro, ele discorre sobre a transformação na vida das pessoas após a consolidação do “espírito” capitalista nas sociedades, independentemente das religiões. Weber sinaliza que, ao transportar a religiosidade para o progresso econômico e técnico, o ser humano passou a ter um modo de viver altamente dependente das máquinas e da energia em suas diversas formas e ainda preconiza que este estilo de vida moderno está fadado ao fim juntamente com o colapso da produção energética:

A ascensão, ao se transferir das celas dos mosteiros para a vida profissional, passou a dominar a moralidade intramundana e assim contribuiu com sua parte para edificar esse poderoso cosmos da ordem econômica moderna ligado aos pressupostos

técnicos e econômicos da produção pela máquina, que hoje determina com pressão avassaladora o estilo de vida de todos os indivíduos que nascem dentro dessa engrenagem – *não só* dos economicamente ativos – e talvez continue a determinar até que cesse de queimar a última porção de combustível fóssil [181].

Muita coisa mudou desde a escrita do livro de Weber, mas a necessidade de energia pelo ser humano tornou-se ainda mais profunda e expandiu. A própria população mundial cresceu exponencialmente, passando de 1,5 bilhão de pessoas naquela época para as cerca de 7,5 bilhões atualmente, e, com isso, o consumo de energia elétrica também se elevou a níveis estratosféricos. Se a humanidade deseja ainda viver com este modo de vida, resta resolver, assim, a questão da produção de energia elétrica. A solução, como ficou demonstrado nos outros capítulos, parece para os especialistas ser a Geração Distribuída, principalmente na forma de tecnologias renováveis. Adotado este caminho, porém, o ser humano novamente parece vagar irrefreavelmente pelo progresso para um futuro incerto. Ele quer avançar, mas como tantas outras vezes aconteceram em seu passado, sua conduta é amplamente extasiada pela inovação, mas densamente ofuscada para as inúmeras implicações sociais e ambientais que uma tecnologia pode trazer. Apesar das maravilhas que a razão humana pode realizar, se elas não forem feitas para o bem comum e para a saúde da natureza, todo o progresso técnico terá sido em vão.

É assim que sob o estilo de vida e o sistema em que a humanidade se encontra, uma nova tecnologia como a Geração Distribuída pode trazer consigo o que se pode chamar aqui de "otimismo atenuante". Ao mesmo tempo em que a inovação pode se mostrar altamente inclinada ao bem-estar da sociedade e da natureza, principalmente se ela for considerada um bem economicamente viável, as pessoas tendem a banir os malefícios que ela incorpora de seus pensamentos. Toda novidade tecnológica parece surgir para resolver problemas e o que muitos fazem é ver somente este lado do artefato, ficando como que cegos a todos os impactos negativos que ela pode proporcionar. É preciso, portanto, sempre que um novo produto se encontra disponível para que a humanidade possa usufruir de suas finalidades, um julgamento crítico, em que sejam observadas e discutidas todas as suas implicações, sejam elas benéficas ou maléficas, tanto para a sociedade, quanto para a natureza. As pessoas precisam ser e estar preparadas para as mudanças.

Uma forma de otimismo que afasta as dificuldades inerentes à tecnologia pode ser bastante prejudicial. A própria história mostra isso. Desde a Revolução Industrial, o ser humano desenvolveu diversos objetos que aumentaram e melhoraram indubitavelmente a vida das pessoas e proporcionaram níveis de produção inimagináveis. Todavia, estes mesmos objetos sempre trouxeram problemas que só foram percebidos tarde e que muitas vezes são extremamente difíceis de serem resolvidos. É o caso das inúmeras formas de poluição, das mudanças climáticas, do desmatamento, da extinção de animais, etc. Para que esta positividade excludente não possa levar cada vez a mais problemas para a sociedade e para o meio ambiente, deve se pensar sempre adiante. Apesar de parecer uma solução fácil, rápida e boa para o presente, uma tecnologia pode no futuro colocar o ser humano novamente em uma posição de dúvida sobre como retomar o seu desenvolvimento sem afetar a si mesmo e à natureza. Toda inovação deve ser posta sob análise rigorosa.

Muitas vezes, o otimismo atenuante é criado pelas empresas e indústrias, por governos e mesmo por pesquisadores. Todos, principalmente quando são proprietários ou ao menos têm ligações muito fortes com as inovações, querem disseminá-las e fazer com que a sociedade as

use de forma abrangente. O motivo pode ser o lucro, mas também pode ser vaidade ou até mesmo uma apreciação incorreta de suas consequências. Independentemente das motivações, é determinante a responsabilidade destes agentes sobre as tecnologias que querem expandir. Devem ser eles os primeiros a fazer as críticas mais severas sobre estes produtos, porque, na maior parte das vezes, possuem os conhecimentos técnicos necessários para a avaliação correta, determinando quão prejudicial ou benéfica estas novidades realmente podem ser.

Em contrapartida, atualmente, para o engenheiro ou especialista as questões a serem resolvidas são puramente técnicas ou econômicas. Em suas profissões, eles tentam aumentar a eficiência e a produtividade, criam novos esquemas e projetos, escolhem os melhores materiais e formas a serem usados, tudo com o mínimo custo possível. Este trabalho é de enorme importância e é essencial para se ter uma tecnologia de alto nível. No entanto, estas atitudes não bastam. Qualquer tecnologia, como já foi comentado, afeta grandemente a sociedade e o meio ambiente de maneiras positivas e negativas. Excluir as dimensões sociais e ambientais do trabalho de um técnico pode ser extremamente danoso para todos. É preciso, por isso, ter uma consciência interdisciplinar sobre o objeto pesquisado e construído e não restringi-lo a um prisma operacional. O que se deve priorizar é uma visão mais ampla, total sobre a tecnologia, em que possam ser discutidas todas as suas consequências, do momento de sua criação passando pelo seu uso até o seu descarte.

Somente apoiado em uma avaliação abrangente e universal em que se exclui o otimismo espontâneo da novidade é que é possível fazer uma ponderação mais satisfatória para as pessoas, para a flora e para a fauna sobre uma tecnologia. Só a partir do momento que se tem o maior número de informações é que pode ser decidido se este ou aquele artefato pode ser usado de forma a trazer o melhor para a sociedade e para o meio ambiente. Nem a humanidade, nem a natureza podem sofrer mais dos mesmos erros cometidos no passado, que ainda hoje são sentidos e que futuramente também continuarão a direcionar o rumo das pessoas.

A Geração Distribuída está sob o efeito de todos estes aspectos apresentados. Ela é tida como a solução mais favorável para a humanidade e para o meio ambiente em termos de produção de energia elétrica, principalmente quando é renovável e, por estar neste otimismo atenuante, pouco se discute sobre suas verdadeiras implicações sociais e ambientais. Aliás, os artigos e livros relacionados a esta matéria parecem trazer à tona estas questões de maneira extremamente rasa como meras justificativas caridosas ou publicitárias para o emprego da Geração Distribuída, mas quase nunca aprofundando o assunto. As apelações para a diminuta poluição atmosférica e o insistente discorrimento sobre a grande e crescente parcela que ela ocupa no setor energético parecem excluir a análise de todas as outras consequências ambientais e sociais, positivas ou negativas, da Geração Distribuída.

No capítulo anterior foram vistos diversos fatores positivos e negativos dela que impactam o sistema elétrico, tanto tecnicamente, quanto em termos de custos. Estes são os primeiros pontos levados em consideração pelos engenheiros, mas, afinal, o que realmente importa é o que acontecerá com a humanidade e com a natureza. A tecnologia não é um fim em si mesmo. Ela é, com efeito, um meio para melhorar a vida humana com o mínimo de degradação da natureza. Sua finalidade deve ser o bem-estar social e ambiental.

Por estes motivos, neste último capítulo são discutidas questões ambientais e sociais nos quais a Geração Distribuída possa estar envolvida. Não se quer aqui opinar se ela é boa ou

ruim. Ao contrário, o que se tenta fazer é trazer pontos distintos para que se possa pensar melhor sobre o assunto. Da mesma forma que foi feito nos outros três capítulos, não é propósito chegar a qualquer conclusão final sobre as diversas implicações. A intenção é trazer, como indica o título do trabalho, reflexões maiores sobre esta tecnologia. Este capítulo é, assim, apenas um esboço daquilo que pode ser trabalhado sobre as relações entre a Geração Distribuída, o meio ambiente e a sociedade. Todos os temas aqui tratados podem ser abrangidos e, de fato, o autor enfatiza categoricamente que eles devem ser. Por isso, durante todo o texto são apresentadas referências que são recomendadas para buscar estes pensamentos mais elaborados.

O essencial é jogar luz sobre esta tecnologia para as questões realmente mais importantes para a vida. Também aqui deve ser feito um apelo a todos os engenheiros e especialistas em tecnologia para que expandam seus conhecimentos além da fronteira da técnica, pois ela não basta. A maioria dos problemas humanos não tem solução tecnológica capaz de resolvê-los. A humanidade parece viver atualmente as glórias do fogo roubado por Prometeu. Mas é preciso lembrar que, se nada for feito, uma hora ou outra o castigo eterno chegará. Como acertadamente disse uma vez o economista E. F. Schumacher é preciso que os técnicos tomem emprestado dos colegas profissionais da saúde a máxima *Primum non nocere*. Ou seja, antes de qualquer coisa, não prejudique. Toda tecnologia pode ser nociva e, assim, deve ser sempre questionada para ser implementada para o bem geral.

4.1 – Pensando o Futuro da Humanidade e da Natureza com Geração Distribuída

Para que a Geração Distribuída não seja uma tecnologia que traga mais problemas do que soluções, é preciso se antecipar e se preparar para o que ela pode fazer na sociedade e no meio ambiente. É necessário, contudo, determinar os rumos que a humanidade deve tomar não só perante a produção de energia elétrica, mas em todo seu conjunto. As escolhas feitas para o futuro devem englobar inúmeros pontos que são decisivos para o bem-estar geral, sendo a Geração Distribuída apenas um e incerto. Nesta seção, portanto, serão discutidos os principais meios que têm sido empregados na procura da realização deste bem comum e como deve se prosseguir para o futuro. Em primeiro lugar, é apresentado o “desenvolvimento sustentável”, um conceito defendido atualmente como forma de permitir o progresso socioeconômico com a preservação da vida e da natureza. Em segundo lugar, métodos específicos para o planejamento visando um futuro menos degradante são explorados.

4.1.1 – O Desenvolvimento Sustentável e a Geração Distribuída

A humanidade tem crescido, tanto em número, quanto em progresso produtivo e material, de forma espantosa, rápida e aparentemente incontrolável. Todavia, há pouco tempo atrás se percebeu que o modo como ocorriam estes crescimentos era insustentável e possuía limites. Antes disso, o ser humano parecia inatingível com sua inteligência e proezas de invejar aos outros animais. Ao que tudo indica, muito dos frutos colhidos não parecem ser assim tão esplêndidos. Degradação ambiental, mudanças climáticas, fome, desigualdade, guerras, etc. têm sido algumas das consequências das ações humanas irrefletidas. Elucidados

todos estes problemas e consciente dos limites de um mundo finito, surgiu o conceito de desenvolvimento sustentável.

Antes mesmo do nascimento do termo “desenvolvimento sustentável”, a ideia florescia entre os intelectuais. Foi nos anos 1960 que começaram as primeiras discussões verdadeiramente científicas dos impactos do ser humano na natureza e das evidentes dificuldades do crescimento. Seguindo esta recente abordagem, em 1972 foi lançado um relatório, elaborado por um grupo, chamado “Clube de Roma”, formado por pessoas de várias especialidades de diferentes áreas e países, cujo título era “Os Limites do Crescimento” (“*The Limits to Growth*”).

Neste trabalho seminal [135], os autores questionavam se existiam limites para o crescimento populacional e produtivo em todo o globo terrestre em longo prazo. Para responderem isto, eles fizeram uso de simulações computacionais pelo “modelo mundial”, criado por eles, para tentar imaginar, sem necessariamente prever exatamente, o que ocorreria com a humanidade até 2100 considerando 5 fatores principais e todas as suas interações, sendo eles: a população e seu crescimento, a produção de comida ou agrícola, o crescimento produtivo ou a industrialização, a poluição e o consumo de recursos não-renováveis. Ponto fundamental neste trabalho é o fato de que a população e a produção industrial crescem exponencialmente e que, principalmente por este motivo, a resposta à questão é que sim, há diversos limites para os dois.

Concluem eles [135], apesar dos poucos dados e informações dos estudos ambientais da época que tinham em mãos, que, mesmo com o uso da melhor das tecnologias possíveis e atuando em diversas frentes, em algum momento a humanidade se defrontaria com estes limites em um crescimento sem freios. Os resultados seriam a alta degradação ambiental e/ou fome que aumentaria substancialmente a taxa de mortalidade e depleção dos recursos não-renováveis com o rompimento da produção industrial expansiva e suas consequentes mazelas. Se a tendência de todos os fatores continuasse no estado de avanço que se encontrava em 1972, os limites seriam alcançados em 100 anos, levando ao declínio da população mundial e da capacidade industrial. Porém, se fosse tomada uma atitude o mais rápido possível, a humanidade poderia ter algum sucesso. O problema é que ela tem escolhido o caminho do crescimento irreparável. As tecnologias são elaboradas para superar os limites já alcançados, então chegar a outros limites e assim por diante. Talvez a solução correta não fosse essa, mas sim usar a tecnologia para desacelerar o crescimento e ficar longe dos limites que a natureza impõe e que estão fora das escolhas do ser humano. Efetivamente, a tecnologia é central, mas as soluções não tecnológicas são fundamentais. Os autores ainda afirmam, em congruência ao que viria a ser o desenvolvimento sustentável anos depois, que:

É possível alterar estas tendências de crescimento e estabelecer uma condição de estabilidade ecológica e econômica que seja sustentável para um futuro mais distante. Um ‘equilíbrio global’ pode ser delineado para que as necessidades materiais básicas de cada pessoa sejam satisfeitas e cada uma tenha oportunidade igual de realizar seus potenciais humanos individuais [135].

Foi somente em 1987 que apareceu explicitamente a expressão “desenvolvimento sustentável”. Neste ano, outro relatório impactante foi lançado. Desta vez, os responsáveis foram a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (*World Commission on Environment and Development - WCED*), órgão independente criado em 1984 com membros de diferentes passados profissionais e nações para discutir e elaborar propostas que fossem

contra o avanço da deterioração ambiental e dos problemas relacionados ao desenvolvimento. Presidida pela então primeira-ministra norueguesa Gro Harlem Brundtland, o relatório que tinha como título “Nosso Futuro Comum” (“*Our Common Future*”) acabou apelidado e conhecido como “Relatório Brundtland”.

A proposta inicial era tentar trabalhar apenas sobre os problemas ambientais, mas o que rapidamente foi notado foi que estes eram indissociáveis das ações humanas e, portanto, do desenvolvimento. Diferentemente do “Os Limites do Crescimento”, o “Relatório Brundtland” [184] não buscava predizer o futuro de degradação do meio ambiente, de aumento da pobreza e de crescente poluição com depleção de recursos. Ao contrário, seu objetivo era o da esperança, de mostrar caminhos que a humanidade de forma global poderia seguir para o seu próprio bem com crescimento econômico, onde políticas sustentáveis fossem adotadas com expansão dos recursos ambientais. O mundo vê vários sucessos, mas o número já elevado de problemas tem se tornado maior e beira a ser insuportável. Estes problemas, por sua vez, podem ser divididos naqueles relacionados com o desenvolvimento, como a fome, a pobreza, a desigualdade, o analfabetismo e a falta de moradias, e naqueles relacionados ao meio ambiente, como a desertificação, o desmatamento, a poluição atmosférica, a chuva ácida e o aquecimento global. Ambos parecem ser inseparáveis e eles só podem ser solucionados também em conjunto. É desta premissa que surge a definição de desenvolvimento sustentável proposta e sugerida para ser adotada pelo “Relatório Brundtland”: “Desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem suas próprias necessidades [184].”

A prosperidade será alcançada quando todos os países, sem exceção, conseguirem se desenvolver social e economicamente fazendo com que todos tenham suas necessidades atendidas de uma maneira sustentável. A superação das necessidades essenciais, principalmente para as pessoas mais pobres, é parte fundamental e prioritária neste conceito. Também é primordial a compreensão dos limites que o estado da tecnologia e das organizações sociais traz para conciliar o que o meio ambiente provê e o que pode ser atendido das necessidades presentes e futuras [184]. Assim, o desenvolvimento sustentável para o “Relatório Brundtland” deve ter os seguintes objetivos críticos nas políticas em nível nacional de desenvolvimento e meio ambiente: crescimento revivido, principalmente nos países em desenvolvimento; mudança na qualidade do crescimento; atendimento das necessidades essenciais de trabalho, comida, energia, água e saneamento; garantia de um nível sustentável de população; conservação e aprimoramento da base de recursos; reorientação da tecnologia e gerenciamento de riscos e reunião entre meio ambiente e economia nas tomadas de decisão [184].

Como, então, o desenvolvimento sustentável pode ser posto em prática? A humanidade tem como opção dois modelos de desenvolvimento para serem abraçados, conforme [34]. O modelo atual de desenvolvimento acompanha o seguinte processo. Usa-se matéria e energia resultando em resíduos e impactos. Para que este modelo possa funcionar, é preciso suprimento inesgotável de matéria, energia e capacidade infinita do meio de reciclar matéria e absorver resíduos. Como apontado, este modelo é utópico, pois nada daquilo que ele pressupõe é realizável no estado em que a humanidade se encontra, com uma população enorme, expandindo e uma produção elevada consumindo recursos finitos velozmente. Agora, o modelo de desenvolvimento sustentável tenta balizar a ineficácia do modelo atual apoiando-

se na realidade vivida. Assim, para funcionar, o modelo atual é modificado para que energia e matéria sejam reutilizadas, sendo que o impacto é minimizado pela restauração ambiental e o recurso é recuperado. As premissas do modelo do desenvolvimento sustentável são: dependência do suprimento externo contínuo de energia pelo Sol; uso racional da energia e da matéria com ênfase à conservação, em contraposição ao desperdício; promoção da reciclagem e do reuso dos materiais; controle da poluição, gerando menos resíduos para serem absorvidos pelo ambiente, e do crescimento populacional em níveis aceitáveis, com perspectivas de estabilização da população [34].

Apesar da popularidade que o desenvolvimento sustentável ganhou, ele não ficou isento de críticas e discussões. Algumas dessas ideias são examinadas por Robinson em [162] e expostas aqui. Existe uma dicotomia entre os ecologistas, mesmo entre aqueles que aceitam o termo e até antes de sua existência. De um lado há os conservacionistas que defendem a proteção de áreas naturais, mas que têm um senso mais utilitário, crendo que elas devem ser preservadas para que a sociedade possa usufruir delas futuramente. Do outro lado, existem os preservacionistas que acreditam que a natureza deve ser poupada por questões espirituais ou mesmo morais. Este se baseia na transformação de valores e nas mudanças de estilo de vida, enquanto aquele recorre à resolução de problemas através da tecnologia e das políticas coletivas. Como se nota, o desenvolvimento sustentável está neste último grupo.

Contudo, a expressão “desenvolvimento sustentável” é recheada de argumentos potenciais contra e a favor de seu emprego. A própria junção destas duas palavras para formar o termo parece ratificar e contradizer duas atitudes, uma vez que, como os dois relatórios discutidos anteriormente mostraram, há posicionamentos que veem uma convergência entre se desenvolver e ser sustentável e outros que advertem justamente para um conflito entre o crescimento e a ruptura da harmonia ecológica. As três principais críticas feitas acerca do desenvolvimento sustentável, ainda de acordo com [162], são que o conceito é vago, atrai hipócritas e fomenta desilusões. Como é possível de muitas interpretações, o desenvolvimento sustentável parece vazio; sem ter uma definição precisa ou mesmo científica. Apesar das dificuldades que isto pode causar, tais como problemas de comunicação, existe um lado positivo nisso. A falta de rigor amplifica a própria discussão, principalmente quando levada ao campo político. Existe, por motivos análogos, a abertura para o surgimento de hipocrisia com o emprego do conceito. Várias empresas e políticos podem se aproveitar do fato de que crescimento econômico e ser sustentável é uma tendência aparentemente benéfica para todos e não haver medidas rígidas sobre esta abordagem. As firmas podem se auto intitular “ambientalmente amigáveis” para aumentarem seus lucros sem proceder de uma forma realmente sustentável. Regulamentações e normas sinceras e baseadas em medições reais podem ser importantíssimas contra essa investida. Por fim, as desilusões formam o grupo mais preocupante do desenvolvimento sustentável. Existem duas delas. A primeira é que, como já comentado, a expressão não parece fazer sentido algum, porque constantemente se vê que a raiz da degradação ambiental está exatamente no crescimento. A segunda se encontra no lado oposto da primeira. No lugar de desacreditar no significado e na aplicação do desenvolvimento sustentável, ela parte do pressuposto de que a fé inabalável neste conceito diverge as pessoas de problemas de valor igual ou muito mais importantes. Mesmo que se pregue o desenvolvimento sustentável, há ainda muitas outras coisas a serem resolvidas, desde questões espirituais até a adoção de uma nova ética e de novas formas de poder, distribuição e exploração.

O que resta de capital do desenvolvimento sustentável é seu esclarecimento de que o consumo e a produção sem ações voltadas para o bem do meio ambiente e da população, a esperança exclusiva na tecnologia, uma falta de pensamentos interdisciplinares e a ausência da coesão entre diferentes setores e nações para a ação podem levar à ruína de toda a sociedade e da natureza. Apesar de todas as dificuldades, o desenvolvimento sustentável tem um grande respaldo pela sociedade, pelas instituições internacionais, por governos, por empresas e por organizações não governamentais (ONGs).

Por isso mesmo, ele foi adotado recentemente pela Organização das Nações Unidas (ONU) como núcleo de uma agenda para melhorias econômicas, sociais e ambientais para serem alcançadas no mundo todo até o ano de 2030. Em um documento intitulado “Transformando Nossa Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” [148], acordado por 193 Estados-membros da ONU em 2015 e com vigor em 2016, foram estabelecidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas. Todos, de acordo com palavras do próprio documento, são “integrados e indivisíveis, e equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental [148]”. A partir dos ODS e das metas, ações seriam estimuladas por todas as nações e partes interessadas para a obtenção do melhor para as pessoas, para o planeta, para a prosperidade, para a paz e para a parceria.

O desenvolvimento sustentável na Agenda 2030 inclui: “crescimento econômico inclusivo e sustentado, desenvolvimento social, proteção ambiental e erradicação da pobreza e da fome [148]” e é por ele reconhecido que todos estes fatores estão vinculados uns aos outros e são interdependentes. Ecoando a definição dada pelo “Relatório Brundtland”, visa-se pelo documento “implementar a Agenda para o pleno benefício de todos, para a geração de hoje e para as gerações futuras [148]”.

Qual é, finalmente, a relação da Geração Distribuída com o desenvolvimento sustentável? Muito mais do que simplesmente parecer um meio para levá-lo adiante, ela parece ser a própria encarnação tecnológica da ideia de desenvolvimento sustentável. Ao mesmo tempo em que é uma tecnologia de ponta que gera energia, talvez o mais importante fator no desenvolvimento, a Geração Distribuída é, na maioria dos casos, uma solução de produção de eletricidade renovável e não poluente, sendo um salto para ser sustentável. Ela parece ter todo o potencial que o ODS 7 da Agenda 2030 visa de: “assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos [148]”.

Todavia, será mesmo que ela pode se tornar tudo isso? E, sendo esta tecnologia potencial, quais os desafios sociais e ambientais para que ela esteja de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável? É inegável que ela parece ser uma evolução nesse sentido. Porém, isso não quer dizer que ela é a saída perfeita para os impasses humanos em termos de energia elétrica e suas consequentes aplicações. Ao contrário, quase todas as mesmas críticas feitas ao conceito de desenvolvimento sustentável podem ser levantadas para a Geração Distribuída.

Em primeiro lugar, é preciso questionar se ela conseguirá preencher as dimensões econômicas, sociais e ambientais simultaneamente sem que qualquer uma delas seja muito prejudicada. Em segundo lugar, é plausível perguntar se ela não pode atrair hipócritas que trarão dezenas de informações incorretas sobre a tecnologia apenas para lucros e recompensas, iludindo as pessoas pelo já discutido otimismo atenuante que ela parecer trazer

consigo e atenuando seus impactos negativos. Em terceiro lugar, pode se pensar se a Geração Distribuída não traz desilusões. A Geração Distribuída cumprirá sua anunciada função de ser uma forma de produzir energia elétrica para todos? Seu preço será justo? Ela é confiável? Ela realmente diminuirá a degradação ambiental e as mudanças climáticas? Por parecer tão boa no que promete ser, não se está esquecendo de procurar alternativas ainda melhores?

Sendo assim, no restante deste capítulo serão explorados diversos aspectos da Geração Distribuída para se ter um julgamento melhor sobre seus impactos positivos ou negativos, com enfoque em seu papel no desenvolvimento sustentável. Aqui serão abordadas as duas dimensões do desenvolvimento sustentável geralmente excluídas dos debates dos engenheiros, especialistas e técnicos, a social e a ambiental. Normalmente a econômica é a predominante nos estudos, pesquisas e trabalhos destes agentes, mas é preciso discutir o tema de uma maneira muito mais abrangente. Como será visto, as implicações sociais e ambientais da Geração Distribuída são muito maiores e diversificadas do que se tem falado.

4.1.2 – Planejando o Futuro com Geração Distribuída

Diante das dificuldades que a sociedade pode enfrentar e das pressões que a natureza pode causar em reação à sua modificação pelo ser humano, certas medidas devem ser postas em prática e estratégias devem ser elaboradas. Diferentemente do que se fazia no passado, não se pode mais deixar que tudo ocorra à mercê do destino. Para poder afrontar estas mazelas e preparar um amanhã melhor para todos, a humanidade deve lidar com dois aspectos, sendo um espacial/material e o outro temporal. Por um lado, ela deve encarar a luta entre a escassez de recursos e o contínuo desenvolvimento. Por outro, ela deve ser capaz de determinar suas escolhas para o bem geral em um longo prazo. Estes pressupostos são discutidos a seguir e, a partir deles, são indicadas algumas propostas para que o ser humano planeje seu futuro com um mínimo de estrago para si e para o meio ambiente com o uso da Geração Distribuída.

Em 1968, Garret Hardin publicou na revista *Science* um influente artigo em que apresentou e discutiu “A Tragédia dos Comuns” [90]. Antes de examinar o que Hardin explorou em seu trabalho, é preciso definir o que é um recurso comum ou simplesmente um comum. De acordo com Mankiw [133], um comum é um bem que é rival, mas é não excludente. Ou seja, uma pessoa usá-lo reduz a possibilidade de que outra também possa usá-lo, mas nenhuma delas é impedida de fazê-lo.

O que, então, Hardin disse? Ele afirmou em seu artigo [90] que a humanidade luta por recursos finitos em um planeta finito e que a enorme e crescente quantidade de pessoas que habitam a Terra não estariam aptas a lidar com isso. Como todos desejam obter o máximo de utilidade para si, em algum momento tudo entraria em colapso, sendo impossível concretizar o “objetivo de Bentham” de se ter “o maior bem para o maior número”. Mais ainda, este problema é daqueles em que não há solução tecnológica. Ele refuta a ideia do *laissez-faire* e da mão invisível de Adam Smith, para dizer que é preciso controle, porque na máxima liberdade, a sociedade poderia ser levada à ruína.

Para ilustrar o que dizia, Hardin apresenta a clássica parábola que intitula seu artigo. Imaginando um pasto aberto a todos, um comum, ele prossegue pensando como cada pessoa agiria nele. Sendo seres racionais (no sentido econômico), cada pastor gostaria de maximizar

seus ganhos. Para isso, eles procedem acumulando a maior quantidade que podem de animais em seus gados. Não há exceção, todos pensam da mesma maneira. Daí nasce a tragédia. A terra, um comum que aparentemente era renovável, começa a se deteriorar tanto com a grande quantidade de animais que se torna insuportável criar qualquer ser vivo nela. Todos acabam sofrendo. Os pastores eram impelidos inevitavelmente a terem o máximo que podiam de algo que, todavia, era finito e, com isso, são levados à ruína. Esta é “A Tragédia dos Comuns”. De forma parecida, ela também reaparece com a poluição. Desta vez não com a exploração e retirada dos comuns, mas com a colocação dos poluentes nos comuns [90]. Estas ideias podem ser ampliadas a níveis globais, com o mundo e todos os seus recursos sendo o comum e todos os seus habitantes sendo os pastores em uma constante busca pelo máximo prazer. A Terra é finita e a população cresce exponencialmente.

Apesar da imagem pessimista de Hardin ser bastante plausível, a ganhadora do prêmio Nobel de Economia Elinor Ostrom mostrou que “A Tragédia dos Comuns” não precisaria ser tão trágica. O problema é real, mas ele pode ser enfrentado; existem soluções. Em um artigo de 1999 [151], Ostrom e outros autores revisitaram o problema de Hardin. Para eles, resolver a questão dos recursos comuns requer dois elementos que devem ser usados obrigatoriamente em conjunto: restringir o acesso e criar incentivos para que os usuários invistam no recurso em vez de explorá-lo excessivamente. O monitoramento e a informação destes recursos através da tecnologia é um caminho para isso, mas não substituem as tomadas de decisão [151].

Eles creem que um dos erros de Hardin é acreditar que há somente pessoas egoísticas. Ainda que elas sejam a maioria, existem aquelas que estão dispostas a contribuir para o todo em diferentes graus e que é possível despertar a colaboração. Ao perceberem que podem se beneficiar muito mais com a cooperação recíproca, as pessoas tendem cada vez mais a trabalharem juntas e diminuírem a depleção dos recursos comuns.

Ostrom et al. [151] indicam vários exemplos empíricos de comunidades locais e regionais que superaram “A Tragédia dos Comuns” ao se auto-organizarem e tirarem o máximo proveito para todos criando regras evolutivas entre si sem causar exaustão dos recursos. As soluções são diversas e cada situação revela um modo de agir, mas em sua maioria prescindem de qualquer governo ou empresa privada para coordená-los. O que importa é que exista uma conscientização da coletividade e do uso sustentável e a própria diversidade pode ser estimulante nesse sentido, podendo romper com a “Tragédia” iminente. Como as comunidades locais são pequenas, elas têm maiores informações sobre um recurso e podem melhor gerenciá-lo em conjunto. O grande desafio, porém, é galgar esses problemas a níveis globais que envolvem muitas pessoas e recursos de grande escala. De qualquer forma, é possível aprender muito com as experiências passadas, mas para isso é preciso formas de comunicação, informação e confiança mais abrangentes e profundas [151].

Por um lado, a “Tragédia dos Comuns” de Hardin parece mostrar que a expansão do uso de recursos através da Geração Distribuída pode causar a depleção deles e eventualmente a ruína, pois a população e o respectivo consumo de eletricidade crescem extraordinariamente num local que, por sua vez, é finito. Por outro lado, Ostrom mostra que os recursos comuns podem ser administrados pelas pessoas e que a “Tragédia” não será o fim mandatório. Um balanço entre os dois deve ser feito, mas pendendo mais para o lado de Ostrom. O pensamento proposto por Hardin serve aqui para lembrar que o uso inconsciente da tecnologia

pode ser desastroso. Já o de Ostrom é um sopro de esperança para a Geração Distribuída e, consequentemente, para o consumo e produção de energia em geral. Isto porque se trata de uma solução local e regional que, como se viu, pode levar à auto-organização e à conscientização altruísta mais facilmente das pessoas, além de ser uma tecnologia diversificada. Estas características podem permitir a superação da depleção dos recursos comuns rumo à sustentabilidade.

Assim, a primeira das propostas para se planejar o futuro é direcionar a tecnologia para as questões sociais e ambientais com a participação coletiva para o bem comum. No caso da Geração Distribuída, ela não pode ser vista somente como uma solução técnica que tenta equilibrar o crescente consumo de energia elétrica com nova produção, pois ela de fato não é só isso. Sob a ótica da “Tragédia dos Comuns”, deve ser discutido se é sustentável fabricar novos geradores em larga escala, não importando de quais tipos sejam, e se não seria melhor diminuir o próprio consumo. É preciso repensar se a adoção universal de certas fontes de Geração Distribuída não são tão prejudiciais quanto os combustíveis fósseis, mas de outras formas que não exclusivamente o esgotamento de recursos não-renováveis e a poluição atmosférica. Deve ser questionado se ser renovável é suficiente. A Geração Distribuída será usada para diminuir a pobreza no mundo ou ela será apenas um objeto de luxo? As tecnologias de ponta continuarão pertencendo somente às nações mais ricas? Afinal, se os recursos são escassos, como gerenciar para que todos usufruam deles? Para a resolução destas dificuldades pautadas, as ideias de Ostrom parecem cair como uma luva. Se os indivíduos não tomarem consciência e se organizarem, principalmente considerando como elas podem prejudicar uns aos outros se não agirem para o bem geral, a Geração Distribuída pode não alcançar todo seu potencial benéfico. Entretanto, se o fizerem, as benesses podem ser frutíferas.

No segundo capítulo, as previsões se mostraram frustrantes. Ao se tentar enxergar como seriam os próximos anos em termos energéticos usando os métodos mais técnicos e científicos possíveis, os erros chegaram mais rápidos do que se poderia pensar. Em questão de poucos anos, desmoronou-se o futuro construído pela imaginação racional. Eventos históricos, sociais, políticos e econômicos transformaram de vez o destino de várias tecnologias.

Apesar disso, ainda se tem usado esta metodologia. É extremamente comum encontrar no início de textos sobre Geração Distribuída, gráficos delineando o crescimento da inserção da energia solar fotovoltaica e da energia eólica, por exemplo, assim como as expectativas para o que virá pela frente deste panorama. Não se nega aqui a importância de se tentar antever os acontecimentos. Porém, é preciso mudar um pouco a forma que se age no presente em relação ao futuro, porque ao que tudo indica a incerteza é uma certeza na vida humana e depender de tendências parece ser extremamente arriscado. A causalidade não parece fazer sentido quando se leva em conta toda a experiência social. Tentar saber o que acontecerá não agrega muito naquilo do que pode ser feito agora.

Um modo alternativo de pensar acerca dos tempos que virão é usando a metodologia da retroprevisão (*backcasting*) [163, 164, 51]. Este termo foi introduzido por Robinson, mas foi primeiro difundido de forma similar por Amory Lovins em estudos para transição energética [163]. Com efeito, inicialmente ela foi empregada para o caso específico energético e era chamada retroprevisão energética. A retroprevisão, diferentemente da

previsão, não se preocupa em como será o futuro, mas sim em como alcançar os futuros desejados [163, 164]. Ou seja, a retroprevisão parte da escolha e determinação de cenários futuros. Definido qual ele será, é feito um retrocesso a partir daí até se chegar ao presente, observando se é presumível chegar até lá. Se sim, objetivos políticos (num sentido amplo) podem ser delineados para que o caminho leve ao futuro desejado. Para isso, é preciso levar em consideração um longo prazo. Com esta elaboração, podem ser determinadas implicações sociais, ambientais, econômicas, políticas e tecnológicas para a realização do futuro desejado. Mais precisamente, Robinson define em [164] os passos para se fazer a retroprevisão: determinar os objetivos; especificar metas, restrições e alvos; descrever o sistema presente; especificar variáveis exógenas, ou seja, aquelas que não fazem parte do modelo mas o afeta; fazer a análise dos cenários e dos impactos.

A retroprevisão é tipicamente usada para resolver problemas de alta complexidade social e que têm impactos no longo termo [51]. Isto pode parecer arrastar a análise ao mesmo problema da incerteza que antes ocorria na previsão. Porém, com a retroprevisão bem empregada, prováveis dificuldades já terão sido antevistas, sendo muito mais fácil se antecipar do que quando se apoia apenas na expectativa de que as tendências presentes continuarão ocorrendo. Mais do que isso, como novos conhecimentos e novas ideias podem surgir, mesmo que de forma incontrolável e definitivamente imprevisível, elas podem agregar novas opções para se chegar ao futuro desejado [51]. Além disso, escolhido um futuro, suas várias implicações serão definidas pela retroprevisão e a mudança das decisões políticas para saná-las, se forem negativas, ou ampará-las, se forem positivas, também é mais simples do que com a mera previsão.

Relembrando como foi determinada a Agenda 2030 da ONU, fica visível como a retroprevisão tem sido usada no desenvolvimento sustentável. Mais adiante será visto que ela também é adotada para o combate às mudanças climáticas. Ela analogamente pode ser empregada para a Geração Distribuída como meio de produção de energia elétrica para preencher não só o consumo de eletricidade, mas todo um espectro social e ambiental.

A lógica da retroprevisão parece encaixar exatamente para a situação da Geração Distribuída. A própria abordagem nasceu de estudos energéticos e só depois foi expandida. A segunda proposta é, portanto, aplicar a retroprevisão para verificar se a Geração Distribuída satisfará o futuro que se deseja alcançar. Por exemplo, se o desejo for o uso exclusivo de Geração Distribuída renovável para produção de eletricidade, então deve se recuar no tempo para determinar os objetivos para que isso aconteça e, em seguida, observar como isso impactaria na sociedade e no meio ambiente. É claro que este é um exemplo ingênuo, pois é de pouco valor para a sociedade ou para o meio ambiente um futuro centrado em uma tecnologia. Então pode se pensar em um futuro com determinantes sociais mais justos e ambientais mais sustentáveis. Pode ser tracejado um futuro em que se realize o ODS 7 da Agenda 2030 em conjunto com os outros objetivos. Então será preciso perguntar qual deve ser a contribuição da Geração Distribuída até 2030, como deve se agir e quais decisões tomar para que ela ajude efetivamente a chegar até lá e quais são as implicações disso tudo.

A terceira proposta estabelecida junta os aspectos espacial/material e temporal. Nela, a sugestão é antecipar a compreensão completa dos problemas para evitar que eles ocorram no futuro através da ação de todos. Ficar preso ao otimismo será nocivo. Quanto antes forem encontradas as formas pelas quais a Geração Distribuída pode afetar negativamente a

humanidade e a natureza, mais rápido e fácil será melhorá-la para que o que é ruim dela seja mitigado ou mesmo para que sejam encontrados substitutos. Esta proposta é fundamental, porque, como demonstrou a história, a humanidade não se preparou para os malefícios catastróficos da poluição, nem para o iminente esgotamento dos recursos não-renováveis ou para as mudanças climáticas. No “Os Limites do Crescimento” [135], os autores destacam isso. As pessoas constantemente não se preocuparão com a poluição, pois existe um atraso em seus efeitos e estes, às vezes, poderão ser sentidos em um local distante de onde surgiram. Danos podem ocorrer devido à poluição sem se saber que esta é a verdadeira causa. O sociólogo inglês Anthony Giddens chega a conclusões parecidas em uma publicação recente [82], mas desta vez sobre as mudanças climáticas. Ele intitula de “Paradoxo de Giddens” à indiferença das pessoas quanto ao aquecimento global, mesmo ele parecendo assustador, visto que seus perigos não são “palpáveis, imediatos ou visíveis no decorrer da vida cotidiana [82]”. Portanto, é essencial uma participação massiva e precipitada das pessoas, até daquelas que não compreendam tecnicamente o funcionamento da Geração Distribuída, porque elas serão impactadas por ela em algum lugar e momento que menos podem conceber.

4.2 – O Meio Ambiente e a Geração Distribuída

A Geração Distribuída e os cuidados com o meio ambiente estão intimamente ligados. Aliás, qualquer tecnologia tem seu peso ambiental. Algumas afetam profundamente a natureza, enquanto outras podem ter impactos irrisórios nela. Independentemente das aptidões e das posições de cada pessoa, existe certo consenso de que se deve buscar pelos últimos tipos de tecnologias e não pelos primeiros. Esta é uma das lógicas usadas para justificar a adesão cada vez maior da Geração Distribuída, principalmente em sua forma renovável. Muitos chegam a afirmar que suas fontes não poluem e que elas são a chave para combater as mudanças climáticas. Entretanto, é preciso ir mais longe. É substancial compreender mais claramente estes efeitos negativos para o meio ambiente quando se estuda a Geração Distribuída. Não se pode meramente alçar conjecturas entre a natureza e esta tecnologia sem antes haver um conhecimento maior sobre o assunto. Também é capital identificar abertamente quais são todas consequências para o meio ambiente de se empregar a Geração Distribuída. Até que ponto ela ameniza as implicações negativas para produção de energia e como ela pode agravá-las? Esta seção tenta elucidar melhor estes vários pontos que relacionam o meio ambiente e a Geração Distribuída.

4.2.1 – O Ser Humano e as Preocupações Ambientais

Na Idade Média, o mundo ocidental vivia sob o teocentrismo e as palavras divinas e os pecados eram tidos como norte do estilo de vida. Assim, as pessoas trabalhavam e se serviam da natureza somente para aquilo que era necessário para sobrevivência. No entanto, no fim da Era Medieval, com o início do Renascimento, o ser humano voltou a tomar o centro da existência.

Na Idade Moderna, a razão humana passou a imperar e as ciências naturais permitiam, mais do que nunca, a compreensão das leis físicas pelo ser humano. A natureza, antes

considerada um presente divino para saciar as necessidades cotidianas, agora era considerada uma fonte de dominação do ser humano, um meio para realização das glórias racionais do progresso. Este pensamento foi levado até as últimas consequências na Revolução Industrial na metade do século XVIII, quando máquinas antes jamais consideradas passaram a ser usadas para produções de proporção colossal. Desmatamento de grandes proporções, morte de animais que levavam à extinção, poluição de todos os tipos e mudanças climáticas, todos estes impactos negativos no meio ambiente tiveram início verdadeiro nesta época para não mais pararem de crescer e se expandir assim como fazia a produção desenfreada.

O grande problema é que as pessoas não tinham consciência da gravidade desses problemas. A Terra parecia infinita aos olhos do homem em progresso e quaisquer implicações negativas não pareciam ter efeitos tão desastrosos. As preocupações ambientais são muito recentes. Giddens conta em [82] um pouco sobre estas preocupações nos últimos tempos. De acordo com o autor, os precursores do “movimento verde” foram os americanos Ralph Waldo Emerson e Henry Thoreau. O primeiro escreveu um ensaio chamado *Nature* em 1836 onde defendia a preservação das árvores contra a destruição das florestas pelas fábricas e indústrias. Já Thoreau viveu dois anos isolado no lago Walden, que intitula seu famoso livro, dependendo somente de seu próprio trabalho, reconhecendo a riqueza da natureza. Ambos acreditavam na conservação do meio ambiente mais por questões estéticas e morais do que por qualquer outro motivo.

Ainda de acordo com o mesmo autor [82], outro ponto importante foi a criação da organização americana Sierra Club em 1892. Considerada a primeira a fazer defesas claramente ambientais, ela existe até hoje, passando da luta pela preservação das matas para o combate ao aquecimento global. Algo curioso é que o próximo passo do movimento ambiental se deu na Alemanha nazista nos anos 1930. O governo no poder instituiu diversas leis pela conservação do meio ambiente, para proteção dos animais e para redução da poluição atmosférica. Contudo, primeiro partido com bandeira ambiental só veio aparecer nos anos 1970 também no mesmo país.

Antes disso, porém, algumas pesquisas científicas que analisavam os impactos no meio ambiente pelas ações humanas, tais como aquelas discutidas neste trabalho, começaram a surgir na década de 1960. Nesta mesma época também começavam a convergir ideias “verdes” em conjunto com os movimentos de contracultura nos Estados Unidos, na França e vários outros países. Na década de 1970, como foi visto no capítulo 1, as crises do petróleo mudaram radicalmente o pensamento das pessoas e dos países quanto ao uso de combustíveis fósseis. De um lado levados pela consciência ecológica, por outro pelos efeitos econômicos e políticos. Estes dois últimos pareceram os mais fortes, porque foi somente com estes eventos que o meio ambiente e seus cuidados começaram a ser realmente discutidos. As crises do petróleo fizeram as nações tomarem atitudes quanto às suas matrizes energéticas. Em seguida, vieram diversos acordos internacionais em prol do bem do meio ambiente, perdurando até hoje.

Apesar do número muito maior de adeptos e da preocupação ambiental não ser mais somente pelos valores estéticos e morais como era para Waldo Emerson e Thoreau e seus sucessores, há ainda um grande número de pessoas que não acreditam nos efeitos negativos da degradação ambiental pelo ser humano ou ao menos pensam que eles não serão fatais. Este tem sido um grande empecilho para resolver estes problemas, mas como será visto adiante,

compreender e combater este problema é fundamental para a sobrevivência humana e para a conservação da natureza.

4.2.2 – A Poluição e as Mudanças Climáticas

A degradação ambiental consiste em diversos problemas causados à natureza pelo ser humano. A distinção do ator que promove esta deterioração é fundamental, pois nem sempre são as pessoas que alteram de forma negativa o sistema natural ou destroem partes do meio ambiente. Os animais estão constantemente modificando seus arredores e desastres naturais, tais como furacões, inundações, tempestades, terremotos, tsunamis e incêndios florestais, muitas vezes não têm origem ou qualquer relação com a humanidade. Então, por que o ser humano é o protagonista da degradação ambiental? O motivo é que nenhum animal ou evento físico natural são capazes de modificar a natureza como o ser humano faz. O meio ambiente por si só, pelo que tudo indica, é incrivelmente autossustentável. Aquilo que é destruído nele, ele consegue repor ou ao menos amenizar sua falta de um jeito que os seres vivos sofram o mínimo de impacto. A sociedade, por outro lado, tem causado tantas alterações e destruições na natureza que ela não está suportando. Seus métodos de equilíbrio estão sendo expurgados pelos incessantes ataques humanos. Esta violência humana está tornando o planeta Terra um lugar inabitável não só para as pessoas, mas para todos os seres vivos, animais e vegetais.

Dentre os tipos de degradação ambiental podem ser mencionados a poluição em suas várias formas, as mudanças climáticas, o desmatamento, a extinção de plantas e animais, aumento das erosões, agravamento da eutrofização, etc. Dentre eles, os dois primeiros se destacam e estão mais comumente ligados à Geração Distribuída. Antes de passar para a discussão de cada um destes dois, é de suma importância ressaltar que, apesar deles serem os mais comentados com relação à produção de energia elétrica, todas as categorias de degradação ambiental estão relacionados à Geração Distribuída. Afinal, qualquer forma de alteração humana da natureza consiste em sua degradação. O grande problema está na gravidade que esta degradação se encontra ou pode causar.

A poluição é uma dos maiores problemas ambientais enfrentados hoje em dia e também um dos maiores causadores de outros destes mesmos problemas e de não ambientais. Ela surge das práticas humanas nas formas de substâncias ou energia dispensadas e prejudiciais. Mais precisamente, “ela é uma alteração indesejável nas características físicas, químicas ou biológicas da atmosfera, litosfera ou hidrosfera que cause ou possa causar prejuízo à saúde, à sobrevivência ou às atividades dos seres humanos e outras espécies ou ainda deteriorar materiais [34].”

De acordo com [159], os quatro principais tipos de poluição são a poluição do ar ou atmosférica, que é resultado em sua grande maioria da queima de combustíveis fósseis; a poluição do solo e da terra, causada por práticas ruins de agricultura, gerenciamento incorreto de lixo e diversas atividades produtivas; a poluição da água doce, cuja origem está no escoamento de dejetos da agricultura, químicos e patógenos que retiram nutrientes, mas também nos metais pesados e efluentes industriais lançados; poluição marinha e costal, que é formada por vários resíduos, tais como óleos, plástico, lixos radioativos, etc. e que afeta mares, oceanos e seus litorais.

Todos os restos de matéria lançados pelo ser humano no ar, na água ou no solo formam a poluição e são chamados poluentes. Estes podem ser medidos em cada um dos três ambientes e seus valores indicam o quanto a poluição é degradante. Os poluentes ainda podem ser classificados pela origem e pelo caráter de localização [34]. A primeira indica se eles são pontuais ou difusos. Ou seja, aponta, respectivamente, se se sabe de onde surgiu e para onde vai ou se não se sabe exatamente alguma destas duas características. As pontuais, portanto, são mais fáceis de controlar do que as difusas. Já o caráter de localização refere-se à movimentação dos poluentes, se eles são locais, regionais ou globais [34].

Certas quantidade e qualidade de poluição são suportadas pela natureza. De fato, ela consegue e está continuamente reciclando grande parte da matéria que se encontra nela, principalmente os nutrientes, fonte essencial para a vida. Os processos em que faz isso são chamados de ciclos biogeoquímicos, sendo eles os do carbono, do nitrogênio, do fósforo, do enxofre e da água [34]. O ciclo hidrológico ou da água talvez seja o mais compreendido pela maioria das pessoas e consiste em toda a cadeia que a água faz indo de sua absorção pelas pessoas, animais e plantas, passando pela evaporação e, em seguida, pela precipitação para novamente chegar aos rios e oceanos. Os outros seguem caminhos circulares parecidos, sendo que alguns estão concentrados mais na atmosfera, outros no solo ou na própria água, podendo passar por seres vivos. As atividades humanas têm sido capazes de denegrir estes ciclos. Para ficar mais evidente este impacto da humanidade na natureza, o ciclo do carbono será destacado.

O gás carbônico ou dióxido de carbono (CO_2) é seu elemento principal, se encontrando na atmosfera ou na água (ele é solúvel) e interagindo com os seres vivos. Ele consiste num dos principais poluentes atmosféricos e num dos maiores causadores das mudanças climáticas. Ao mesmo tempo, ele é essencial para a vida, sendo liberado na respiração de plantas e animais e consumido na fotossíntese. Como pode ser explicado, portanto, esta aparente contradição? Em sua forma natural, o ciclo do carbono é perfeito, sendo devolvido na mesma taxa que é consumido, sendo que até metade do excedente de CO_2 é absorvido pelos oceanos [34]. É aí que se encontra o problema. As atividades antrópicas (humanas) que produzem o dióxido de carbono têm sido tão intensas que a natureza e mais especificamente os oceanos não têm conseguido absorvê-lo e reintegrá-lo ao seu ciclo. Assim, uma parte em excesso deste gás fica na atmosfera. De primordial em quantidades adequadas, o gás carbônico em demasia passa a afetar a saúde humana e dos outros seres vivos.

Com relação às mudanças climáticas, o dióxido de carbono é o mais importante causador do chamado efeito estufa que leva, por sua vez, ao que é conhecido como aquecimento global. Alguns gases, os gases do efeito estufa, que são compostos pelo gás carbônico (CO_2), vapor d'água (H_2O), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e ozônio (O_3), absorvem calor que é refletido do solo depois de virem do sol. Parte deste calor refletido volta para o espaço, mas uma maior quantidade na concentração destes gases faz com que boa parcela dele fique na Terra. O planeta é aquecido com este fenômeno, o efeito estufa, auxiliando a vida em todas as suas formas. Novamente, o problema se encontra na quantidade irregular dos gases. Se for alta, o planeta começa a aquecer mais do que o normal.

A autoridade mais qualificada e confiável sobre as mudanças climáticas atualmente é o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC). Criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization - WMO*) e pelo

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o IPCC tem como objetivo fazer estudos e análises sobre as mudanças climáticas da maneira mais científica, técnica e imparcial possível. De tempos em tempos são lançados relatórios que reúnem vários estudos baseados em pesquisas científicas sobre diversos pontos das mudanças climáticas, indo das explicações físicas dos fenômenos envolvidos até maneiras de combatê-las. O Quinto Relatório de Avaliação, publicado em 2014, foi formado por três grupos de trabalho, resultando em um relatório para cada e um relatório síntese, sendo um sobre a ciência física básica, o segundo sobre os impactos, adaptação e vulnerabilidade e o terceiro sobre a mitigação das mudanças climáticas. A seguir, todos os resultados sobre as mudanças climáticas apresentados nesta seção foram retiradas do IPCC em [105].

O IPCC alega que o impacto humano no sistema climático é claro, que os gases do efeito estufa vêm aumentando nos últimos anos e que o aquecimento é inequívoco [105]. Estas talvez sejam as únicas declarações do IPCC que são feitas com completa certeza. No restante do relatório, para que o estudo e a avaliação sejam imparciais e mais científicas, os autores indicam graus de probabilidade para cada uma das afirmações, dizendo se são de confiança baixa, média ou alta e se existe consenso entre diferentes cientistas.

Alguns dos dados do IPCC [105] merecem ser destacados neste trabalho, pois se relacionam diretamente com a Geração Distribuída. As últimas três décadas foram as mais quentes sucessivamente desde 1850. A temperatura média global, por sua vez, tem crescido linearmente com um aquecimento de 0,85 °C de 1880 até 2012. Este aquecimento está deixando a atmosfera e os oceanos mais quentes, diminuindo a neve e os gelos, aumentando o nível dos mares e causando eventos extremos, como um menor número de dias muito frios, um maior de muito quentes e um aumento de chuvas muito intensas em algumas regiões.

O IPCC indica que é extremamente provável (95% a 100% de certeza) que as causas para este aquecimento observado no século XX são as emissões antropogênicas (pelo ser humano) dos gases de efeito estufa, principalmente do gás carbônico, e outras atividades antrópicas. Destas emissões pelo ser humano, a de CO_2 acumula cerca de 2040 Gt CO_2 , sendo que, aproximadamente, 40% ficou na atmosfera, 30% foi removido e retornou ao solo e 30% foi absorvido pelos oceanos, causando acidificação deles. Mais impressionante ainda, é que metade destas emissões de CO_2 ocorreu nos últimos 40 anos. A continuação deste processo continuará a aquecer o planeta. Das emissões de gases do efeito estufa entre 1970 e 2010, 78% foi da contribuição de CO_2 da queima de combustíveis fósseis e de processos industriais.

A humanidade tem reconhecido em conjunto todos estes problemas de poluição e das mudanças climáticas e, em 2015, um grande passo foi dado com a assinatura e adoção do chamado Acordo de Paris [41]. O tratado aprovado por 195 países ou Partes da Convenção Quadro sobre Mudança Climática se comprometeram, a partir de 2020, a diminuírem significativamente a emissão de gases do efeito estufa para mitigação das mudanças climáticas. Os meios para isso são apresentados por cada país para seus próprios casos em documentos chamados Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC). Mais ainda, as Partes concordaram em manter a temperatura média global a menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais (tempo considerado geralmente anterior a 1750) e, com esforço, limitar a 1,5 °C este mesmo valor.

4.2.3 – A Relação entre a Natureza e a Geração Distribuída

O uso de energia elétrica no lugar de outras formas de energia parece ter sido sempre acompanhado de uma menor degradação ambiental. E não é só uma questão de passagem das outras energias para a elétrica, o futuro é a eletrificação e a adaptação deve vir junta. Entre 2000 e 2012, cerca de 60 milhões de pessoas por ano ganharam acesso à eletricidade. Após 2012, este número passou a ser de 100 milhões de pessoas [100]. A sociedade deve buscar alcançar um equilíbrio entre o uso da eletricidade e o bem-estar do meio ambiente.

A troca do consumo de uma energia qualquer para a elétrica é a marca de um caminho menos impactante na natureza. Alguns exemplos importantes do capítulo 1 podem ser relembrados. No primórdio da eletrificação, as lâmpadas elétricas substituíram as velas e a iluminação a gás na iluminação artificial e esta já foi uma grande vitória para a natureza. Depois, os motores elétricos entraram no lugar das máquinas movidas a combustíveis fósseis nas fábricas, o que representou outro sucesso para o meio ambiente. Um primeiro passo é, assim, eletrificar os equipamentos de consumo, como aqueles usados na produção industrial, na mobilidade, no aquecimento, etc.

Hoje em dia, a tendência é também modificar a produção de energia elétrica a favor da conservação da natureza e para convergi-la para o equilíbrio com o consumo de eletricidade. Este processo será feito com energias renováveis que poluem menos, principalmente emitindo baixa ou nenhuma quantidade de gases do efeito estufa, e que tenham alta eficiência. A Geração Distribuída, em sua grande maioria, apresenta todas estas características e, por isso mesmo, é tida como uma excelente solução para minimizar os impactos humanos negativos na natureza.

Pelo lado da poluição, em particular da atmosférica, a maioria das tecnologias de Geração Distribuída parecem emitir poucos gases do efeito estufa e, com certeza, muito menos que as fontes de combustíveis fósseis. Energia solar fotovoltaica e energia eólica são dois exemplos cuja poluição do ar é nula quando estão produzindo energia elétrica. Elas também são as que mais ganham espaço no mercado. Aparentemente, a Geração Distribuída é uma solução favorável para o meio ambiente. No entanto, a parcela das renováveis em toda a capacidade produtiva de energia elétrica mundial é muito pequena em relação aos combustíveis fósseis. Em 2015, as energias renováveis representavam 22,8% de toda a matriz de energia elétrica, sendo 16% de hidroelétricas, 1,9% de biocombustíveis e resíduos e 4,8% de solar, eólica, geotérmica e oceânica somadas. A boa notícia é que o crescimento delas tem sido, desde 1990, de 3,6% por ano, mais rápido que o total que cresce 2,9%. Outras, incluindo as células a combustível, são ainda menores, com uma representação de somente 0,3%. Os combustíveis fósseis formam um total de 66,3% e o restante do total é formado pela energia nuclear. Dos combustíveis fósseis, o petróleo preenche 4,1%, o gás natural 22,9% e o carvão 39,3% [101]. Como a Geração Distribuída proporciona poluição muito menor que os combustíveis fósseis, além de ser em grande parte renováveis, é preciso trabalhar intensamente para que ela seja mais adotada.

Em um artigo de 2004, Pacala e Socolow [152] já afirmavam que a humanidade possuía as tecnologias para combater a mudança climática em 50 anos através da redução das emissões de CO_2 e que estas já estavam desenvolvidas suficientemente para serem implementadas. Eles apresentam 15 delas. Destas, 1/5 está relacionada com a Geração

Distribuída, sendo elas a adoção de energia solar fotovoltaica e energia eólica no lugar de produção de energia elétrica por carvão e a substituição dos combustíveis fósseis por biomassa. De acordo com [108], dois terços das emissões de gases do efeito estufa são do setor energético e, por isso, é nele que devem ocorrer as maiores mudanças para combater as mudanças climáticas. Os elementos chave para transição são a energia renovável e a eficiência energética, sendo que a troca de combustíveis fósseis por fontes de carbono zero para produção de energia precisa ser feita até a metade do século XXI. Até 2050, 80% da eletricidade pode vir de energias renováveis, o que possibilitaria cumprir os objetivos climáticos do Acordo de Paris. Assim, a Geração Distribuída se mostra protagonista na mitigação das mudanças climáticas.

Os impactos (positivos e negativos) da Geração Distribuída, contudo, não param na poluição atmosférica e no combate às mudanças climáticas e não se resumem ao seu funcionamento. O otimismo com esta tecnologia tem feito as pessoas a fixarem seus pensamentos somente sobre estes três pontos. É preciso ir além e fazer avaliações do ciclo de vida (*Life Cycle Assessment - LCA*) da tecnologia, onde uma investigação dos impactos ambientais deve ser feita “do ‘berço’ até a “sepultura” através de todo o ciclo de vida, da exploração e fornecimento de materiais e combustíveis até a produção e a operação dos objetos investigados a seus despejos/reciclagens [155]”.

O objetivo aqui não é fazer um estudo exaustivo e profundo sobre os ciclos de vida das tecnologias da Geração Distribuída, mas apresentar de uma maneira geral como podem ser investigados mais detalhadamente a degradação ambiental completa delas. Para isso, é proposta uma divisão de uma tecnologia qualquer de Geração Distribuída em três fases ligadas entre si na respectiva ordem: pré-operação, operação e pós-operação. A pós-operação pode estar conectada à pré-operação parcialmente se houver reciclagem.

Antes de se passar às explicações de cada fase e discutir alguns exemplos, pode se ter uma noção dos impactos da Geração Distribuída pelos valores de emissões da cadeia energética de algumas tecnologias em gCO_2eq/kWh (o gCO_2eq ou grama de “equivalente de carbono” se refere a uma medida de quanto de massa de CO_2 seria emitido se todos os gases do efeito estufa fossem emitidos como ele) pela Tabela 4.1 [104]. As emissões de energia de biomassa devem ser vistas com cautela, porque elas são altas, mas CO_2 é absorvido pela própria plantação para biomassa quando este é o caso.

A fase de pré-operação consiste em toda a cadeia industrial e produtiva antes de ser vendida e utilizada. Ela é composta, portanto, da extração de matéria-prima, da transformação desta matéria nos produtos intermediário e final a serem utilizados, na construção dos equipamentos, nos testes, etc. Ou seja, todo o processo de obtenção dos materiais necessários e da fabricação. A partir de sua definição, é preciso analisar a degradação ambiental em questão. Desde a extração de matéria-prima já há degradação. No entanto, ela pode ser menor se cuidados forem tomados e se forem aplicados os métodos necessários para sua recuperação se ela for renovável. Se não for renovável, o problema é mais grave, porque ela deverá ser obtida de outro lugar, ampliando a área degradada. Já no processo de transformação, vários pontos podem ser levantados, tais como: se a energia usada provém de fontes poluentes ou não, se há desperdício ou mesmo despejo de material, se o próprio processo é poluente, se ele é tóxico, etc.

Tabela 4.1 – Emissões em gCO_2eq/kWh por ciclo de vida de algumas tecnologias.

Tecnologia	Emissões diretas	Emissões da cadeia de infraestrutura e fornecimento	Emissões biogênicas de CO_2 e efeito albedo	Emissões de metano (CH_4)	Emissões totais de ciclo de vida
					Valores típicos
Biomassa	~0	210	27	0	130/230/420
Geotérmica	0	45	0	0	6/38/79
Hidroelétrica	0	19	0	88	1/24/2200
Solar Térmica Concentrada	0	29	0	0	8,8/27/63
Solar Fotovoltaica – Telhado	0	42	0	0	26/41/60
Solar Fotovoltaica – Concessionária	0	66	0	0	18/48/180
Eólica – Onshore	0	15	0	0	7/11/56
Eólica - Offshore	0	17	0	0	8/12/35

Fonte: Adaptada de [104].

Refletindo sobre alguns exemplos, talvez isso fique mais claro. Os sistemas fotovoltaicos usam vários materiais para serem construídos. O principal é o quartzo, que é um material abundante, mas também são usados ferro, vidro, alumínio, plástico, etc. Os impactos da obtenção e do uso de cada um podem e devem ser medidos. Na produção das células fotovoltaicas, alguns métodos são extremamente complexos e precisam de uma enorme quantidade de calor para se obter lingotes que, por sua vez, são cortados para se conseguir *wafers* que formarão as próprias células. Ao serem fatiados, sobram restos do material que podem até ser descartados. É fácil imaginar que todo este processo exige uma grande quantidade de energia, além de poder ser contaminante e poluente. As turbinas eólicas, por outro lado, são feitas de fibras de vidro. Enquanto isso, as células a combustível usam vários tipos de compostos químicos. A diversidade produtiva e de materiais reflete em diversidade de degradação ambiental.

Entre a pré-operação e a operação podem ser considerados dois itens principais. Um é o transporte dos equipamentos. Como a Geração Distribuída é formada principalmente por geradores de pequeno porte, o transporte dos equipamentos é intenso. Isto pode ser feito por veículos automotivos, trens ou mesmo navios e aviões quando há importações. É interessante pensar se estes meios de locomoção poluem e em qual quantidade o fazem. O outro item é a própria instalação. Algumas vezes ela é simples e não causa tantos problemas, como é o caso dos módulos fotovoltaicos em telhados ou de células a combustível dentro de edifícios. No entanto, o problema é outro quando se tem que alterar alguma paisagem. O caso da energia de biomassa é bastante claro neste sentido. Muitas vezes é necessário desmatar uma grande área para poder fazer a plantação da matéria que gerará a biomassa. As pequenas hidroelétricas, apesar do impacto menor, também podem danificar os rios e as matas ao redor. As usinas fotovoltaicas ou solares térmicas concentradas de grande porte ocupam regiões muito grandes que talvez servissem de forma diferente à natureza.

A fase de operação já foi discutida. Ela consiste no momento de uso da Geração Distribuída para produção de energia elétrica. A poluição deve ser avaliada, assim como os impactos nas mudanças climáticas. No entanto, outros impactos podem ser analisados. As pequenas hidroelétricas, por exemplo, podem acabar com a vida de alguns peixes. As turbinas eólicas podem matar animais voadores, como pássaros e morcegos. Pode ser pensado, ainda na operação, em duas outras características que têm relevância. A primeira é na vida útil do equipamento. Quanto mais tempo durar, menor a necessidade de se produzir outro e, com isso, menor será a degradação ambiental. A segunda é a eficiência dos equipamentos que também está relacionada com o maior aproveitamento dos objetos e com a consequente redução nos impactos. A manutenção é outra questão que também pode ser posta.

Por fim, tem-se a fase de pós-operação. Ela se dá quando chega o fim da vida útil do aparato. Há dois caminhos: o descarte ou a reciclagem. Na primeira, a degradação será maior, porque os materiais envolvidos podem causar danos para onde foram despejados. No segundo, estes impactos são reduzidos, porque o material volta para a cadeia produtiva e, consequentemente, não é preciso extraír ou obter uma boa parcela do material que ele é composto. Os módulos fotovoltaicos com seus inversores, por exemplo, já são considerados lixos eletrônicos e, como outros desta categoria, muitas vezes não são descartados corretamente. Em 2016, somente 20% do lixo eletrônico do mundo todo de 44,7 toneladas métricas (6,1 quilogramas por pessoa), equivalente a 4500 torres Eiffel, foi coletado e reciclado apropriadamente e 76% não se sabe qual foi o destino dado [8].

Se a situação parece mais grave ainda do que se pode pensar, qual é a solução? Os autores Hawken e os Lovins deram algumas sugestões no livro “Capitalismo Natural” [93]. Para eles, o primeiro passo é inserir valor real para o capital natural. Este termo foi criado pelo economista inglês E. F. Schumacher para dizer que os recursos naturais devem ter tanta importância na economia quanto o capital econômico, aquele que aglomera as máquinas e as edificações. O capital natural, por sua vez, é “constituído de recursos, sistemas vivos e os serviços do ecossistema [93]”. Se esses recursos são escassos, eles devem ser gerenciados tal como é feito com o capital econômico para que os bens e serviços possam ser realizados de uma maneira ótima para todos.

Com esta ideia central, Hawken e os Lovins sugerem quatro mudanças no sistema atual [93]. A primeira e mais importante é a produtividade máxima dos recursos. Ela pode ser descrita também como a eficiência mais alta que se pode alcançar com determinado produto. Para que a degradação seja mínima, um recurso tem que ser explorado pelo maior tempo e com a maior quantidade de trabalho que puder realizar. A segunda consiste no biomimetismo. Imitando os ciclos naturais, o ser humano pode criar sistemas fechados que tragam o mínimo de desperdício e o máximo de reciclagem. Esta mudança é válida para equipamentos pequenos até grandes indústrias. A terceira é a implantação de uma economia de serviços e fluxos. No lugar da aquisição, sugerem os autores, a relação de produtor e consumidor se daria por serviços e fluxos dos bens. A quarta e última mudança é o investimento em capital natural. Para reverter a degradação ambiental, a sociedade deveria passar a reinvestir nela, valorizando os recursos, trazendo sustentabilidade e menos impactos negativos. Todo este novo sistema industrial seria pautado nos sistemas vivos [93]. Estas quatro mudanças podem muito bem ser adaptadas e perseguidas para a Geração Distribuída.

Toda tecnologia gera algum tipo de degradação ambiental. Isto parece ter ficado claro com as informações e as discussões desta seção. Reflexões ainda maiores são necessárias sobre o comportamento humano quanto às tecnologias e sua relação com o meio ambiente. Não seria hora de diminuir o consumo no lugar de buscar cada dia mais? Não é exclamativa a mudança de hábitos e estilo de vida? O crescimento desenfreado é válido para um mundo finito? Por que insistir em usar eletricidade ou qualquer outra forma de energia para todas as atividades se a natureza já provê muito daquilo que o ser humano precisa? Não é melhor usar os recursos naturais de uma forma mais inteligente? A humanidade tem toda a capacidade para realizar seu potencial com o mínimo de degradação ambiental, basta esforço.

4.3 – A Sociedade e a Geração Distribuída

As implicações sociais, juntamente com as ambientais, são as de maior importância de uma tecnologia e raramente são tratadas com tal relevância. Desde o início deste trabalho se afirmou que a tecnologia não é uma entidade abstrata, mas, ao contrário, ela transforma sociedades e é por elas modificada. É, portanto, imprescindível trazer a Geração Distribuída também para o campo social de discussão. Nesta seção serão feitas algumas reflexões sobre o assunto. Aqui, o significado de social é amplo, englobando temas que vão desde a política e a economia até a educação e a saúde. Apesar da abordagem de teor prático, o discorrimento da matéria se dá de forma mais especulativa. Isto é proposital, porque se entende que estudos muito mais profundos são necessários, mas que trazer à tona estas discussões já é um enorme passo no debate.

4.3.1 – A Política e a Geração Distribuída

O primeiro capítulo deste trabalho demonstrou que a tecnologia é constantemente alterada não só pela inovação e pela criatividade de cientistas e engenheiros, mas também por forças políticas e econômicas. No segundo capítulo, foi visto que o retorno da Geração Distribuída à área da produção de energia elétrica decorreu da atuação direta dos governos no seu desenvolvimento. Atualmente, ela faz parte da agenda política de muitos Estados. A energia em suas diversas formas é protagonista de discussões entre pessoas, de greves, de políticas nacionais, de acordos internacionais e até de guerras. Fica evidente, assim, que a Geração Distribuída e a política têm mais a ver entre si do que se possa imaginar. A seguir esta relação é abordada sob diferentes perspectivas. As ideias aqui apresentadas foram fortemente influenciadas pelos livros “*Small is Beautiful: Economics as if People Mattered*” [166] de E. F. Schumacher e “A Política da Mudança Climática” [82] de Giddens, altamente recomendados. As pesquisas já mencionadas de Elinor Ostrom também são indicadas. Nenhum destes trabalhos trata especificamente da Geração Distribuída, mas podem trazer reflexões sobre o assunto.

A ideia fundamental de E. F. Schumacher é que as economias ocidentais capitalistas têm tomado um rumo para o aumento dos problemas e não para suas soluções, não preenchendo as preocupações reais das pessoas. A busca pela grandiosidade produtiva trouxe e poderá trazer mais mazelas do que benefícios para os indivíduos, como a pobreza, a fome, a

poluição e a depleção de recursos não-renováveis. Assim, ele tenta colocar as pessoas no centro da economia e projeta que o meio para fazer com que isso ocorra é através do deslocamento de escala, passando do enorme para o pequeno, do “*small is beautiful*” (“o negócio é ser pequeno”, como às vezes é traduzido). O que ele propõe remonta ao budismo e aos pensamentos do ativista indiano Mahatma Gandhi. Nesta linha de pensamento, o desenvolvimento econômico, principalmente das pessoas e nações mais pobres, poderia ocorrer pelo uso do que hoje é chamado de “tecnologia apropriada” e que E. F. Schumacher nomeou em seu texto de “tecnologia intermediária”.

A tecnologia apropriada é um conceito de tecnologia que seja baseada no trabalho e não no capital. Ela se encontra entre uma tecnologia rudimentar dos países pouco desenvolvidos de valor muito baixo e uma tecnologia grandiosa típica de países altamente desenvolvidos de custos extremamente elevados [166]. Isto não quer dizer que a tecnologia apropriada deva ser pouco avançada. Ao contrário, para aumentar o desenvolvimento, a tecnologia apropriada deve ser de ponta ao mesmo tempo em que é muito mais barata que as tecnologias grandiosas. Mais ainda, outras características moldariam estas tecnologias. A tecnologia apropriada deve ser de pequeno porte, descentralizada, local, eficiente energeticamente e ter poucos efeitos negativos para o meio ambiente. O que fica claro é que a tecnologia apropriada permitiria crescimento econômico dos excluídos, pois não é preciso enfrentar enormes barreiras à entrada de mercados, tais como existência de monopólios e investimentos muito altos em edificações e máquinas.

Pelas propriedades da Geração Distribuída, ela parece enquadrar perfeitamente como uma tecnologia apropriada tal como anunciada por Gandhi e E. F. Schumacher. Ela está entre pequenas baterias e as gigantes “gerações tradicionais”. Em termos econômicos são evidentes os benefícios após a discussão feita. Contudo, uma consequência indireta da Geração Distribuída como tecnologia apropriada é a do fortalecimento da democracia, tornando-a cada vez mais direta e participativa. Como as pessoas detêm o poder técnico e econômico localmente sendo autossustentáveis, elas são independentes de grandes corporações e governos e podem tomar mais decisões. Podem, além disso, se esforçar em exigir mais seus direitos, pois há preocupações a menos com a apropriação da eletricidade e das suas aplicações. A energia é base do domínio de muitos governos e passando para as mãos dos cidadãos comuns, o poder do povo parece ser um caminho sem volta. É claro que isso depende destas tecnologias estarem disponíveis para possesão dos menos privilegiados, mas assim que conseguirem elas, a democracia dos pequenos através da tecnologia apropriada poderá ser concretizada. Unido aos pensamentos e pesquisas de Ostrom já discutidos, a Geração Distribuída não só pode ser uma ferramenta para dar mais voz para a população, como também abre espaço para uma democracia mais sustentável em todos os sentidos, dando mais conscientização às pessoas através da produção de energia elétrica e fazendo com que elas cooperem mais entre si.

Em seu livro [82], Giddens apresenta uma análise bastante lúcida do papel da política sobre as mudanças climáticas. Vários pensamentos deste trabalho e seu tema podem ser derivados para a Geração Distribuída, até porque é o próprio Giddens que diz que as mudanças climáticas e a segurança energética andam juntas.

A primeira questão a ser apontada é a mesma que também já foi concluída no capítulo 1 de que uma tecnologia para ter sucesso deverá imperativamente ser auxiliada pelo governo.

Isto pode ser feito através de leis, de subsídios para a tecnologia e para os meios de adoção, de investimentos, de promoção e de informação. Aqui, Giddens apresenta três conceitos para as mudanças climáticas que podem ser aplicados na política para Geração Distribuída. Em primeiro lugar, o Estado deve ser assegurador, isto é, ele deve ser “responsável por monitorar os objetivos públicos e por procurar certificar-se de que eles se concretizem de forma visível e aceitável [82]”. Sendo assim, se a Geração Distribuída for tida como a tecnologia necessária e adequada para produção de energia elétrica para o bem da população e do meio ambiente, o Estado deverá ajudar todos os grupos envolvidos e se empenhar para que ocorram resultados concretos de sua implementação. Os outros dois conceitos são os de convergência política e econômica [82]. A convergência política trata de garantir que políticas públicas que não tenham relação direta com a política de produção de energia elétrica sofram mudanças positivas com ela. Por exemplo, o maior uso de fontes energéticas que não poluem a atmosfera faz com que as doenças associadas à respiração sejam reduzidas, o que implica em uma melhora na saúde pública. A convergência econômica, por sua vez, trata da “superposição entre tecnologias com baixa emissão de carbono, formas de práticas comerciais e estilos de vida com competitividade econômica [82]”.

A segunda questãoposta por Giddens e aqui explorada é a da transcendência política [82], que é a superação do espectro partidário para tratamento de políticas universais. Neste caso, a Geração Distribuída vai à contraposição das mudanças climáticas. Enquanto estas últimas, quando são levadas em conta, são constantemente alvos de críticas, questionamentos e polêmicas na arena política, a primeira parece fazer a conciliação dentro do espectro partidário e favorecer todos com a melhora nas condições ambientais. Normalmente, existe muita discordância sobre as questões do meio ambiente dentro dos governos, mas quando existe um apelo econômico e tecnológico como é o caso da Geração Distribuída, é fácil fazer alianças entre esquerda e direita e efetivamente colocar em prática políticas para o bem comum. Giddens [82] acertadamente defende que é preciso fazer um pacto político que fuja desta dicotomia esquerda e direita para tornar as questões ambientais uma política de Estado e não de governo, portanto, que perdure para obtenção de respostas em longo prazo mesmo com alterações no poder. Enquanto para as mudanças climáticas deverá existir um extenso processo de conscientização até que os governantes adotem um acordo, a Geração Distribuída pode ser o meio mais ágil para que ele ocorra.

Sob uma visão mais ampla da tecnologia, com grande referência à Geração Distribuída, deveria também ocorrer uma transformação sobre como ela progride e quais rumos ela toma. O que aqui se clama é para uma espécie de “democratização da tecnologia” que vai além da abordada “democracia através da tecnologia”, onde exista uma expansão da decisão sobre seus avanços. Apesar de algumas inovações serem fantásticas e parecerem úteis, elas não podem continuar sendo orientadas verticalmente, onde inventores e empresas criam e desenvolvem produtos e determinam o que as pessoas devem ou não usar através do mercado. A tecnologia deveria ser posta no sentido oposto. É a sociedade quem deve reclamar quais artefatos ela precisa e para quais fins. Os engenheiros e especialistas, por sua vez, deveriam ser mais sensíveis ao desejo da maioria, se engajando e direcionando suas pesquisas para o bem geral. Deve existir mais poder da população sobre a tecnologia, porque só ela conhece suas necessidades e, assim, apenas ela pode indicar como elas podem ser sanadas.

4.3.2 – A Economia e a Geração Distribuída

A economia tem influência direta no andar de uma tecnologia. Ela direciona muito do seu progresso e os preços têm um enorme impacto nisso. Afinal, é preciso grandes investimentos e demanda para que uma tecnologia se desenvolva. O pensamento ambiental, conforme foi visto neste capítulo, surgiu antes da década de 1970 com estudos científicos feitos sobre o assunto já em 1960. Apesar disso, no capítulo 1 foi reconhecido que os governos, as empresas e também as pessoas em geral só tomaram consciência mais profunda dos problemas dos combustíveis fósseis quando ocorreram as crises do petróleo de 1973 e 1978-79 que elevaram seu preço extraordinariamente. A maioria dos países fez mudanças radicais em relação à energia após estes acontecimentos que até hoje são sentidas. Além do mais, este trabalho mostrou que várias tecnologias de produção de energia elétrica existiam como ideia ao menos bem antes de se popularizarem e que elas foram se aprimorar muito mais por forças econômicas do que por novas técnicas desenvolvidas. É preciso, portanto, reflexões acerca da economia e a Geração Distribuída. A base teórica para as discussões a seguir foi retirada do manual de economia de Mankiw [133].

Um dos conceitos mais fortes dentro da economia relacionado à Geração Distribuída é o de externalidades. Na maioria das trocas econômicas, um consumidor e um produtor tentam obter o máximo de proveito que puderem do bem ou serviço em transição entre os dois. Enquanto um quer ter lucro, o outro quer a utilidade daquele bem ou serviço. Quando, todavia, é feita uma venda, os dois personagens envolvidos podem afetar positivamente ou negativamente outros indivíduos que não participaram e nada têm a ver com as trocas executadas. A isto se dá o nome de externalidade. Ou seja, a externalidade é o impacto causado pela ação de agentes participantes em uma transação na vida de terceiros. Se o impacto é benéfico, a externalidade é positiva. Se, ao contrário, prejudica terceiros, a externalidade é negativa.

A questão é que os benefícios e os custos das externalidades não são colocados de fato no meio privado. Sem considerá-los, a produção de um bem ou serviço com externalidade negativa é maior do que a sociedade deseja. O mesmo ocorre para a externalidade positiva no sentido contrário. Uma menor quantidade é produzida do que aquela que traria maior bem-estar para as pessoas. No primeiro caso, diz-se que o custo social (oferta) excede o privado, enquanto que no segundo, o valor social (demanda) é maior que o privado [133].

A poluição e as mudanças climáticas são duas externalidades negativas muito impactantes na sociedade e, deste modo, são de suma importância também na economia. A Geração Distribuída, como se viu, traz muitos benefícios porque emite uma quantidade muito menor de gases do efeito estufa e em grande parte é formada por fontes renováveis em contraste com os combustíveis fósseis. As questões econômicas no caso da produção de energia elétrica, por isso, devem ser tratadas com esta posição relativa entre as duas. Os problemas energéticos devem levar em conta os valores da Geração Distribuída e dos combustíveis fósseis de forma interdependente.

O fato do mercado não conseguir alocar de forma eficiente os recursos é chamado de falha de mercado, pois se acredita em economia que, na maioria das situações, ele consegue realizar essa tarefa. As externalidades são uma falha de mercado e, para corrigi-la, fazendo os produtos terem seus custos e valores sociais efetivamente realizados, é preciso a ação do

Estado. O que os governos podem fazer é internalizar as externalidades. Quer dizer, eles podem criar incentivos para que as pessoas avaliem seus impactos a terceiros com suas ações [133]. Muitas das vezes, as pessoas não estão preocupadas se o que fazem afetará os outros. Não porque lhes falta senso coletivo. Ele até existe, mas é que elas possuem muitos outros problemas e dificuldades que acabam não conseguindo refletir e nem agir melhor sobre isso.

Quais são, então, os mecanismos dos governos para internalizar as externalidades? Se elas forem negativas, a resposta são os impostos corretivos ou de Pigou, em referência ao criador desta ideia, o economista Arthur C. Pigou. O Estado tem a capacidade de diminuir a produção de um bem ou serviço que prejudique terceiros ao aumentar seu preço com taxação. Um caso bastante discutido hoje em dia e que está inteiramente relacionado com o mercado de energia elétrica é o de impostos para poluentes, mais precisamente para carbono. Muitas empresas não se importam se estão poluindo ou se estão aumentando os efeitos das mudanças climáticas. O governo, por sua vez, é a instituição social por natureza e é dele, portanto, a responsabilidade em solucionar este problema. Ele pode criar impostos que façam com que os indivíduos, preocupados com o preço de um produto, consumam menos dele. Diminuindo a demanda, os produtores serão incentivados a reduzirem a produção também. No final, todos saem ganhando. O uso de combustíveis fósseis para produção de energia elétrica cai facilmente neste caso. Tributando esta forma de se gerar energia elétrica, a população poderia estar inclinada a poluir menos e a mitigar as mudanças climáticas.

Existe uma grande preocupação das pessoas em relação aos impostos, mas aqui entra a solução convergente da produção de energia elétrica. Assim, como se pode internalizar as externalidades negativas, existem meios para fazer o mesmo com as positivas. Novamente o governo tem papel primordial. A ferramenta inversa por ele usada é a dos subsídios, que nada mais são que incentivos financeiros para apoiar determinados bens ou serviços. Os governos podem de maneiras diferentes reduzir os preços dos produtos. Eles podem diminuir impostos já cobrados ou mesmo pagar parte do valor para que o consumidor final compre com preços mais baixos aquilo que possui externalidade positiva. Ora, isto pode ser feito exatamente na Geração Distribuída. Se os equipamentos fossem mais baratos, existiria um grande incentivo para que as pessoas adotassem amplamente suas tecnologias. Os resultados seriam bons para todos, porque, como se viu, existem muitos benefícios com seu emprego, principalmente se relacionado aos combustíveis fósseis, à energia nuclear e às grandes hidroelétricas. Mais ainda, se os governos tomassem a atitude dos impostos corretivos para combustíveis fósseis e subsídios para Geração Distribuída em conjunto, suas contas não sofreriam com nenhum problema, visto que, apesar de um lado gastar, do outro estaria arrecadando.

Existem muitas outras questões sobre economia que não serão abordadas aqui, mas que o autor enfatiza que devem ser pensadas. Alguns exemplos podem ser mencionados. O mercado de energia elétrica foi liberalizado ou desregulamentado. Seria este um rumo para a melhora ou piora dos preços de energia elétrica? Por um lado, o mercado de energia elétrica pode tender à concorrência perfeita em oposição aos monopólios e oligopólios tradicionais e o preço de equilíbrio, valor ótimo para oferta e demanda, talvez poderia ser alcançado. Por outro lado, com o fim da regulamentação, os preços podem ser mais altos do que antes, já que os empresários querem maximizar seus lucros. A questão pode ser ainda mais complexa, visto que o próprio mercado de eletricidade poderá mudar radicalmente toda sua estrutura com novas formas de compra e venda de energia. Algumas pessoas têm até mesmo sugerido, baseado no New Deal americano dos anos 1930 e nas ideias do grande economista inglês John

Maynard Keynes, o emprego maciço da Geração Distribuída e das chamadas “tecnologias verdes” como ferramentas anticíclicas, podendo resolver crises e recessões. Existem muitas outras questões em aberto entre economia e Geração Distribuída. Este campo é muito vasto e diversas reflexões podem surgir.

4.3.3 – A Desigualdade e a Geração Distribuída

A desigualdade socioeconômica tem sido um problema antigo persistente e que pode ser encontrado em todos os países com maior ou menor gravidade. A Geração Distribuída pode ter um papel importante neste tema. A grande questão é se ela será um meio para amenizar a desigualdade ou para agravá-la ainda mais.

Se as pessoas mais pobres, as pequenas empresas e os pequenos agricultores usufruírem da Geração Distribuída, melhorias na qualidade de vida e no desempenho econômico serão alcançados de uma forma geral. Com efeito, como a maioria dos equipamentos utilizados tanto para afazeres domésticos, quanto para comércio funcionam a base de eletricidade, gerar a própria energia elétrica é uma ação repleta de resultados positivos.

As famílias com menor renda podem beneficiar de vários dispositivos para melhorar seu dia a dia. Elas poderão usar o dinheiro que ganham para adquirir outros bens e serviços quando deixam de pagar as contas sempre crescentes de energia elétrica. O conforto proporcionado pelos aparelhos elétricos antes de propriedade quase exclusiva de classes com maior renda pode passar a ser propriedade de pessoas mais pobres, o que reduz as diferenças sociais.

Da mesma forma, pequenas empresas que têm em seus estabelecimentos uma produção de energia elétrica local por módulos fotovoltaicos ou células a combustível, por exemplo, poderão investir parte dos lucros para melhorar seus negócios em vez de pagar o preço da eletricidade. Podendo fazer isso, as pequenas empresas talvez não cheguem a ter o mesmo poder que as grandes, mas podem, com isso, tornar seus empreendimentos mais lucrativos e também mais chamativos, visto que elas poderão apelar para o fato de usarem, quando for o caso, fontes renováveis de energia que são benéficas ao meio ambiente.

Indiretamente, a Geração Distribuída cria empregos, o que resulta também na diminuição da desigualdade. Isto tanto devido aos trabalhos que surgem a partir do próprio mercado de Geração Distribuída, como com fabricação, venda e manutenção, como também pela ausência de pagamento de contas de energia nas pequenas e nas grandes empresas que podem contratar mais pessoas.

Os pequenos agricultores também podem tirar proveito desta tecnologia. No lugar de pagarem pela energia elétrica das concessionárias, eles podem ter todos os benefícios da eletricidade produzindo em suas próprias propriedades. Eles podem se aproveitar ainda mais que as pequenas empresas urbanas por diversas razões. Uma é que, por algumas vezes estarem isolados da rede elétrica, poderão ter a energia elétrica que não tinham e, mais ainda, ter conforme suas necessidades. Outra razão é que pelo espaço que eles possuem, além das propriedades geográficas de suas fazendas, a escolha da fonte a ser usada é muito mais ampla.

Os pequenos estabelecimentos urbanos estão limitados em suas escolhas devido às condições do espaço físico e geográfico da cidade, tais como a impossibilidade de ter energia eólica pelas baixas velocidades de ventos e as poluições visual e sonora que podem incomodar a população; ao número diminuto de módulos fotovoltaicos restrinido pela área dos telhados onde podem ser instalados, fora as sombras de outros prédios; os pequenos geradores rotativos podem incomodar a vizinhança com seus ruídos e poluição. Enquanto isso, os pequenos fazendeiros podem aproveitar de quase todas as fontes. Uma ou mais turbinas eólicas de grande porte que aproveitam de ventos de velocidades altas pode ser levantadas; um número muito maior de módulos fotovoltaicos pode ser instalado aproveitando do maior espaço e menos sombra; geradores rotativos, seja com combustíveis fósseis, seja para cogeração, perturbarão apenas os proprietários. Fora estas fontes, se possuírem pequenos rios apropriados podem gerar eletricidade com pequenas hidroelétricas. Também podem gerar energia elétrica através da biomassa que eles mesmo produzem em suas fazendas. Com todas estas melhorias em seus patrimônios, os pequenos agricultores terão mais chances de competir com os grandes fazendeiros.

O problema central nisso tudo é o preço da Geração Distribuída. Qualquer que seja ela, o valor pode ser muito alto para as famílias menos favorecidas, assim como o capital inicial de investimento pode ser grande para as pequenas empresas e para os pequenos agricultores. Deste modo, as camadas sociais mais abastadas, as grandes empresas, indústrias e grandes latifundiários serão os primeiros a serem proprietários de Geração Distribuída e a aproveitar de todos seus benefícios. Com isso, todos eles estarão na frente dos mais pobres, seja em questões de conforto, de tecnologias de ponta ou de maior produção. Ou seja, no lugar de desempenhar um papel redutor de desigualdade, a Geração Distribuída pode ampliá-la ainda mais. A distorção socioeconômica pode advir não só de como as pessoas, firmas e fazendas consomem eletricidade, mas também de como elas produzem eletricidade. Famílias ricas podem ter mais conforto do que já tinham produzindo sua própria energia elétrica. No lugar da conta de energia elétrica que pagavam, eles podem aumentar suas propriedades privadas ou mesmo fazer investimentos, tornando-se mais ricos. Já as grandes empresas e indústrias poderão levar vantagem no desempenho de suas produções, elevando seus lucros. No futuro, a Geração Distribuída que poderia ser um meio de ampliar a concorrência, pode se tornar uma barreira à entrada em mercados. Se as empresas se autossustentarem com energia elétrica, será difícil para novas firmas entrarem em alguns mercados. Os grandes latifundiários, por sua vez, possuem propriedades que têm terrenos enormes, onde podem gerar energia elétrica das diversas fontes em escala muito maior que os pequenos agricultores. Nos dois últimos casos, pode ser imaginado um aumento no número de empregos, mas como nestes empreendimentos de grande porte o consumo de eletricidade cada dia mais é voltado para a automatização dos meios de produção, justamente o contrário pode ocorrer, crescendo o desemprego e, claramente, a desigualdade.

Então, sob estas difíceis questões sobre a desigualdade, como contornar o problema? Como o preço parece ser a peça chave, de alguma forma ele deve ser reduzido para que as classes menos favorecidas tenham oportunidade de adquirir a Geração Distribuída. Há, para isso, dois caminhos. O primeiro é o do próprio mercado. Ao passar do tempo, com a melhora na produção, com maior conhecimento e ao se produzir em massa, a tecnologia pode ter seu valor reduzido. É o que tem acontecido. O problema deste rumo é que a escala temporal acelera o avanço socioeconômico das camadas mais endinheiradas, enquanto atrasa o dos mais pobres. Enquanto os ricos obtêm a Geração Distribuída mesmo com preços ainda

elevados, aqueles com menor poder aquisitivo deverão esperar um longo período até poderem ter a tecnologia. No curto prazo, portanto, os mais ricos já terão a Geração Distribuída como propriedade e poderão aumentar suas rendas e produções. Aqueles que têm baixa renda, ao contrário, não verão em seus horizontes a Geração Distribuída até que o preço seja diminuído de forma drástica em um período muito distante de tempo, porque estarão preocupados no curto prazo em gastar ou investir em bens e serviços imediatos, alguns para sobrevivência, como é o caso das famílias, e outros para suprir custos de produção essenciais, como acontece para pequenas firmas e agricultores. Este caminho, assim, parece agravar a desigualdade.

O segundo caminho plausível depende da ação direta do Estado. Como as camadas mais pobres da população não têm as condições necessárias para obter a Geração Distribuída e a redução de preços pelo mercado para elas é muito lenta, será preciso auxílio. Como o Estado tem a incumbência de fazer o melhor para toda a sociedade, é dele a força para amenizar a desigualdade. Na questão da Geração Distribuída, os governos podem encontrar meios de subsidiar a tecnologia para classes socioeconômicas inferiores. Se o Estado puder abrandar o valor para aqueles com menor renda, os benefícios da Geração Distribuída como meio de redução da desigualdade já comentados poderão ser alcançados mais facilmente. Se se criar esta vantagem para aqueles que possuem menos, famílias, pequenas empresas e pequenos agricultores terão chances de elevarem não apenas seus próprios patamares socioeconômicos, mas também de várias outras pessoas e firmas indiretamente.

4.3.4 – A Migração e a Geração Distribuída

A migração é o deslocamento de pessoas de uma região para outra. Ela ocorre desde tempos ancestrais na humanidade e o número de pessoas que saem e entram em locais remotos tem aumentado significativamente nos últimos anos. Uma boa parcela migra em condições favoráveis para estudos, trabalho bem remunerados ou mesmo para conhecer e se aventurar em novas culturas. A maioria, porém, busca melhores oportunidades e condições de vida em diferentes dimensões e as razões para isso são diversas, sendo que muitas vezes elas são forçadas a fazerem isso, porque a situação para elas e suas famílias é desesperadora. Pesam na escolha pela migração internacional: guerras, violência, perseguições políticas, religiosas e raciais, mas também problemas ambientais e principalmente dificuldades sociais e econômicas.

Para se ter noção quantitativa do imbróglio, dados de um relatório recente da ONU [149] são apresentados. No ano de 2017, o número de migrantes internacionais chegou a 258 milhões, enquanto este número era de 173 milhões em 2000. Em 2016, os refugiados e pessoas buscando asilo eram de aproximadamente 25,9 milhões. No mesmo ano, os migrantes de países desenvolvidos enviaram para seus países natais cerca de 416 bilhões de dólares em remessas. O destino final de dois terços dos migrantes em 2017 foram os países com alta renda por pessoa. Estes dois últimos dados indicam que a movimentação entre nações se dá principalmente por forças econômicas.

Apesar da migração poder ser altamente benéfica ao transferir riquezas humanas para o local de desembarque destas pessoas, tais como maior diversidade e aumento do desenvolvimento científico e tecnológico com o transporte da inteligência e a experiência

diversificada de seus próprios países, os migrantes têm sido pessoas vulneráveis. Ódio, racismo e xenofobia em níveis elevados têm sido temas recorrentes nos noticiários. Pior ainda, estas ideias têm ganhado força política com governos assaz conservadores e nacionalistas tomando o poder em todo o mundo. No extremo, casos de violência física são periódicos.

Como, afinal, a migração pode ser relacionada com a Geração Distribuída? Pelo que foi apresentado, a economia parece ser uma das maiores motivadoras para o deslocamento das pessoas de seus países, sendo que elas se movem forçadas, fugindo das mazelas de onde nasceram. É aqui que entra a oportunidade da Geração Distribuída para contribuir para a amenização das dificuldades migratórias. Se as pessoas tiverem melhores condições de vida para si e para suas famílias, elas poderão se manter em seus próprios países. Analisando as razões pelas quais há migração internacional, a relação entre ela e a Geração Distribuída fica mais clara.

Pelo lado ambiental, como já foi visto, a Geração Distribuída pode contribuir a favor da luta contra as mudanças climáticas, assim como na diminuição da poluição. Ambas tendem a degradar diversas regiões no mundo e as mais impactadas são as que já se encontram em situação deplorável. Mitigando-as e se adaptando a elas com Geração Distribuída podem ser reduzidos os movimentos migratórios, porque não será necessário procurar por recursos em outros lugares se eles estiverem disponíveis localmente, nem será preciso que os indivíduos fujam das transformações ambientais que dificultam viver. Ela também permite a realização de outras tarefas que envolvem problemas naturais já existentes, tais como o bombeamento de água em regiões pobres neste recurso natural usando geradores pequenos e que podem ser deslocados facilmente, tal como é o caso dos módulos fotovoltaicos. Este é apenas um exemplo, mas existem inúmeras possibilidades neste sentido.

Já sobre as dificuldades sociais e econômicas, a Geração Distribuída pode trazer múltiplos benefícios. Por serem mais fáceis e baratas de serem fabricadas do que as enormes infraestruturas das “gerações tradicionais”, por poderem ser instaladas rapidamente em quantidades variadas e com alta diversidade de fontes, as tecnologias da Geração Distribuída permitem que regiões que antes sofriam com a falta de energia elétrica possam usufruir deste bem aproveitando o que se tem de melhor em cada lugar em termos geográficos e físicos para sua produção. O desenvolvimento econômico é consequência disso. Em vez de terem que sair de seus países para tentar encontrar oportunidades de trabalho e poder remeter o dinheiro ganho para suas famílias, as pessoas poderiam se manter unidas e se desenvolver sem terem que se deslocar. Fora isso, a energia elétrica e os aparelhos que fazem uso dela dão mais conforto para as pessoas como no caso da iluminação.

Também consequência da Geração Distribuída é o empoderamento das pessoas sobre a política em diversas facetas. Sendo donos de sua própria energia elétrica e podendo ter equipamentos e tecnologias a base de eletricidade, as pessoas passam a reivindicar outros problemas políticos que não passam por suas cabeças, já que muitas das vezes vivem em situações miseráveis que podem ser sanadas se tiverem o arsenal para isso. Os computadores, telefones celulares e televisores não passam de caixas cheias de pequenos metais e semicondutores se não tiverem eletricidade para funcionar, mas se puderem ser usados para discussões, informações e comunicação, eles formam uma poderosa ferramenta política para combate às opressões, violências e guerras ao dar voz às pessoas.

A Geração Distribuída, portanto, pode contribuir indiretamente na diminuição da migração forçada, o que subtrai o infeliz número de mortos que tenta em vão atravessar fronteiras e oceanos em busca de novas oportunidades, assim como a xenofobia deplorável que estas pessoas que estão em situações de desespero sofrem procurando melhorar suas vidas e de suas famílias. Para isso, é expressamente recomendado e vital a transferência tecnológica. Visto que as nações mais ricas detêm grande parte da tecnologia da Geração Distribuída, mas ao mesmo tempo são as que mais recebem migrantes, elas poderiam ter participação mais ativa na redução do problema. Uma vez que passassem o conhecimento e também os meios materiais para que os países mais pobres pudessem desenvolver a Geração Distribuída interiormente, é provável que as pessoas buscariam se deslocar menos e todos os benefícios citados apareceriam. Outro ponto de destaque aqui é que a transferência tecnológica seria muito mais barata do que os altos custos com a segurança de fronteiras e a construção de moradias temporárias, por exemplo, fora o mais importante que é a consequente redução do ódio, das políticas anti-migratórias e da violência física com que os já padecedores migrantes são defrontados ao chegarem, ou ao menos tentarem chegar, em seus destinos.

A defesa aqui da diminuição das migrações é tão-somente para aquelas que ocorrem forçadamente. O autor é a favor de que as pessoas tenham liberdade de escolher se permanecem em seus países ou se mudam deles, se assim desejarem. Novamente, deve ser destacado que a migração pode ser muito positiva e enriquecedora. Aliás, a própria Geração Distribuída seria beneficiada por isso. Como por definição ela é a tecnologia de produção de energia elétrica que se aproveita da diversidade geográfica e física, indivíduos com origens diversas trocando entre si diferentes experiências e conhecimentos técnicos sobre o assunto poderia melhorar substancialmente a tecnologia. Como pôde ser notado ao longo do capítulo 1, as diversas nacionalidades das personalidades e empresas envolvidas indicam claramente que a história dos avanços de uma tecnologia não possuem fronteiras. Ao contrário, o progresso tecnológico só parece ser possível de acontecer velozmente se pessoas de diferentes localidades participarem em conjunto para isso.

4.3.5 – A Saúde e a Geração Distribuída

Toda tecnologia impacta o meio ambiente negativamente de uma forma ou de outra, algumas menos em um sentido, mas mais em outro. A transformação da natureza pelo ser humano inevitavelmente lança poluição. Além disso, as mudanças climáticas e outras consequências das atividades humanas têm modificado as características naturais do solo, das águas e do ar. Todos estes efeitos podem ser refletidos para as pessoas como impactos na saúde.

Em um estudo publicado recentemente na revista científica de medicina Lancet, a Comissão Lancet sobre poluição e saúde [123] apresentou dados impressionantes que relacionam a poluição à saúde. De acordo com o trabalho, em 2015 o número de mortes prematuras causadas por doenças com origem na poluição foi de, aproximadamente, 9 milhões, o que representa 16% de todas as mortes no mundo na mesma época. Este valor apavorante representa mais mortes que aquelas por AIDS, tuberculose e malária somadas no mesmo ano e 15 vezes mais que guerras e outras formas de violência. Destes, as pessoas mais afetadas são aquelas mais pobres e vulneráveis, sendo que 92% ocorrem nos países de rendas

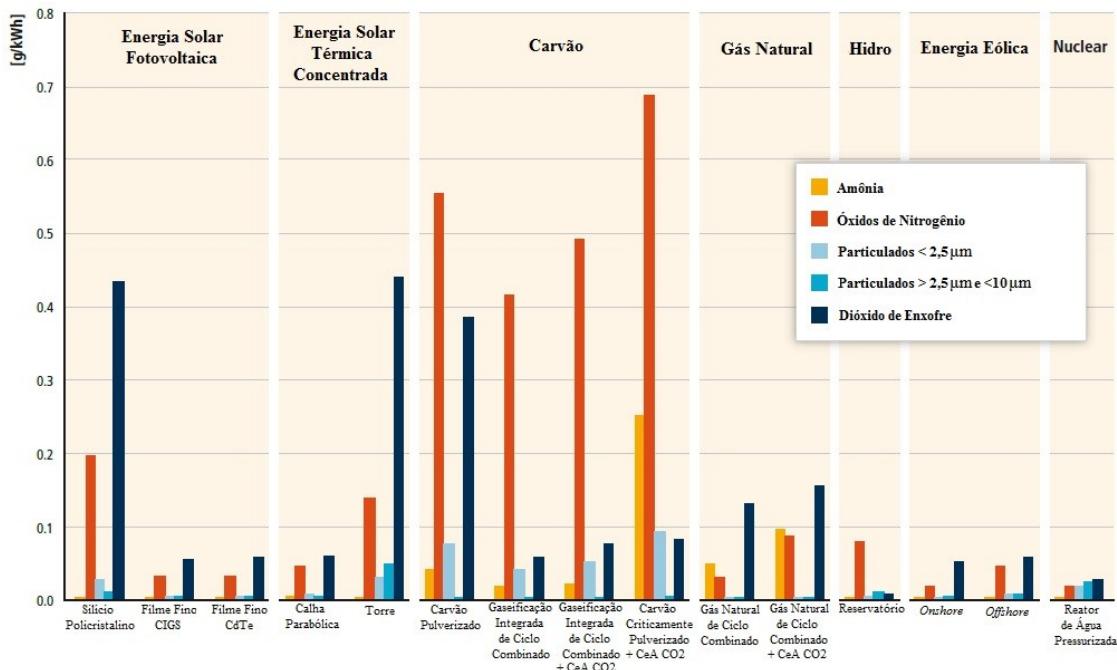
baixa e média. A poluição nestes países representa pouco mais de um quarto das mortes a ela relacionadas, sendo as crianças as mais afetadas [123].

Como a produção de energia elétrica por combustíveis fósseis emite uma enorme quantidade de gases poluentes na atmosfera, parece ser evidente a relação positiva entre o emprego da Geração Distribuída e a melhora na saúde das pessoas. Muitas das tecnologias não poluem a atmosfera ou o fazem de forma muito menor quando em operação, tais como a energia solar fotovoltaica, a energia eólica, as pequenas hidroelétricas e a energia solar térmica concentrada. Vendo apenas deste lado, a Geração Distribuída realmente parece ser próspera para a saúde humana e de fato ela é se bem empregada. Todavia, é preciso enxergar a poluição sob toda a cadeia produtiva pela avaliação por ciclo de vida.

Para melhor ilustrar e exemplificar como pode ser feita esta análise, a Figura 4.1 pode ser discutida. Ela exibe diversas tecnologias de geração de energia elétrica e suas respectivas emissões de poluentes atmosféricos para cada 1 kWh produzido para todo o ciclo de vida. Aquelas de combustíveis fósseis representam o estado da arte em questão de controle de poluição. Fica claro pelos gráficos que o carvão é o maior poluente em termos de particulados, assim como de óxidos de nitrogênio (NO_x). O que é interessante de notar, no entanto, é que a energia solar fotovoltaica de silício policristalino, uma das tecnologias mais utilizadas de Geração Distribuída e que mais tem espaço no mercado, emite a maior quantidade de dióxido de enxofre (SO_2) no seu ciclo de vida entre todas. A energia solar térmica concentrada apresenta quase o mesmo valor quando se usam torres. Este gás é altamente tóxico e nocivo para a saúde humana e é o causador da “chuva ácida” e do *smog*, efeitos altamente danosos para o meio ambiente. Apesar de ser menor, a quantidade lançada de NO_x pelas duas mesmas tecnologias, que também contribuem para os mesmos fenômenos ambientais negativos que o SO_2 e para problemas respiratórios e cardiovasculares, ainda é alta se comparada com outras fontes. Os problemas com a saúde humana devido à Geração Distribuída não são exclusivamente da poluição atmosférica, outras podem ser pensadas e discutidas. Alguns exemplos demonstram esta diversidade. Um exemplo é a possível má-nutrição decorrente do uso extensivo de áreas de plantio para energia de biomassa no lugar do cultivo de alimentos. O mesmo cádmio que serve para formar filmes finos (CdTe) e tem baixa poluição para sistemas fotovoltaicos é também um metal altamente tóxico. O ruído causado por turbinas eólicas é uma fonte de poluição sonora e pessoas residentes próximas delas às vezes podem sofrer com isso.

As tecnologias de filme fino para energia solar fotovoltaica não são tão exploradas no mercado quanto as de silício policristalino. Uma das justificativas maiores para isso é que elas apresentam eficiências menores. No entanto, como se pode ver pela Figura 4.1, a poluição que causam em um ciclo de vida é muito menor que as de silício policristalino. Como foi visto, o cádmio é muito tóxico e compõe um dos materiais de filme fino. É preciso pesar as consequências e este é o primeiro passo para combater os problemas da saúde causados pela Geração Distribuída: escolher aquelas tecnologias que afetam menos. Apesar destas situações aparentemente não tão positivas, a maior parte das tecnologias de Geração Distribuída ainda faz um menor mal à saúde do que as de combustíveis fósseis. O mais importante é incorporar a saúde nas discussões e análises.

Figura 4.1 – Emissões de alguns poluentes por ciclo de vida para diferentes tecnologias.



Fonte: Adaptado de [106].

Um último ponto pode ser considerado: o uso da Geração Distribuída para atividades médicas. Como a eletricidade é usada em diversos aparelhos modernos de medicina, a Geração Distribuída pode impulsionar a aplicação deles em locais remotos. Outra função relacionada à medicina é a facilidade com que a Geração Distribuída pode ser empregada em situações de emergência quando há falta de suprimento pela rede elétrica em hospitais. Se o sistema for bem estruturado, no momento em que isso ocorre, a tecnologia de Geração Distribuída pode entrar imediatamente para não permitir que operações e cirurgias sejam afetadas. Ela ainda pode ser a fonte exclusiva de eletricidade.

4.3.6 – A Educação e a Geração Distribuída

Como a Geração Distribuída é uma forma de produção de energia elétrica que está mais próxima aos consumidores e, ao mesmo tempo, tem uma maior diversidade de fontes que podem ser essenciais para o bem da humanidade e da natureza, ela é uma tecnologia que imperativamente deve passar por todos os níveis da Educação. Antes, a geração de energia elétrica era distante não só fisicamente, mas também intelectualmente. A sociedade em quase sua totalidade não se preocupava em como era produzida a energia elétrica, somente se ela estaria presente para o consumo ou não. Com a Geração Distribuída, entender seus princípios, nem que seja de forma básica, é importante, porque qualquer indivíduo pode ser um produtor e, mesmo aqueles que não serão, presenciarão alguma hora em suas vidas esta tecnologia.

No nível da infância, os conceitos de energia e eletricidade podem ser ensinados de maneiras bastante ilustrativas que possam despertar nas crianças a compreensão de como é gerada energia elétrica em suas várias fontes e para que serve, mas também para que elas estejam cientes da importância de usá-la de forma racional, conservativa e que possa ajudar a

vida das pessoas e o meio ambiente. Claramente, nenhum detalhe técnico pode ser aprendido pela maioria das crianças. Porém, o que deve ser repassado para elas é a diversidade das tecnologias, abordando principalmente benefícios e malefícios de cada uma, apontando quais são renováveis e quais não são. Elas podem desde pequenas entender que alguns equipamentos podem transformar a luz do sol, os ventos, as ondas e a biomassa em eletricidade. É importante ressaltar o ensinamento baseado no pragmatismo. Como a maioria das pessoas terão contato direto com a Geração Distribuída, é interessante mostrar para os jovens algumas das tecnologias em funcionamento. No futuro, é provável que muitas escolas tenham módulos fotovoltaicos em seus telhados, células a combustível em seu interior, cogeração, etc. Conversar e discutir dentro de sala de aula situações em que a Geração Distribuída esteja presente no cotidiano das crianças fora da escola é aconselhado. Usar desenhos criativos para chamar a atenção também deve ser considerado. Outro item que é indispensável na educação infantil com relação à Geração Distribuída é a segurança. Desde criança as pessoas deverão ter consciência dos perigos que os dispositivos podem ter e que se quiserem conhecer qualquer um deles, devem ser acompanhados por adultos.

Na adolescência, no nível colegial, os jovens já estão aptos a aprender mais detalhes das formas de conversão de energia. Como a Geração Distribuída é uma tecnologia de grande diversidade e como suas fontes têm origens muito variadas, ela pode ser um ponto de estudos interdisciplinar. Na Física, o assunto pode ser tratado de várias maneiras com facilidade, assim como na Matemática. Resolver problemas que envolvam os raios solares que chegam até um módulo fotovoltaico na Ótica, fazer diversos cálculos em conservação de energia, introduzir as configurações das tecnologias com exercícios de Geometria, solucionar questões que envolvam a velocidade dos ventos e a potência produzida por uma turbina eólica, etc. Como a Geração Distribuída depende de aspectos geográficos, a disciplina de Geografia pode abordar o tema de diferentes formas, tal como na dependência do clima pelas energias solar fotovoltaica e eólica. Na Biologia, os ciclos biogeoquímicos podem ser explorados a partir das tecnologias e também da poluição por elas produzidas. A energia de biomassa pode também fazer parte do estudo desta matéria. Na Química, as células a combustível são um prato cheio para estudos. Estes são alguns exemplos, mas são inúmeras as possibilidades, todas dependendo apenas da criatividade e imaginação dos professores. Similarmente ao que foi discutido sobre a infância, neste nível é primordial a abordagem sobre a segurança. Os outros pontos também podem ser considerados aqui, mas elevados à maior aptidão cognitiva dos adolescentes.

Nas universidades, principalmente no nível de Graduação nos cursos de Engenharia Elétrica e correlatos, é importantíssima uma adequação com disciplinas que apresentem a Geração Distribuída e as energias renováveis. A dificuldade dos cursos será aumentada inevitavelmente porque esta tecnologia aborda muitos temas que exigem conhecimentos variados e em grande quantidade. Independente disso, é imprescindível demandar que os estudantes aprendam o máximo que puderem sobre o assunto, visto que, a cada dia que passa, a sociedade exigirá mais especialistas da área. Outra tarefa dos professores é modificar as disciplinas já existentes agregando a Geração Distribuída. Isto porque ainda tem se apresentado várias matérias dos cursos como se o sistema elétrico continuasse como era antes. Tudo isso exigirá muitos esforços por parte de toda a academia, mas é preciso trabalhar para se antecipar às enormes transformações que virão conforme este trabalho tentou mostrar. Por fim, abordagens interdisciplinares, com um sentido mais amplo, devem ser buscadas. Como também foi demonstrado neste texto, a Geração Distribuída e, na verdade, qualquer tecnologia

é muito mais que um mero equipamento de produção e trabalho. A tecnologia perpassa todos os planos da sociedade e do meio ambiente. Portanto, além da compreensão da matemática, da física, da química e das ciências naturais em geral por detrás de um aparato tecnológico, o aluno deve estar ciente de suas outras dimensões, relacionando os dispositivos às questões das ciências sociais e humanas. Sem estudos que tratem desta forma a tecnologia, todas as pessoas poderão sofrer as consequências negativas do progresso.

A Educação, todavia, não está presa ao interior dos muros das escolas e das universidades. Ela perpassa todos os espaços da sociedade. Sendo assim, os conhecimentos sobre Geração Distribuída devem ultrapassar as barreiras das instituições de ensino formal para poderem alcançar toda a população. Já que ela fará parte da vida de todas as pessoas, todas elas deverão ter informações sobre o tema. Novamente, a segurança deve estar dentro destes propósitos. Isto pode ser feito pelos governos e outros órgãos públicos, tais como agências reguladoras e concessionárias, através de informes publicitários e por projetos educacionais. Os indivíduos podem ter equipamentos de produção de energia elétrica dentro de suas residências e para usufruírem bem de seus aparelhos, eles devem ter acesso às informações. Não só isso, estas devem ser corretas. Uma vez que a geração de energia elétrica passa a ser um produto que todo cidadão pode adquirir de um grande mercado, ele não pode ser ludibriado pelas empresas com propagandas enganosas. Não só os proprietários, mas toda a sociedade também deve ter em mãos os elementos para saber qual tecnologia é melhor para todos em termos, por exemplo, de poluição em suas várias formas e de efeitos no sistema elétrico. Tudo isso, é claro, de uma forma fácil para a compreensão leiga.

4.3.7 – O Trabalho e a Geração Distribuída

Uma das grandes vantagens que tem se falado sobre a Geração Distribuída em relação à sociedade é que ela pode gerar muitos empregos. No entanto, seu mercado de trabalho funciona como qualquer outro, com benefícios e dificuldades. É preciso olhar um pouco mais fundo para entender como funciona e funcionará esta estrutura laboral. No que segue, todos os dados apresentados foram retirados do relatório anual de 2017 sobre energias renováveis e trabalhos da Agência Internacional para as Energias Renováveis (*International Renewable Energy Agency - IRENA*) [107], exceto quando apontado.

A criação de empregos para Geração Distribuída é inegável. Em 2016, o número de trabalhadores diretos e indiretos foi de cerca de 7,4 milhões, incluindo 3,095 milhões para energia solar fotovoltaica, 2,78 milhões para energia de biomassa, 1,155 milhões para energia eólica, 211 mil para pequenas hidroelétricas, 182 mil para energia geotérmica e 23 mil para energia solar térmica concentrada [107]. Com o setor energético pulverizado, muitos postos de trabalhos podem ser abertos. Mais do que isso, eles podem seguir a diversidade da Geração Distribuída com várias áreas e carreiras para serem seguidas. As posições podem estar, por exemplo, na fabricação, na pesquisa, na instalação, na operação, na manutenção e no transporte.

Esta é uma parte positiva do emprego em relação à Geração Distribuída, mas é preciso pensar do outro lado. Como grande parcela desta tecnologia é renovável e está substituindo aquelas de combustíveis fósseis, há uma tendência crescente na diminuição da cadeia

produtiva e de toda a estrutura da geração por estas últimas fontes. Consequentemente, um número expressivo de pessoas está perdendo seus empregos nestes setores. Nos anos de 2015 e 2016, foram demitidas 440 mil pessoas na indústria do petróleo e do gás natural [107]. O lado bom das renováveis é que elas parecem criar mais empregos que as não-renováveis. Ainda assim, isto é problemático. Muitas das pessoas que foram cortadas de seus postos nos setores dos combustíveis fósseis não irão necessariamente para os trabalhos da Geração Distribuída. É provável que muitas delas também nunca tenham tido contato com estas novas tecnologias, não tendo o conhecimento necessário, e estejam acostumadas a trabalhar com as “tradicionais”.

Em contraste com os empregos dos combustíveis fósseis, outro benefício da Geração Distribuída sai de sua definição. Como suas tecnologias estão espalhadas geograficamente, os empregos que ela gerará estarão dispersos. A diversidade das fontes faz com que cada região use as mais apropriadas para o lugar específico. Então, trabalhos diferentes podem ser abertos em locais diversos. Anteriormente, com a “geração tradicional” havia muita restrição. É preciso buscar os combustíveis onde eles se encontram. Portanto, é necessário deslocar as pessoas para lugares muito restritos para trabalharem. Muitas vezes, estes locais são complicados de se viver normalmente, como é o caso da proximidade de minas, como acontece para o carvão, e de plataformas marítimas para a exploração de petróleo em alto-mar (*Offshore*). A Geração Distribuída, por sua vez, é fortemente instalada dentro das áreas urbanas e em qualquer uma delas. Na maior parte das vezes, portanto, o indivíduo nem precisará sair da cidade que mora para trabalhar.

Mais um benefício é oposto dos trabalhos da “geração tradicional”. As construções destes tipos de usinas são de um enorme porte e investimento. Isto cria um grande número de empregos, mas que podem durar somente no momento da construção. A Geração Distribuída, por sua vez, diminui drasticamente os trabalhos temporários, criando vários permanentes e mais previsíveis, tal como na operação e na manutenção. Mesmo na instalação, o período é mais prolongado, porque pode ser que exista demanda por muito tempo.

Como qualquer outro produto, existe a possibilidade de trocas internacionais. Isto pode reduzir as chances de criação de empregos, principalmente se os custos com trabalho forem muito mais baixos em outros países. Alguns postos estão obviamente isentos disso, como é o caso da instalação e da manutenção. Porém, outros como o de fabricação podem ser facilmente transferidos para locais menos custosos em força de trabalho. Além disso, não é só a transferência de empregos que impacta os serviços a nível internacional. As importações de produtos pode gerar desemprego localmente.

Outro empecilho para os trabalhos de Geração Distribuída é a especialização e a preparação. Em grande parte, é preciso um conhecimento técnico maior sobre as tecnologias. Esta pode ser uma grande barreira para se empregar as pessoas. Para ilustrar isso, um exemplo pode ser dado. Em um estudo recente [84], 552 empresas brasileiras de energia solar fotovoltaica foram consultadas e falando sobre a dificuldade de contratação de profissionais, 49,47% indicou que ela era razoável, 16,25% informou que tinha pouca dificuldade e 34,28% que tinha muita dificuldade. É preciso, portanto, capacitar os indivíduos para que seja mais fácil absorvê-los neste mercado. Neste mesmo caminho, o problema da informalidade também aparece. Pessoas que não são qualificadas podem passar a trabalhar com equipamentos que

são complexos. Os resultados podem ser instalações incorretas, mau funcionamento dos dispositivos e até mesmo a criação de perigo para as pessoas e animais.

Ainda podem ser apontados como itens relacionados ao trabalho da Geração Distribuída aqueles já bastante conhecidos de outros setores. Um deles é a automação. Ela tem tomado conta também do mercado de Geração Distribuída. As fábricas dos equipamentos estão sendo todas transformadas para máxima automatização. As pessoas poderão perder seus empregos para máquinas.

Outro são as condições de trabalho. Não basta ter emprego, é preciso que ele seja digno. Apesar de se ter trabalho, ele pode ser prejudicial para a pessoa e sendo um mercado relativamente novo, a aplicação das leis é essencial, assim como a busca por novas regulamentações que melhorem a vida do trabalhador neste setor. Para isso é preciso identificar todos os problemas que os empregados terão. Tendo várias empresas, será mais difícil encontrar culpados para as más condições de trabalho, mas é preciso e urgente fazê-lo.

Finalmente, pode ser notado que a ascensão de trabalhos de Geração Distribuída não tem sido constante como muitos previam. Ao contrário, em muitas situações tem havido queda deles. Lugaras que são exemplos no uso da Geração Distribuída com grande parcela de sua matriz energética têm demonstrado este fenômeno. Esta é a situação que passa a União Europeia, por exemplo. De 2011 a 2015 foram perdidos dois terços dos empregos do setor de energia solar fotovoltaica, o mesmo ocorrendo só na Alemanha. Na França, 8 mil pessoas foram demitidas em 2015 no setor de energias renováveis. Na Espanha, o ano de 2015 viu somente metade do número de empregos de 2008 no mesmo setor. Um exemplo de país fora da União Europeia que passa pelo mesmo impasse é o Japão, onde houve uma queda de empregos de 20% para sistemas fotovoltaicos de 2014 para 2016 [107]. Diversos fatores explicam este fenômeno, tais como diminuição de investimentos e instalações, automatização, crises, cortes em subsídios e aumento da produtividade. O que fica claro é que a efervescência inicial pode ser estagnada. Mesmo naqueles países com poucas dificuldades financeiras e altíssimo emprego da Geração Distribuída, o número de demissões pode aumentar dentro de um setor supostamente promissor.

O cenário, no entanto, parece ser mais alentador nos países menos desenvolvidos e em desenvolvimento. Neles, o número de empregos tem crescido, principalmente sob o preceito da eletrificação. Como a Geração Distribuída precisa de investimentos menores e mais esparsos com um capital inicial muito mais baixo, é mais fácil a criação de postos de trabalho. Neste caso, a Geração Distribuída tem enorme potencial para combater a pobreza.

Conclusão

A Geração Distribuída pode ser benéfica ou pode trazer mais problemas para o sistema elétrico, para a humanidade e para a natureza. No entanto, em todas as suas implicações ela parece pender mais para a primeira situação do que a segunda. Para que isto seja um fato e não só uma suposição, é preciso um grande empenho por parte de todos. A sociedade não pode continuar a cometer os mesmos erros do seu passado. A busca inconsequente e irrefletida pelo progresso trouxe mazelas em demasia que até hoje e possivelmente ainda por um longo tempo serão sentidas pelas pessoas e pelo meio ambiente.

Para que a Geração Distribuída seja aproveitada com toda sua capacidade positiva, alguns ensinamentos podem ser retirados deste trabalho. O primeiro deles é que não se pode erigir uma tecnologia para a humanidade, ainda mais do porte e da complexidade do sistema elétrico, lutando contra o que já foi estabelecido. É preciso trabalhar sobre aquilo que já existe, passando por fases de evolução gradativas que devem ser direcionadas para o bem-estar geral. Este avanço tecnológico não ocorre espontaneamente. Ao contrário, forças sociais, principalmente políticas e econômicas, são determinantes neste caminho. Se se quer o melhor para todos, todos devem participar nas escolhas tecnológicas. Porém, como os engenheiros e especialistas detêm o conhecimento técnico, são deles a maior responsabilidade para se traçar um rumo para as tecnologias que seja o melhor para a humanidade e para a natureza. Eles devem sempre estar conscientes das consequências que seus trabalhos terão para todos.

Em segundo lugar, de cunho mais técnico, a Geração Distribuída deve ser ainda bastante estudada para que ela seja introduzida efetivamente no sistema elétrico. Existem muitos desafios para serem superados, mas muitas soluções técnicas já são discutidas e usadas. Se elas forem aplicadas adequadamente, é possível que as pessoas se beneficiem da eletricidade com alta confiança, qualidade e baixo custo, abrindo novas possibilidades para o futuro. O planejamento é fundamental para que isso se concretize. Como foi visto, a Geração Distribuída deve ter funções além da produção de energia elétrica para serem suficientemente apropriadas para substituir a “geração tradicional”. Outro ponto importante é fazer as escolhas certas. Não basta usar uma tecnologia porque ela está em voga. A diversidade da Geração Distribuída exige discussões amplas para se determinar qual é a tecnologia mais eficiente, que polua e degrade menos o meio ambiente, que aproveite melhor dos potenciais geográfico e de localização de onde ela será instalada e que a população desfrute mais com preços baixos. A variabilidade e a intermitência são dois problemas várias vezes apontados como empecilhos para a adoção da Geração Distribuída. Existem, contudo, soluções que vão desde o uso de equipamentos que melhor condicionam o emprego de certas fontes até a simples observação e estratégia quanto ao clima, à geografia e à localização. A capacidade de hospedagem, por sua vez, mostrou que pode ser discutido quantitativamente a inserção da Geração Distribuída e que, compreendendo o nível de degradação de sua integração, é possível tomar decisões para que ela seja minorada ou mesmo totalmente anulada. Finalmente, mudanças radicais no sistema elétrico foram apresentadas que mostram um futuro promissor para a geração, a distribuição, a transmissão e o consumo de energia elétrica. As soluções tecnológicas abordadas parecem delinejar múltiplos benefícios para que a sociedade possa usufruir da eletricidade diminuindo seus impactos negativos, quaisquer que sejam.

Em terceiro lugar, o último capítulo mostrou como é indispensável uma reflexão ampla da Geração Distribuída. Ela tem impactos direto na sociedade e no meio ambiente e se estes não forem colocados para reflexão, todo o seu progresso será absolutamente em vão. Mesmo aqueles que não estão acostumados a ter esta visão mais ampla da tecnologia devem começar a tê-la. Isto porque a história demonstrou que o uso da tecnologia pode ser catastrófico se não se pensar no que ela pode causar. É possível que a humanidade se beneficie muito do uso da Geração Distribuída trazendo emprego, melhorando a saúde das pessoas, diminuindo a pobreza, etc. com um mínimo impacto na natureza. Todavia, isto só será possível com o empenho geral e colocando estas questões à frente das técnicas.

Para trabalhos futuros, é sugerido um aprofundamento em todos os tópicos discutidos neste estudo. Os sociais e ambientais mais do que os técnicos, visto que eles são pouco explorados. Todos os temas abordados podem servir como pontapé inicial para novos estudos. Sugerem-se também pesquisas específicas sobre cada tecnologia de Geração Distribuída, mas seguindo a metodologia holística empregada aqui. Por exemplo, a energia solar fotovoltaica ou a energia eólica poderiam ser estudadas levando em conta todos os seus impactos técnicos, mas também os sociais e ambientais. Em qualquer caso, mesmo para aqueles trabalhos que sejam estritamente técnicos, uma perspectiva ampla que considere as consequências na sociedade e no meio ambiente deve ser a regra, não a exceção.

Finalmente, duas últimas recomendações são dadas. A primeira é que para qualquer tecnologia, estudos interdisciplinares devem ser enfatizados, pois como foi colocado no primeiro capítulo a partir das ideias de Hughes, uma tecnologia muda a sociedade e é por ela transformada. Os engenheiros e especialistas devem estudar e refletir mais sobre temas sociais e ambientais. Da mesma forma, é de grande ajuda para toda a humanidade e a natureza a participação efetiva de pesquisadores de outras áreas que aparentemente não são correlatas, mas que são essenciais nos estudos das tecnologias, tais como os cientistas sociais. A segunda é que todos os trabalhos sejam feitos sempre sob reflexões críticas profundas, que levem em julgamento o objeto de estudo até suas últimas consequências. Por mais fantástico que pareça uma solução, a humanidade e a natureza não têm muito mais tempo para erros. Ambas já sofreram demais com o progresso inconsequente e inconsciente.

Referências

- [1] T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder. **Distributed generation: a Definition.** Electric Power Systems Research, vol. 57, 195–204, 2001.
- [2] T. Ackermann (ed.). **Wind Power in Power Systems.** Chichester: Wiley, 2005.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 486, de 17 de abril de 2012.** 2012. Disponível em: www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015.** 2015. Disponível em: www2.aneel.gov.br/cedo/ren2015687.pdf
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 1: Introdução – Revisão 9.** 2016 (Vigência).
- [6] A. Ahmed. **Eletrônica de Potência.** Tradução de Bazán Tecnologia e Linguística; Revisão Técnica de J. A. Martino. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.
- [7] S. M. Amin, B. F. Wollenberg. **Toward a Smart Grid: Power Delivery for the 21st Century.** IEEE Power and Energy Magazine, vol. 3, n. 5, 34-41, Setembro/Outubro 2005.
- [8] C. P. Baldé, V. Forti, V. Gray, R. Kuehr, P. Stegmann. **The Global E-waste Monitor 2017 – Executive Summary.** United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna, 2017.
- [9] P. P. Barker, R. W. de Mello. **Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems. I. Radial Distribution Systems.** IEEE Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 3, 1645–1656, Julho 2000.
- [10] R. B. Barsky, L. Kilian. **Oil and The Macroeconomy Since The 1970s.** Journal of Economic Perspectives, vol. 18, 115-134, 2004.
- [11] BBC News. **Riddle of 'Baghdad's Batteries',** 2003. Disponível em: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/2804257.stm>.
- [12] E. Becquerel. **Recherche sur les Effets de la Radiation Chimique de la Lumière Solaire, au Moyen des Courants Électriques.** Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, vol. 9, 145-149, 1839.
- [13] E. Becquerel. **Mémoire sur les Effets Électriques Produits sous l'Influence des Rayons Solaires.** Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, vol. 9, 561-567, 1839.
- [14] W. Benjamin. **Teses sobre o Conceito da História,** 1940. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3957253/mod_resource/content/1/Teses%20sobre%20%20conceito%20de%20hist%C3%83ria%20%281%29.pdf

- [15] A. Bertani, C. Bossi, F. Fornari, S. Massucco, S. Spelta, F. Tivegna. **A Microturbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operation.** IEEE PES Power Systems Conference and Exposition 2004, vol. 1, 360-365, 2004.
- [16] R. Bertani. **Geothermal Energy: An Overview on Resources and Potential.** Proceedings of the International Conference on National Development of Geothermal Energy Use, Eslováquia, 2009.
- [17] R. Bertani. **Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report.** Geothermics, vol. 60, 31-43, Março 2016.
- [18] F. Blaabjerg, Z. Chen, S. B. Kjaer. **Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems.** IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, n. 5, 1184-1194, Setembro 2004.
- [19] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V. Timbus. **Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, n. 5, 1398-1409, Outubro 2006.
- [20] F. Blaabjerg, F. Iov, T. Kerekes, R. Teodorescu, K. Ma. **Power Electronics – Key Technology for Renewable Energy Systems.** 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC) 2011, Tehran, 445-466, Fevereiro 2011.
- [21] F. Blaabjerg, M. Liserre, K. Ma. **Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems.** IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, n. 2, 708–719, Março/Abril 2012.
- [22] T. J. Blalock. **The Rotary Era, Part 1: Early ac-to-dc Power Conversion [History].** IEEE Power and Energy Magazine, vol. 11, n. 5, 82-92, Setembro/Outubro 2013.
- [23] T. J. Blalock. **The Rotary Era, Part 2: ac-to-dc Power Conversion, Continued [History].** IEEE Power and Energy Magazine, vol. 11, n. 6, 96-105, Novembro/Dezembro 2013.
- [24] M. H. J. Bollen, F. Hassan. **Integration of Distributed Generation in the Power System.** Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [25] M. H. J. Bollen, Y. Yang, F. Hassan. **Integration of Distributed Generation in the Power System – A Power Quality Approach.** 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Wollongong, NSW, Australia, Setembro/Outubro 2008.
- [26] M. H. J. Bollen. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions.** Piscataway: IEEE Press, 2000.
- [27] M. H. J. Bollen, P. F. Ribeiro, I. Y. H. Gu, C. A. Duque. **Trends, Challenges and Opportunities in Power Quality Research.** European Transactions on Electrical Power, vol. 20, 3-18, 2010.
- [28] M. H. J. Bollen, M. Häger. **Power Quality: Interactions Between Distributed Energy Resources, the Grid, and Other Customers.** Electrical Power Quality and Utilisation, Magazine, vol. 1, n. 1, 51-61, 2005.

- [29] M. H. J. Bollen, S. K. Rönnberg. **Hosting Capacity of the Power Grid for Renewable Electricity Production and New Large Consumption Equipment.** Energies, vol. 10, n. 9, 2017.
- [30] M. H. J. Bollen, Y. Yang, F. Hassan. **Integration of Distributed Generation in the Power System – A Power Quality Approach.** *13th International Conference on Harmonics and Quality of Power* (ICHQP), Wollongong, 1-8, 2008.
- [31] B. K. Bose. **Energy, Environment, and Advances in Power Electronics.** IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, n. 4, 688-701, Julho 2000.
- [32] B. Bowers. **A History of Electric Light and Power.** Peter Peregrinus Ltd., 1982.
- [33] G. Boyle (ed.). **Renewable Energy: Power for a Sustainable Future.** 3 ed. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- [34] B. Braga et al. **Introdução à Engenharia Ambiental.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [35] Brasil. **Decreto nº 5163, de 30 de Julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.** Brasília, DF, 30 Julho 2004. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2004/decreto/D5163compilado.htm
- [36] G. Carr (The Economist). **Sunny Uplands – Alternative Energy will no Longer be Alternative, 2012.** Disponível em: <https://www.economist.com/news/21566414-alternative-energy-will-no-longer-be-alternative-sunny-uplands>
- [37] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galván, R. C. Portillo Guisado, M. A. M. Prats, J. I. León, N. Moreno-Alfonso. **Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, n. 4, 1002-1016, Agosto de 2006.
- [38] E. Chen. **History, Chapter 2.** em G. Hoogers (ed.). **Fuel Cell Technology Handbook.** CRC Press, 2003.
- [39] Z. Chen, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg. **A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines.** IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, n. 8, 1859-1875, Agosto 2009.
- [40] K. W. E. Cheng, D. Sutanto, Y. L. Ho, K. K. Law. **Exploring the Power Conditioning System for Fuel Cell.** 2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.01CH37230), vol. 4, Vancouver, 2197-2202, 2001.
- [41] Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). **Adoção do Acordo de Paris sobre o Clima,** 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>.
- [42] Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRÉ). **Impact of Increasing Contribution of Dispersed Generation on the Power System – Final Report.** CIGRÉ Working Group n. 37.23, Fevereiro 1999.

- [43] P. A. David, J. A. Bunn. **The Economics of Gateway Technologies and Network Evolution: Lessons from Electricity Supply History.** *Information Economics and Policy*, vol. 3, 165-202, 1988.
- [44] J. Deuse, K. Karoui, H. Crisciu, L. Gertmar, O. Samuelsson, P. Karlsson, V. Chuvychin, L. Ribickis, M. H. J. Bollen. **Interactions of Dispersed Energy Resources with Power System in Normal and Emergency Conditions.** *Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRÉ)*, Paris, 1-12, 2006.
- [45] J. Deuse, D. Benintendi, P. J. Agrell, P. Bogetoft. **Power System and Market Integration of DER, the EU-DEEP Approach.** 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Turin, 2005.
- [46] Deutsche Welle (DW). **German Nuclear Energy History: A Timeline**, 2011. Disponível em: <http://www.dw.com/en/german-nuclear-energy-history-a-timeline/a-15117199>.
- [47] Deutsche Welle (DW). **Mudanças climáticas podem acabar com hidrelétricas?**, 2018. Disponível em: <http://www.dw.com/pt-br/mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas-podem-acabar-com-hidrel%C3%A9tricas/a-42806887>
- [48] W.D. Devine. **From Shafts to Wires: Historical Perspectives on Electrification.** *Journal of Economic History*, vol. XLIII, n. 2, 347-372, Junho 1983.
- [49] O. de F. Di Cropani. **O Mundo da Eletricidade.** São Paulo: Eletricidade de São Paulo (Eletropaulo), 1987.
- [50] P. Djapic, C. Ramsay, D. Pudjianto, G. Strbac, J. Mutale, N. Jenkins, R. Allan. **Taking an Active Approach.** *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, n. 4, 68-77, Julho/Agosto 2007.
- [51] K. H. Dreborg. **Essence of Backcasting.** *Futures*, vol. 28, n. 9, 813–828, 1996.
- [52] R. C. Dugan, T. E. McDermott, G. J. Ball. **Planning for Distributed Generation.** *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, n. 2, 80-88, Abril/Março 2001.
- [53] R. C. Dugan, T. E. McDermott. **Operating Conflicts for Distributed Generation on Distribution Systems.** *Rural Electric Power Conference*, Abril 2001.
- [54] R. C. Dugan, T. E. McDermott. **Distributed generation.** *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 8, n. 2, 19–25, Agosto 2002.
- [55] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santosa, H. W. Beaty. **Electrical Power Systems Quality.** 2 ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2003.
- [56] The Economist. **Pricing Sunshine – The Rise of Solar Energy, 2012.** Disponível em: <https://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2012/12/daily-chart-19>
- [57] U. S. Energy Information Administration (EIA). **Table 7.2 Electricity Net Generation: Total (All Sectors) – Nuclear Electric Power, 2018.** Disponível em: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/browser/?tbl=T07.02A#/?f=A&start=1949&end=2016&charted=5>.

- [58] U. S. Energy Information Administration (EIA). **Figure 9.1 Nuclear Generating Units**, 2018. Disponível em: https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/sec9_2.pdf.
- [59] O.I. Elgerd. **Electric Energy Systems Theory: An Introduction**. McGraw-Hill Book Company, 1973.
- [60] W. El-Khattam, M. Salama. **Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits**. Electric Power Systems Research, vol. 71, n. 2, 119–128, 2004.
- [61] O. Ellabban, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg. **Renewable Energy Resources: Current Status, Future Prospects and their Enabling Technology**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 39, 748-764, 2014.
- [62] Energy Networks Association (ENA). **Engineering Recommendation P2/6 - Security of Supply**. Julho 2006.
- [63] Energy Networks Association (ENA). **Distributed Generation Connection Guide: A Guide for Connecting Generation that falls under G59/3 to the Distribution Network (typically by Developers, Industry, Commercial or Farmers)**. Junho 2017. Disponível em: <http://www.energynetworks.org/assets/files/electricity/engineering/distributed%20generation/DG%20Connection%20Guides/June%202017/DGCG%20G59%20full%20June%202017.pdf>.
- [64] Energinet. **Environmental Report 2017**. Disponível em: <https://en.energinet.dk/About-our-reports/Reports/Environmental-Report-2017>
- [65] The European Network of Transmission System Operators. **European Electricity Grid Initiative Roadmap and Implementation Plan**. ENTSO-E, Bruxelas, 2010.
- [66] Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Eficiência Energética e Geração Distribuída para os Próximos 10 Anos (2015-2024)**. Abril 2016. Disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-264/DEA%2012-16%20-%20Ef%20energetica%202015-2024\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-264/DEA%2012-16%20-%20Ef%20energetica%202015-2024[1].pdf).
- [67] Electric Research Council Task Force. **Report of the R&D Goals Task Force To the Electric Research Council - Electric Utilities Industry Research and Development Goals Through the Year 2000**. ERC Pub, n. 1-71, Junho 1971.
- [68] European Regulators Group for Electricity and Gas. **Position Paper on Smart Grids**. European Regulators Group for Electricity and Gas, Bruxelas, 2010.
- [69] N. Etherden. **Increasing the hosting capacity of distributed energy resources using storage and communication**. Tese de Doutorado, 2014.
- [70] N. Etherden, M. Bollen, S. Ackeby, O. Lennerhag, **The Transparent Hosting-Capacity Approach – Overview, Applications and Developments**. International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Lyon, 1-5, 2015.
- [71] N. Etherden, M. H. J. Bollen. **Increasing the hosting capacity of distribution networks by curtailment of renewable energy resources**. IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, 1-7, 2011.

- [72] J. L. Everett, A. D. Bertolett, G. H. Haak. **Power Generation - Some Tasks and Goals.** IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-8, n. 4, 498-504, Julho 1972.
- [73] M. Faraday. **Experimental Researches in Electricity.** em: Great of Books of Westernd World, vol. 45. Chicago: Encyclopedia Britannica, 1952.
- [74] H. Farhangi. **The Path of the Smart Grid.** IEEE Power and Energy Magazine, vol. 8, n. 1, 18-28, Janeiro/Fevereiro 2010.
- [75] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans. **Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência.** Tradução de A. Laschuck. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [76] J. D. Flynn. **Fuel Cells and their Effects on Utilities.** Electrical Engineering, vol. 80, n. 11, 828-831, Novembro 1961.
- [77] Fraunhofer ISE. **Annual Electricity Generation in Germany in 2017.** Disponível em: <https://www.energy-charts.de/energy.htm?source=all-sources&period=annual&year=2017> Acesso em: 16 de março de 2018.
- [78] H. E. Frech, W. C. Lee. **The Welfare Cost of Rationing-By-Queuing Across Markets: Theory and Estimates from the U.S. Gasoline Crises.** Quarterly Journal of Economics, vol. 102, 97-108, 1987.
- [79] W. Freitas, J. C. M. Vieira, A. Morelato, L. C. P. da Silva, V. F. da Costa, F. A. B. Lemos. **Comparative Analysis Between Synchronous and Induction Machines for Distributed Generation Applications.** IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, n. 1, 301-311, Fevereiro 2006.
- [80] G. D. Friedlander. **A Comeback for Reddy Kilowatt?** IEEE Spectrum, vol. 9, n. 4, 44-50, Abril 1972.
- [81] E. Gehain, J. Deuse. **EU-DEEP: a European Integrated Project with a Different R&D Approach to the Integration of Distributed Energy Resources and Renewable Energy Sources in Markets and Energy grids.** 2005 IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, 1-5, 2005.
- [82] A. Giddens. **A Política da Mudança Climática.** Tradução de V. Ribeiro; Revisão Técnica de A. Piani; Apresentação a Edição Brasileira de S. B. Vianna. Rio de Janeiro: Zahar, 2010.
- [83] W. Gilbert. **On the Loadstone and Magnetic Bodies.** em: Great of Books of Westernd World, vol. 28. Chicago: Encyclopedia Britannica, 1952 (Trad. de P. Fleury Mottelay).
- [84] Greener. **Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída – 1º Semestre/2018,** 2018. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-1o-semestre2018/>.
- [85] D. P. Gregory, J. B. Pangborn. **Hydrogen Energy.** Annual Review of Energy, vol. 1, 279-310, Novembro 1976.

- [86] J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, T. Zhelev, K. Hemmes, E. Monmasson, S. Jemeï, M. P. Comech, R. Granadino, J. I. Frau. **Distributed Generation: Toward a New Energy Paradigm**. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 4, n. 1, 52–64, Março 2010.
- [87] G. C. Guimarães, J. C. de Oliveira. **Máquinas Síncronas e Estabilidade**. Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos. 2017. Notas de Aula. FEELT - Universidade Federal de Uberlândia.
- [88] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou. **Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, 1513-1522, 2009.
- [89] J. D. Hamilton. **Historical Oil Shocks**. National Bureau of Economic Research (NBER) Working Paper 16790, Fevereiro 2011. Disponível em: <http://www.nber.org/papers/w16790.pdf>.
- [90] G. Hardin. **The Tragedy of the Commons**. Science, vol. 162, 1243-1248, Dezembro 1968.
- [91] D. W. Hart. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos**. Tradução de R. Abdo; Revisão Técnica de A. Pertence Jr. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- [92] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, C. Marnay. **Microgrids**. IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, n. 4, 78-94, Julho/Agosto 2007.
- [93] P. Hawken, A. Lovins, L. H. Lovins. **Capitalismo Natural: Criando a Próxima Revolução Industrial**. Tradução de L. A. Araújo, M. L. Felizardo. São Paulo: Cultrix, 2000.
- [94] C. Hering. **Notes on the Frankfort Electrical Exhibition**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. VIII, n 1, 549-560, Janeiro 1891.
- [95] J. A. Hijiya. **The Gita of Robert Oppenheimer**. Proceedings of the American Philosophical Society, vol. 144, n. 2, 123-67, 2000.
- [96] R. A. Hinrichs, M. Kleinbach , L. B. dos Reis. **Energia e Meio Ambiente**. 5 trad. da ed. norte-americana. Tradução Técnica de L. B. dos Reis (4 e 5 ed.), F. M. Vichi (3 ed.), L. F. de Mello (3 ed.). São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- [97] T. P. Hughes. **Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930**. Baltimore: John Hopkins University Press, 1983.
- [98] T. P. Hughes. **The Evolution of Large Technological Systems**. em: W. E. Bijker, T. P. Hughes, T. Pinch (ed.). **The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology**. Cambridge: The MIT Press, 51-82, 1988.
- [99] International Energy Agency (IEA). **Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets**. Paris, 2002.
- [100] International Energy Agency (IEA). **World Energy Outlook 2017 – Executive Summary**, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/Textbase/npsum/weo2017SUM.pdf>.

- [101] International Energy Agency (IEA). **Renewable Information 2017: Overview**, 2017. Disponível em: <https://webstore.iea.org/renewables-information-2017-overview>.
- [102] Commission Électrotechnique Internationale (IEC). **Electropedia: Distributed Generation (IEV ref.: 617-04-09)**. 2009. Disponível em: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=617-04-09>.
- [103] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). **IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems** em IEEE Std 1547-2003. 1-28, Julho 2003.
- [104] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Schröder S., T. Bruckner, L. Fulton et al. **2014: Annex III: Technology-Specific Cost and Performance Parameters**. in **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- [105] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental on Climate Change**. Time núcleo de escrita – R. K. Pachauri, L. A. Meyer (eds.), IPCC, Genebra, Suíça, 2014. Disponível em: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.
- [106] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Bruckner T., I. A. Bashmakov, Y. Mulugetta, H. Chum, A. de la Vega Navarro, J. Edmonds, A. Faaij, B. Fungtammasan, A. Garg, E. Hertwich, D. Honnery, D. Infield, M. Kainuma, S. Khennas, S. Kim, H. B. Nimri, K. Riahi, N. Strachan, R. Wiser, and X. Zhang. **7: Energy Systems em Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schröder, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, Estados Unidos: Cambridge University Press, 2014.
- [107] International Renewable Energy Agency (IRENA). **Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2017**, 2017. Disponível em: http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/May/IRENA_RE_Jobs_Annual_Review_2017.pdf.
- [108] International Renewable Energy Agency (IRENA). **Renewable Energy: A Key Climate Solution**, 2017. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Nov/IRENA_A_key_climate_solution_2017.pdf?la=en&hash=A9561C1518629886361D12EFA11A051E004C5C98.
- [109] N. Jenkins, J. Ekanayake, G. Strbac. **Distributed Generation**. Londres: IET, 2010.
- [110] W. T. Jewell, R. Ramakumar. **The History of Utility-Interactive Photovoltaic Generation**. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 3, n. 3, 583-588, Setembro 1988.

- [111] N. Kagan, C. C. B. de Oliveira, E. J. Robba. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** 2 ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- [112] A. Keane, L. F. Ochoa, C. L. T. Borges, G. W. Ault, A. D. A. Rodriguez, R. A. F. Currie, F. Pilo, C. Dent, G. P. Harrison. **State-of-the-art Techniques and Challenges Ahead for Distributed Generation Planning and Optimization.** IEEE Transactions Power Systems, vol. 28, n. 2, 1493–1501, 2013.
- [113] T. Kerekes, R. Teodorescu, U. Borup. **Transformerless Photovoltaic Inverters Connected to the Grid.** APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1733-1737, Anaheim, 2007.
- [114] D. A. Khaburi, A. Nazempour. **Design and Simulation of a PWM Rectifier Connected to a PM Generator of Micro Turbine Unit.** Scientia Iranica, vol. 19, n. 3, 820-828, 2012.
- [115] F. Kininger. **Photovoltaic Systems Technology.** 2003. Universität Kassel, Kassel, Alemania.
- [116] A. Kirubakaran, S. Jain, R. K. Nema. **A Review on Fuel Cell Technologies and Power Electronic Interface.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, 2430-2440, 2009.
- [117] S. Kjaer, J. K. Pedersen, F. Blaabjerg. **A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules.** IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, n. 5, 1292-1306, Setembro/Outubro 2005.
- [118] G. Klingenberg. **Electricity Supply of Large Cities.** Journal of the Institution of Electrical Engineers, vol. 52, n. 225, 123-141, Janeiro 1914.
- [119] V. Knyazkin, T. Ackermann. **Interaction Between the Distributed Generation and the Distribution Network: Operation, Control and Stability Aspects.** International Conference on Electric Distribution Systems (CIRED), Barcelona, Maio 2003.
- [120] B. Kroposki, C. Pink, R. DeBlasio, H. Thomas, M. Simões, P. K. Sen. **Benefits of Power Electronics Interfaces for Distributed Energy Systems.** IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, n. 3, 901-908, Setembro 2010.
- [121] A. Kusko. **A Prediction of Power System Development: 1968-2030.** IEEE Spectrum, 75-80, Abril 1968.
- [122] B. G. Lamme. **The Technical Story of the Frequencies.** Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. XXXVII, n. 1, 65-89, Janeiro 1918.
- [123] P. J. Landrigan, R. Fuller, N. J. R. Acosta et al. **The Lancet Commission on Pollution and Health – Executive Summary.** Lancet, vol. 391, 462–464, Outubro 2017.
- [124] R. Lasseter. **Dynamic Models for Micro-Turbines and Fuel Cells.** 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262), Vancouver, vol. 2, 761-766, 2001.
- [125] R. H. Lasseter. **MicroGrids.** 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol.1, 305-308, 2002.

- [126] R. H. Lasseter, P. Paigi. **Microgrid: A Conceptual Solution.** 2004 IEEE 35 Annual Power Electronics Specialists Conference, vol. 6, 4285-4290, 2004.
- [127] M. Lévy-Leboyer. **The French Electrical Power System: An Inter-country Comparison.** em: R. Mayntz, T. P. Hughes (eds.). **The Development of Large Technical Systems.** Frankfurt am Main: Campus Verlag; Boulder: Westview Press, 245-262, 1988.
- [128] D. Lew, G. Brinkman. **The Western Wind and Solar Integration Study Phase 2: Executive Summary**, 2013. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58798.pdf>.
- [129] J. A. P. Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins. **Integrating Distributed Generation into Electric Power Systems: A Review of Drivers, Challenges and Opportunities.** Electric Power Systems Research, vol. 77, n. 9, 1189-1203, Julho 2007.
- [130] W. J. Lueckel, L.G. Eklund, S.H. Law. **Fuel Cells for Dispersed Power Generation.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-92, n. 1, 230-236, Janeiro 1973.
- [131] MacroTrends. **Crude Oil Prices - 70 Year Historical Chart**, 2017. Disponível em: <http://www.macrotrends.net/1369/crude-oil-price-history-chart>.
- [132] A. Mallevre. **L'Histoire de l'Énergie Nucléaire en France de 1895 à nos Jours.** ARCEA Diffusion - L'écho du Grand Rue, n. 133, 10-29, Dezembro 2006. Disponível em: <http://arcea-dif.fr/bulletins/133/energie.pdf>.
- [133] N. G. Mankiw. **Introdução à Economia.** 6 trad. da ed. norte-americana. Tradução de A. V. Hasting, E. P. e Lima, Ez2 Translate; Revisão Técnica de M. J. N. Pinto. São Paulo: Cengage Learning, 2015.
- [134] K. Marx. **O 18 Brumário de Luis Bonaparte.** Coleção Os Pensadores. Tradução de L. Konder. São Paulo: Abril Cultural, 1978.
- [135] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. W. Behrens III. **The Limits to Growth.** Nova Iorque: Universe Books, 1972.
- [136] National Renewable Energy Laboratory (NREL). **Measurement and Instrumentation Data Center (MIDC).** Disponível em: <https://midcdmz.nrel.gov/>.
- [137] Measurement and Instrumentation Data Center (MIDC) - A. Andreas, S. Wilcox. **Solar Technology Acceleration Center (SolarTAC); Aurora, Colorado (Data); NREL Report No. DA-5500-56491.** 2011. <http://dx.doi.org/10.5439/1052224>. Disponível em: <https://midcdmz.nrel.gov/apps/go2url.pl?site=STAC>.
- [138] Measurement and Instrumentation Data Center (MIDC) - C. Maxey, A. Andreas. **Oak Ridge National Laboratory (ORNL); Rotating Shadowband Radiometer (RSR); Oak Ridge, Tennessee (Data); NREL Report No. DA-5500-56512.** 2007. <http://dx.doi.org/10.5439/1052553>. Disponível em: <https://midcdmz.nrel.gov/apps/go2url.pl?site=ORNL>.
- [139] Measurement and Instrumentation Data Center (MIDC) - J. Ramos, A. Andreas. **University of Texas Panamerican (UTPA); Solar Radiation Lab (SRL); Edinburg, Texas**

(Data); NREL Report No. DA-5500-56514. 2011. <http://dx.doi.org/10.5439/1052555>. Disponível em: <https://midcdmz.nrel.gov/apps/go2url.pl?site=UTPASRL>.

[140] Measurement and Instrumentation Data Center (MIDC) - A. Andreas, T. Stoffel. **University of Nevada (UNLV): Las Vegas, Nevada (Data); NREL Report No. DA-5500-56509.** 2006. <http://dx.doi.org/10.5439/1052548>. Disponível em: <https://midcdmz.nrel.gov/apps/go2url.pl?site=UNLV>.

[141] MIT Energy Initiative (MITEI). **The Future of the Electric Grid.** 2011. Disponível em: <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2011/12/MITEI-The-Future-of-the-Electric-Grid.pdf>.

[142] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, D. Morton. **Challenges in Integrating Distributed Energy Storage Systems into Future Smart Grid.** 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 1627-1632, 2008.

[143] C. J. Mozina. **The Impact of Distributed Generation.** PAC World (Protection, Automation and Control Magazine), 20-25, 2008. Disponível em: https://www.pacw.org/fileadmin/doc/SummerIssue08/cover_story_summer08.pdf.

[144] S. Nababan, E. Muljadi, F. Blaabjerg. **An Overview of Power Topologies for Micro-Hydro Turbines.** 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Aalborg, 737-744, 2012.

[145] M. Nitsch. **O Programa de Biocombustíveis Proálcool no Contexto da Estratégia Energética Brasileira.** Revista de Economia Política, vol.11, n. 4, 123-138, Abril/Junho 1991.

[146] National Renewable Energy Laboratory (NREL). **Best Research-Cell Efficiencies, 2018.** Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>

[147] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **Submódulo 14.1, Administração dos Serviços Anciliares: Visão Geral.** 2017. Disponível em: <http://ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2014%2FSubm%C3%B3dulo%2014.1%2FSubm%C3%B3dulo%2014.1%202016.12.pdf>.

[148] Organização das Nações Unidas (ONU). **Transformando Nossa Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/148-pt-br.pdf>

[149] Organização das Nações Unidas (ONU). **International Migration Report 2017 – Highlights,** 2017. Disponível em: http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/publications/migrationreport/docs/MigrationReport2017_Highlights.pdf

[150] Orkustofnun. **Energy Statistics 2016.** Disponível em: <https://orkustofnun.is/orkustofnun/utgafa/orkutolur/>

[151] E. Ostrom, J. Burger, c. B. Field, R. B. Norgaard, D. Policansky. **Revisiting the Commons: Local Lessons, Global Challenges.** Science, vol. 284, 278-282, 1999.

[152] S. Pacala, R. Socolow. **Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies.** Science, vol. 305, 968-971, Agosto 2004.

- [153] M. R. Patel. **Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation.** 2 ed. Nova Iorque: CRC Press Book, 2006.
- [154] G. Paulillo, P. F. Ribeiro. **Aspectos da Qualidade da Energia Elétrica no Contexto das Redes Inteligentes.** O Setor Elétrico – Qualidade da Energia Elétrica, ed. 93, cap. X, 40-50, Outubro 2013. Disponível em: http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/11/ed-93_Fasciculo_Cap-X-Qualidade-de-energia.pdf.
- [155] M. Pehnt. **Dynamic Life Cycle Assessment (LCA) of Renewable Energy Technologies.** Renewable Energy, vol. 1, 55-71, 2006.
- [156] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, W. D'haeseleer, R. Belmans. **Distributed generation: Definition, Benefits and Issues.** Energy Policy, vol. 33, n. 6, 787–798, 2005.
- [157] G. A. Phillips, J. H. Vogt, J. W. Walton. **Inverters for Commercial Fuel Cell Power Generation.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 95, n. 3, 944-953, Maio 1976.
- [158] M. Pinto. **Fundamentos de Energia Eólica.** Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [159] Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). **Towards a Pollution-Free planet: Report of the Executive Director,** 2017. Disponível em: <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22251/k1708347e.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [160] M. H. Rashid. **Eletrônica de Potência: Dispositivos, Circuitos e Aplicações.** Tradução de L. Abramowicz; Revisão Técnica de C. M. de O. Stein. 4 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.
- [161] Red Eléctrica España. **The Spanish Electricity System. Preliminary Report 2017.** Disponível em: http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_electrico_2017_en.pdf
- [162] J. B. Robinson. **Squaring the Circle? Some Thoughts on the Idea of Sustainable Development.** Ecological Economics, vol. 48, 369-384, 2004.
- [163] J. B. Robinson. **Energy Backcasting: A Proposed Method of Policy Analysis.** Energy Policy, vol. 10, n. 4, 337–344, 1982
- [164] J. B. Robinson. **Futures Under Glass: A Recipe for People Who Hate to Predict.** Futures, vol. 22, n. 9, 820–843, 1990.
- [165] F. Rosillo-Calle, L. A. B. Cortez. **Towards ProAlcool II - A Review of the Brazilian Bioethanol Programme.** Biomass and Bioenergy, vol. 14, n. 2, 115-124, 1998.
- [166] E. F. Schumacher. **Small is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered – 25 Years Later...With Commentaries.** Vancouver: Hartley and Marks Publishers, 1999.
- [167] S. Shivashankar, S. Mekhilef, H. Mokhlis, M. Karimi. **Mitigatin Methods of Power Fluctuation of Photovoltaic (PV) Sources – A Review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, 1170-1184, 2016.

- [168] R. R. Singh, T. R. Chelliah, P. Agarwal. **Power Electronics in Hydro Electric Energy Systems – A Review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 32, 944-959, 2014.
- [169] W. D. Stevenson Jr. **Elements of Power System Analysis**. 2nd ed., McGraw-Hill, 1965.
- [170] P. Strange. **Early Electricity Supply in Britain: Chesterfield and Godalming**. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 126, n. 9, 863-868, Setembro 1979.
- [171] Blog Strom-Report. **Germany's Power Generation Mix 2017**. Disponível em: <https://1-stromvergleich.com/germanys-power-generation-mix-2017/> Acesso em: 16 de março de 2018.
- [172] R. M. Swanson. **A Vision for Crystalline Silicon Photovoltaics**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14, 443–453, 2006.
- [173] N. Tesla. **A New System of Alternate Current Motors and Transformers**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. V, n. 10, 308-327, Julho 1888.
- [174] União Europeia. **Diretiva 2009/72/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de Julho de 2009. Estabelece regras comuns para o mercado interno da eletricidade e que revoga a Diretiva 2003/54/CE**. 14 Agosto 2009. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0072&from=EN>.
- [175] United States of America. **Energy Policy Act 2005**. 109th Congress, H.R. 6 August 8, 2005. Disponível em: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/BILLS-109hr6enr/pdf/BILLS-109hr6enr.pdf>.
- [176] United States of America. **Public Utility Regulatory Policies Act of 1978 (PURPA)**. 95th Congress, H.R. 4018 November 9, 1978. Disponível em: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/STATUTE-92/pdf/STATUTE-92-Pg3117.pdf>.
- [177] U. S. Department of Energy (DOE), Office of Nuclear Energy, Science, and Technology. **The History of Nuclear Energy**. Washington: U. S. Department of Energy (DOE), 1993. Disponível em: https://energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy_0.pdf.
- [178] U. S. Department of Energy (DOE). **The Smart Grid: An Introduction**. Preparado para DOE por Litos Strategic Communication, 2008. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages%281%29.pdf.
- [179] M. G. Villalva, J. R. Gazoli. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2012.
- [180] K. Wallace, J. A. Oliver. **Variable-Speed Generation Controlled by Passive Elements**. Proc. of ICEM, 1554-1559, 1998.
- [181] M. Weber. **A Ética Protestante e o “Espírito” do Capitalismo**. Tradução de J. M. M. de Macedo; Revisão Técnica de A. F. Pierucci. São Paulo: Companhia das Letras, 2004.
- [182] World Bank Group. **Global Solar Atlas**. Disponível em: <http://www.globalsolaratlas.info/>.

- [183] World Bank Group. **Global Wind Atlas**. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/>.
- [184] World Commission on Environment and Development (WCED). **World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. 1987. Disponível em: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
- [185] World Nuclear Association. **Nuclear share figures, 2006-2016**, 2017. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/nuclear-generation-by-country.aspx>
- [186] World Weather Online. **Ludvika Monthly Climate Averages**. Disponível em: <https://www.worldweatheronline.com/ludvika-weather-averages/dalarnas-lan/se.aspx>.