

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



MODELAGEM MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO  
COMPUTACIONAL NO ATP DE UM SISTEMA SOLAR  
FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE DE BAIXA TENSÃO

ORIENTADO: GUILHERME HENRIQUE BERNARDES CUNHA  
ORIENTADOR: GERALDO CAIXETA GUIMARÃES (Ph.D.)

JULHO  
2013

---

GUILHERME HENRIQUE BERNARDES CUNHA

MODELAGEM MATEMÁTICA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL  
NO ATP DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO A  
REDE DE BAIXA TENSÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Uberlândia, para obtenção do título de Mestre em  
Ciências.

Uberlândia, 29 de Julho de 2013

Banca Examinadora

---

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães (Orientador) – Ph.D. UFU

---

Prof. José Roberto Camacho – Ph.D. UFU

---

Prof. Adélio José de Moraes – Dr. UFU

---

Prof. Fabrício Augusto Matheus Moura – Dr. UFTM

---

*“... uma perspectiva científica torna-se perigosa se ignora a dimensão religiosa e ética da vida, da mesma maneira que a religião se converte em limitada se rejeita a legítima contribuição da ciência em nossa compreensão do mundo”*  
*Papa Bento XIV, Londres, 17 de setembro de 2010*

---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente e sempre, pelas infinitas graças e bênçãos derramadas ao longo de toda minha vida.

Ao Professor Caixeta por sua orientação, conhecimento compartilhado, motivação proporcionada e amizade.

Aos meus pais Denise e Ernani e ao meu irmão Leandro, pelo incessante encorajamento e essencial suporte emocional.

Aos colegas Daniel Araújo Caixeta, Gislene Cristiane de Lima Ferreira, Antônio Manoel Batista da Silva e Adriano Carvalho Silva do Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos pelo companheirismo e troca de experiências.

Aos demais colegas dos núcleos de Qualidade de Energia Elétrica, Energias Alternativas, e, em especial ao Fernando Cardoso Melo do Núcleo de Eletrônica de Potência.

Aos professores Gustavo Malagoli Buiatti, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Ernane Antônio Alves Coelho e José Roberto Camacho pelos ensinamentos técnicos.

À secretária Cinara Fagundes P. Mattos da pós-graduação pelos esclarecimentos e prestatividade incomparável.

À Capes pelo apoio financeiro durante o período da pesquisa.

Aos demais amigos e funcionários da faculdade.

---

## RESUMO

### **Modelagem Matemática e Implementação Computacional no ATP de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado a Rede de Baixa Tensão**

O aumento da demanda de energia, a possibilidade de redução do suprimento de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente têm levado a várias pesquisas e desenvolvimento de fontes alternativas de energia que sejam limpas, renováveis e com menor impacto ambiental.

Dentre as diversas fontes alternativas de energia, a solar fotovoltaica tem sido considerada uma excelente opção já que é livre, abundante, limpa e distribuída. A energia solar incidente na superfície da Terra é estimada em cerca de dez mil vezes a energia total consumida no mundo.

Mesmo com todas as vantagens apresentadas pela geração de energia por meio do uso de painéis fotovoltaicos, a eficiência da conversão de energia é atualmente ainda baixa e com custo inicial de implantação elevado. Assim, é imprescindível o uso de técnicas para extração da máxima potência destes painéis para aumentar a eficiência de operação do sistema.

Este trabalho visa apresentar estudos de um sistema fotovoltaico completo conectado à rede elétrica de baixa tensão, compreendendo o painel solar, um conversor elevador de tensão, seu correspondente controle de rastreamento de máxima potência, o inversor de tensão com seu controle, a malha de captura de fase e, por meio de um indutor de acoplamento, a conexão de todo este sistema à rede elétrica.

Para a modelagem e simulações do sistema solar fotovoltaico foi utilizado o *Alternative Transients Program - ATP*. Inicialmente são apresentados resultados de simulação de partes constituintes do arranjo fotovoltaico e somente ao final, é realizado um estudo de caso com o sistema completo desenvolvido neste trabalho.

#### **Palavras-Chave:**

ATP, *boost*, eletrônica de potência, estudo computacional, fonte alternativa de energia, geração distribuída, MPPT, PLL, sistema fotovoltaico.

---

## ABSTRACT

# Mathematical Modeling and Computational Implementation in ATP of Photovoltaic Solar System Connected to Low Voltage Power Grid

The increased demand for energy, the possibility of reducing the supply of conventional fuels and growing concerns about the preservation of the environment have led to several researches and development of alternative energy sources which are clean, renewable and with minor environmental impact.

Among the various alternative energy sources, PV solar has been considered an excellent option as it is free, abundant, clean and distributed through all places. Solar energy incident on Earth's surface is estimated at about ten thousand times the total energy consumed in the world.

Even with all the advantages offered by the generation of energy through the use of photovoltaic panels, the initial cost of deployment is high and the efficiency of energy conversion is currently still low. Thus, it is essential to use techniques to extract the maximum power from these panels to increase the system operation efficiency.

This work aims to present studies of a complete photovoltaic solar system, connected to low voltage power grid including the solar panel, a step-up voltage converter, its corresponding Maximum Power Point Tracking (MPPT) control, the voltage inverter with its control, the phase locked loop, and by means of an inductive coupling, the connection of the whole system to the grid. For modeling and simulations of the solar photovoltaic system, it was used the Alternative Transients Program - ATP.

Initially it is presented simulation results with parts that comprises the PV array, and only at the end, it is performed a case study with the complete PV system developed in this work.

### Keywords:

Alternative source of energy, ATP, *boost*, computational study, distributed generation, MPPT, photovoltaic system, PLL, power electronics.

---

# SUMÁRIO

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| AGRADECIMENTOS .....                                      | IV  |
| RESUMO .....                                              | V   |
| ABSTRACT .....                                            | VI  |
| SUMÁRIO .....                                             | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                   | XI  |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                                   | XV  |
| CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....                               | 16  |
| 1.1. Contextualização .....                               | 16  |
| 1.2. Motivações .....                                     | 17  |
| 1.3. Objetivos .....                                      | 19  |
| 1.3.1. Objetivo Geral .....                               | 19  |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....                        | 19  |
| 1.4. Estrutura do Trabalho .....                          | 20  |
| CAPÍTULO 2 A ENERGIA SOLAR E O SISTEMA FOTOVOLTAICO ..... | 22  |
| 2.1 Considerações Iniciais .....                          | 22  |
| 2.2 Uma Breve História da Energia Solar .....             | 23  |
| 2.3 Heliotecnia .....                                     | 28  |
| 2.3.1 Espectro da Radiação Solar .....                    | 28  |
| 2.3.2 Massa de Ar .....                                   | 30  |
| 2.3.3 Componentes da Radiação Solar .....                 | 32  |
| 2.4 Dados do Sol .....                                    | 34  |
| 2.4.1 Constante Solar .....                               | 35  |
| 2.4.2 Movimento Terra-Sol .....                           | 35  |
| 2.5 Coordenadas Geográficas .....                         | 36  |

---

|        |                                                                             |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.1  | Declinação Solar.....                                                       | 38 |
| 2.5.2  | Ângulos de Inclinação e de Incidência .....                                 | 38 |
| 2.5.3  | Altura Solar .....                                                          | 40 |
| 2.5.4  | Ângulo de Azimute.....                                                      | 41 |
| 2.5.5  | Ângulos Característicos da Radiação Solar na Terra .....                    | 43 |
| 2.6    | Orientação dos Módulos Solares .....                                        | 43 |
| 2.6.1  | Projeções Estereográficas Solares .....                                     | 44 |
| 2.6.2  | Sombreamentos .....                                                         | 47 |
| 2.6.3  | Orientação e Inclinação de Superfícies Absororas .....                      | 48 |
| 2.6.4  | Captação Máxima de Energia Solar .....                                      | 48 |
| 2.7    | Instrumentos de Medição .....                                               | 49 |
| 2.7.1  | Piranômetro .....                                                           | 49 |
| 2.7.2  | Pireliômetro.....                                                           | 50 |
| 2.7.3  | Heliógrafo .....                                                            | 50 |
| 2.7.4  | Actinógrafo .....                                                           | 51 |
| 2.8    | Formas de Aproveitamento da Energia Solar.....                              | 52 |
| 2.9    | Aproveitamento Energético no Brasil.....                                    | 52 |
| 2.9.1  | Aproveitamento da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil .....                | 54 |
| 2.9.2  | Perspectivas Para o uso de Energias Renováveis no Brasil.....               | 55 |
| 2.10   | Sistemas Solares .....                                                      | 56 |
| 2.10.1 | Introdução .....                                                            | 56 |
| 2.10.2 | Aquecimento Solar .....                                                     | 57 |
| 2.10.3 | Conversão de Energia Solar em Elétrica .....                                | 59 |
| 2.10.4 | Tipos de Células Fotovoltaicas e suas Curvas Características.....           | 66 |
| 2.10.5 | Fatores que Afetam as Características Elétricas do Painel Fotovoltaico..... | 75 |
| 2.10.6 | Associação de Células Fotovoltaicas.....                                    | 77 |
| 2.10.7 | Sistemas Fotovoltaicos .....                                                | 80 |

---

|            |                                                    |     |
|------------|----------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTULO 3 | MODELAGEM MATEMÁTICA .....                         | 83  |
| 3.1        | Considerações Iniciais.....                        | 83  |
| 3.2        | Plataforma Computacional Utilizada.....            | 83  |
| 3.3        | Sistema Fotovoltaico em Estudo .....               | 84  |
| 3.4        | Condições Climáticas.....                          | 85  |
| 3.5        | O Painele Fotovoltaico.....                        | 86  |
| 3.5.1      | Teoria e Modelagem Matemática.....                 | 86  |
| 3.5.2      | Implementação Computacional.....                   | 89  |
| 3.6        | O Conversor Elevador de Tensão .....               | 89  |
| 3.6.1      | Teoria e Modelagem Matemática.....                 | 89  |
| 3.6.2      | Implementação Computacional.....                   | 92  |
| 3.7        | O Rastreamento do Ponto de Máxima Potência .....   | 93  |
| 3.7.1      | Teoria e Modelagem Matemática.....                 | 93  |
| 3.7.2      | Implementação Computacional.....                   | 95  |
| 3.8        | O Inversor.....                                    | 96  |
| 3.8.1      | Teoria e Modelagem Matemática.....                 | 97  |
| 3.8.2      | Implementação Computacional.....                   | 100 |
| 3.9        | Indutância de Acoplamento com a Rede Elétrica..... | 101 |
| 3.9.1      | Teoria e Modelagem Matemática.....                 | 101 |
| 3.9.2      | Implementação Computacional.....                   | 102 |
| 3.10       | O Controle da Corrente Injetada na Rede .....      | 102 |
| 3.10.1     | Teoria e Modelagem Matemática.....                 | 102 |
| 3.10.2     | Implementação Computacional.....                   | 103 |
| 3.11       | A Malha de Captura de Fase .....                   | 107 |
| 3.11.1     | Teoria e Modelagem Matemática.....                 | 107 |
| 3.11.2     | Implementação Computacional.....                   | 107 |
| 3.12       | A Rede.....                                        | 108 |

---

---

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTULO 4 ESTUDOS COMPUTACIONAIS.....                             | 109 |
| 4.1 Considerações Iniciais.....                                    | 109 |
| 4.2 Casos estudados .....                                          | 109 |
| 4.2.1 Caso 1: Painele Fotovoltaico operando isoladamente.....      | 109 |
| 4.2.2 Caso 2: Conversor Elevador de Tensão e MPPT .....            | 113 |
| 4.2.3 Caso 3: Malha de Captura de Fase .....                       | 116 |
| 4.2.4 Caso 4: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica ..... | 117 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....      | 124 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                   | 126 |

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Fornalha solar de Lavoisier (1774) .....                                | 23 |
| Figura 2.2 - Coletor parabólico de uma impressora à energia solar (Paris, 1882)..... | 24 |
| Figura 2.3 - Concentrador parabólico de John Ericsson (1870) .....                   | 25 |
| Figura 2.4 - Planta de bombeamento de águas do Nilo (Egito, 1913) .....              | 26 |
| Figura 2.5 - Planta Solar de Almería (PSA) .....                                     | 27 |
| Figura 2.6 - Frequências e comprimentos de onda da radiação .....                    | 29 |
| Figura 2.7 - Ondas do espectro da radiação solar .....                               | 30 |
| Figura 2.8 - Massa de ar atravessada pela radiação solar .....                       | 31 |
| Figura 2.9 - Comprimento de onda em função da irradiância solar .....                | 32 |
| Figura 2.10 - Tipos de radiação incidentes na Terra .....                            | 33 |
| Figura 2.11 - Distância da Terra ao Sol nos meses de Janeiro e Julho .....           | 34 |
| Figura 2.12 - Órbita descrita pela Terra ao redor do Sol .....                       | 35 |
| Figura 2.13 - Movimento Terra-Sol .....                                              | 36 |
| Figura 2.14 - Incidência dos raios solares nos hemisférios da Terra .....            | 37 |
| Figura 2.15 - Declinação Solar .....                                                 | 37 |
| Figura 2.16 - Declinação solar ao longo do ano .....                                 | 38 |
| Figura 2.17 - Ângulos de inclinação e de incidência .....                            | 39 |
| Figura 2.18 - Variação do ângulo de incidência .....                                 | 40 |
| Figura 2.19 - Variação do ângulo de incidência ao longo de um período do dia .....   | 40 |
| Figura 2.20 - Variação da altura do Sol .....                                        | 41 |
| Figura 2.21 - Altura e azimute do Sol .....                                          | 42 |
| Figura 2.22 - Ângulo de Azimute.....                                                 | 42 |
| Figura 2.23 - Ângulos característicos da radiação solar na Terra .....               | 43 |
| Figura 2.24 - Posição do módulo face à posição do Sol.....                           | 44 |
| Figura 2.25 - Carta solar em projeção estereográfica.....                            | 44 |
| Figura 2.26 - Exemplo de carta solar em projeção estereográfica .....                | 45 |
| Figura 2.27 - Carta solar em projeção estereográfica cilíndrica .....                | 46 |
| Figura 2.28 - Duração do dia, declinação e altura solar .....                        | 46 |
| Figura 2.29 - Exemplo de zonas de sombreamento .....                                 | 47 |
| Figura 2.30 - Carta solar de Lisboa em projeção estereográfica cilíndrica .....      | 47 |
| Figura 2.31 - Variação angular da absortância e reflectância.....                    | 48 |
| Figura 2.32 - Percurso realizado pela radiação na atmosfera .....                    | 48 |

---

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.33 - Energia total transportada pela radiação incidente.....                               | 49 |
| Figura 2.34 - Piranômetro.....                                                                      | 50 |
| Figura 2.35 - Pireliômetro.....                                                                     | 50 |
| Figura 2.36 - Heliógrafo.....                                                                       | 51 |
| Figura 2.37 - Actinógrafo.....                                                                      | 51 |
| Figura 2.38 - Organograma com os principais tipos de aproveitamento solar.....                      | 52 |
| Figura 2.39 - Ilustração de um sistema solar de aquecimento de água.....                            | 58 |
| Figura 2.40 - Efeito Peltier: o fluxo de corrente elétrica desloca o calor.....                     | 60 |
| Figura 2.41 - Capacidade mundial total solar fotovoltaica, 1995-2011.....                           | 62 |
| Figura 2.42 - Lista dos 10 países com maior capacidade operacional de plantas FV, 2011 ....         | 62 |
| Figura 2.43 - Estrutura típica de uma célula solar fotovoltaica.....                                | 63 |
| Figura 2.44 - Ligação entre átomos de silício (lacuna e elétron livre).....                         | 64 |
| Figura 2.45 - Célula solar com carga resistiva.....                                                 | 65 |
| Figura 2.46 - Célula solar fotovoltaica sob irradiação solar.....                                   | 65 |
| Figura 2.47 - Curvas características de um painel fotovoltaico.....                                 | 67 |
| Figura 2.48 - Eficiência das células solares.....                                                   | 68 |
| Figura 2.49 - Silício Cristalizado.....                                                             | 69 |
| Figura 2.50 - Célula de silício monocristalino.....                                                 | 70 |
| Figura 2.51 - Célula de silício policristalino.....                                                 | 71 |
| Figura 2.52 - Célula de silício amorfo.....                                                         | 73 |
| Figura 2.53 - Célula CIS/CIGS.....                                                                  | 74 |
| Figura 2.54 - Célula de Telureto de Cádmio - CdTe.....                                              | 75 |
| Figura 2.55 - Influência da irradiação na curva corrente <i>versus</i> tensão da célula solar.....  | 75 |
| Figura 2.56 - Influência da temperatura na curva corrente <i>versus</i> tensão da célula solar..... | 76 |
| Figura 2.57 - Influência da variação da resistência série.....                                      | 76 |
| Figura 2.58 - Influência da variação da resistência paralelo.....                                   | 77 |
| Figura 2.59 - Ilustração da célula, do módulo e do painel.....                                      | 77 |
| Figura 2.60 - Associação em série (a) e em paralelo (b) das células fotovoltaicas.....              | 78 |
| Figura 2.61 - Associação de células cristalinas.....                                                | 79 |
| Figura 2.62 - Associação de células – representação em símbolos.....                                | 79 |
| Figura 2.63 - Contribuição individual das células na curva do módulo.....                           | 79 |
| Figura 2.64 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada.....                  | 81 |
| Figura 2.65 - Exemplo de sistema híbrido.....                                                       | 82 |
| Figura 2.66 - Sistema conectado à rede.....                                                         | 82 |

---



---

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.12 - Perfil de irradiância solar .....                                     | 119 |
| Figura 4.13 - Corrente elétrica gerada pelo painel fotovoltaico .....               | 119 |
| Figura 4.14 - Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico .....               | 120 |
| Figura 4.15 - Tensão no link CC .....                                               | 121 |
| Figura 4.16 - Atracamento em fase gerado pelo PLL .....                             | 121 |
| Figura 4.17 - Corrente elétrica injetada na rede elétrica.....                      | 122 |
| Figura 4.18 - <i>Zoom</i> na corrente e seu sinal de referência gerado no PLL ..... | 123 |

---

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1 - Distribuição do espectro da radiação solar na atmosfera extraterrestre..... | 30  |
| Tabela 2.2 - Albedos de alguns tipos específicos de superfícies .....                    | 33  |
| Tabela 2.3 - Dados característicos do Sol.....                                           | 34  |
| Tabela 2.4 - Empreendimentos em operação no Brasil.....                                  | 53  |
| Tabela 2.5 - Matriz energética do Brasil.....                                            | 53  |
| Tabela 2.6 - Usinas fotovoltaicas em operação no Brasil.....                             | 55  |
| Tabela 2.7 - Parâmetros elétricos característicos de uma célula solar .....              | 66  |
| Tabela 4.1 - Especificações elétricas do módulo KD135SX-UPU em CPT .....                 | 111 |
| Tabela 4.2 - Valores referentes à corrente apresentada na Figura 4.17.....               | 122 |

# CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

## 1.1.Contextualização

A energia solar fotovoltaica no Brasil é utilizada principalmente em pequenos sistemas isolados. Estas instalações ocorrem em locais não atendidos pela rede básica, geralmente em regiões de difícil acesso ou onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica não é economicamente viável.

Estes sistemas autônomos são empregados, principalmente, em propriedades rurais, para iluminação de ambientes externos, bombeamento de água, centrais remotas de telecomunicações e sistemas de sinalização.

Por meio do programa “Luz para Todos”, criado pelo Governo Federal, muitas famílias brasileiras tiveram acesso à energia elétrica oriunda destes sistemas desconectados da rede elétrica.

Sistemas autônomos de energia solar fotovoltaica têm enorme importância para a geração de eletricidade em locais distantes das linhas de energia elétrica. No entanto, a expectativa é para que o uso de energia fotovoltaica - FV<sup>1</sup> seja concentrado nos sistemas conectados à rede elétrica. Isto devido ao seu imenso potencial para aplicação em micro e minissistemas de geração distribuída, e de forma menos acentuada nas usinas de grande geração de eletricidade.

O Brasil se encontra em estágio inicial com relação à utilização de energia fotovoltaica. E como possui um enorme potencial, o número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede vem aumentando e seu proveito deverá ter um salto extraordinário nos próximos anos, principalmente com a recente aprovação da Resolução Normativa - REN<sup>2</sup> 482/2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL<sup>3</sup>. Esta estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração aos sistemas de distribuição de energia elétrica em baixa tensão, alimentados por fontes renováveis de energia.

Outro importante passo para a inserção da energia fotovoltaica no país, que antecedeu a resolução supracitada, foi o projeto estratégico “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”, lançado pela ANEEL em 2011 em conjunto com empresas concessionárias de energia elétrica de todo o

---

<sup>1</sup> FV – Fotovoltaico(a)

<sup>2</sup> REN – Resolução Normativa.

<sup>3</sup> ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

---

país. O projeto teve como objetivo principal promover a criação de usinas experimentais de energia fotovoltaica interligadas ao sistema elétrico nacional, previsto para somar quase 25 MW<sup>4</sup> de potência instalada.

## **1.2.Motivações**

A energia solar fotovoltaica apresenta um excelente potencial de utilização no Brasil e compete com certa vantagem frente a outras fontes renováveis de energia elétrica. Como o país é privilegiado com elevadas taxas de irradiação solar em todas as regiões, a geração FV é mais regular no fornecimento de eletricidade do que a energia eólica, por exemplo, podendo assim ser empregada em toda extensão de seu território.

A quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende da taxa de irradiação solar do local onde é instalado. As regiões nordeste e centro-oeste são as que possuem o maior potencial de aproveitamento da energia solar. Entretanto, as demais regiões não ficam muito atrás e também possuem consideráveis taxas de irradiação solar. A região sul é a menos privilegiada, entretanto ainda possui taxas de irradiação melhores do que aquelas encontradas em países que empregam largamente a energia solar fotovoltaica.

Atualmente a Alemanha é o país que mais aproveita da disponibilidade da energia solar fotovoltaica, 32,411 GW<sup>5</sup>, equivalente a 31 % de toda a capacidade instalada no mundo.

A melhor taxa de irradiação solar na Alemanha é cerca de 3500 Wh/m<sup>2</sup> por dia, disponível apenas em uma pequena parte ao sul do seu território. A maior parte do território alemão não possui mais do que 3500 Wh/m<sup>2</sup> diários de irradiação solar. Para comparação, o Brasil apresenta taxas de irradiação solar entre 4500 Wh/m<sup>2</sup> e 6000 Wh/m<sup>2</sup>.

Dadas as dimensões territoriais e as elevadas taxas de irradiação solar brasileiras, é razoável estimar para o Brasil um potencial de geração fotovoltaica em torno de 200 GW de eletricidade a partir da luz do Sol, ou seja, quase o dobro de toda energia elétrica que produzimos hoje.

Com o imenso potencial fotovoltaico que o Brasil possui, o país poderá tornar-se um dos principais líderes mundiais no emprego de energias renováveis alternativas. Embora o país seja conhecido por possuir uma matriz de geração de eletricidade relativamente limpa e

---

<sup>4</sup> MW – Mega, representado pela letra ‘M’ é um prefixo equivalente a um milhão, utilizado como multiplicador de uma dada unidade de medida. Watt, representada pela letra ‘W’, é a unidade de medida representativa da potência elétrica ativa.

<sup>5</sup> GW – Giga, representado pela letra ‘G’ é um prefixo equivalente a um bilhão, utilizado como multiplicador de uma dada unidade de medida. Watt, representada pela letra ‘W’, é a unidade de medida representativa da potência elétrica ativa.

---

bastante renovável, esta situação não vai perdurar nos próximos anos sem o uso de novas fontes de energia.

A questão é que o Brasil é um país muito afortunado com diversos recursos energéticos naturais. E embora ainda não tenha explorado a metade de sua capacidade hidrológica, existe muito espaço para o crescimento da energia solar fotovoltaica no país. Mais do que uma fonte alternativa, a energia fotovoltaica é uma opção viável e promissora para complementar e ampliar a geração de eletricidade. Os sistemas FV podem gerar eletricidade em qualquer espaço onde for possível instalar um painel. Telhados e fachadas de prédios e residências poderão gerar eletricidade em áreas urbanas e usinas poderão ser construídas em áreas abertas de qualquer dimensão, próximas ou distantes dos centros de consumo. As condições climáticas e o espaço territorial do nosso país são extremamente favoráveis para a energia solar fotovoltaica.

Os sistemas FV conectados à rede, disseminados na forma de micro e miniusinas de eletricidade permitirão ampliar a oferta de energia elétrica e ao mesmo tempo contribuir para a manutenção da característica renovável de nossa matriz energética.

Quando instalado em uma região urbana e ligado diretamente à rede elétrica de Baixa Tensão - BT<sup>6</sup>, o sistema FV produz eletricidade a um custo muito competitivo e pode ser empregado para reduzir a conta de energia do consumidor. Os sistemas FV tornam-se ainda mais vantajosos se considerarmos a inflação do preço da energia elétrica. Uma residência ou empresa que instala um sistema deste em seu telhado fica imune aos aumentos de preços e garante seu abastecimento de eletricidade por pelo menos 25 anos, que é o tempo mínimo de vida útil de um sistema FV, e consegue pagar o investimento em poucos anos com a energia produzida.

Além do aumento da disponibilidade de eletricidade e dos benefícios ambientais do uso de uma fonte renovável, a inserção da energia FV no país vai impulsionar o desenvolvimento tecnológico, criar empregos e mover a economia nacional. A massificação da micro e da minigeração de eletricidade com sistemas FV conectados à rede vai criar empregos no desenvolvimento e na fabricação de painéis, inversores e acessórios, além de gerar enorme demanda de profissionais no setor de serviços de instalação, manutenção e treinamentos.

No lugar de grandes investimentos concentrados necessários para a construção de usinas convencionais de eletricidade, como as hidrelétricas, nucleares e termelétricas, a geração

---

<sup>6</sup> BT - Baixa Tensão

---

distribuída tem a possibilidade de pulverizar investimentos e recursos, contribuindo para a criação de milhares de empregos diretos e indiretos em todas as regiões do país.

### **1.3.Objetivos**

Este trabalho preza por um objetivo geral aliado a um conjunto de objetivos específicos, apresentados a seguir.

#### *1.3.1. Objetivo Geral*

O objetivo desta pesquisa de mestrado consiste em desenvolver uma ferramenta computacional adequada para a realização de estudos gerais envolvendo a conexão de sistemas de conversão de energia solar fotovoltaica à rede de energia elétrica. Pretende-se desta forma prover um recurso alternativo que auxilie as concessionárias e empresas do setor elétrico nos estudos e análises de comportamento do fluxo de energia e desempenho das linhas e equipamentos que compõem suas redes. Desta forma garantindo os padrões de segurança, continuidade e qualidade do suprimento energético aos seus consumidores.

#### *1.3.2. Objetivos Específicos*

- Descrever os principais marcos históricos e tecnologias empregadas relacionadas à utilização da energia solar desde sua origem até os dias atuais;
- Contextualizar e apresentar o máximo de conceitos possíveis referentes à utilização da energia solar fotovoltaica;
- Efetuar a modelagem matemática dos principais componentes de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica real, realizando, para tanto, a proposição e adaptação de modelos dos diversos módulos que o compõem, com destaque para os seguintes elementos: fonte primária (Sol), módulo fotovoltaico, conversor elevador de tensão (*boost*), controle do ponto de operação de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT), conversor de frequência (inversor) e seus controles, malha de captura de fase (PLL), indutor de acoplamento e o equivalente da rede elétrica;
- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional, utilizando técnicas de modelagem no domínio do tempo no ATP, para simulação e análise do comportamento e desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão;

- 
- Propõe-se realizar neste trabalho estudos investigativos e elucidativos, inicialmente, de partes constituintes do sistema de geração fotovoltaica, e em seguida, de todo o sistema conectado à rede elétrica. Os resultados obtidos serão validados pelas curvas disponibilizadas na folha de dados do fabricante escolhido e ratificará a potencialidade da ferramenta produzida.

#### **1.4.Estrutura do Trabalho**

O presente capítulo apresenta em sua introdução o estágio em que se encontra o Brasil e suas formas de utilização da energia solar fotovoltaica. Destaca-se os principais programas criados para incentivo desta fonte de energia e ainda o enorme potencial do país para geração de eletricidade, principalmente, por meio da geração distribuída. Em seguida, faz-se uma descrição acerca das motivações e objetivos pretendidos para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional aplicada à análise da conexão de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

No Capítulo 2 são descritas as formas indiretas e diretas da energia solar e salientados os efeitos para produção de energia elétrica a partir de semicondutores. Em seguida é apresentado um breve histórico da utilização da energia solar no mundo e expostos os principais conceitos relacionados à trajetória e a radiação solar. São mostrados dados relativos à matriz energética e aproveitamento solar fotovoltaico no Brasil, e ainda, as perspectivas para o uso da mesma no país. Por fim, são destacadas, desde as formas mais primitivas de utilização da energia solar, até chegar à solar fotovoltaica. É neste capítulo também que é relatado o efeito fotovoltaico e assim o princípio de funcionamento de uma célula solar, a associação das mesmas e suas curvas características.

No Capítulo 3 são exibidas a teoria e a modelagem matemática de todas as partes constituintes do sistema fotovoltaico. A seguir, é apresentado o *software* utilizado na implementação computacional e também nas diversas simulações, a saber: painel fotovoltaico, conversor elevador de tensão, rastreador do ponto de máxima potência, inversor, indutância de acoplamento, rede elétrica, controle da corrente injetada e malha de captura de fase.

No Capítulo 4 são expostos os resultados computacionais dos quatro casos simulados. No Caso-1 serão analisadas as curvas características de corrente versus tensão do módulo e depois de todo o painel fotovoltaico. Estas serão também comparadas com os valores e curvas fornecidas pelo fabricante em sua folha de dados. No Caso-2 o painel fotovoltaico foi

---

conectado, apenas, ao conversor elevador de tensão e ao rastreador do ponto de máxima potência. Portanto, será analisada a operacionalidade do *boost* e do MPPT. No Caso-3, tendo a finalidade de avaliar o desempenho da malha de captura de fase foram aplicados 4 distúrbios num intervalo de 2 segundos de simulação. Para prover variações de teste, como degrau de frequência e saltos de fase, foi implementada uma rede elétrica como fonte de tensão controlada, com entrada para frequência e um somador para aplicação de saltos de fase. No Caso-4 são mostrados os resultados das simulações de todo o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. São exibidas as curvas do perfil de irradiância empregado, corrente do painel fotovoltaico, tensão no barramento de corrente contínua (link CC), ação da malha de captura de fase e corrente injetada na rede elétrica.

Finalmente, o Capítulo 5, estabelece algumas ponderações sobre os resultados alcançados nesta pesquisa à luz dos objetivos por ela pretendidos. Apresenta os principais aspectos relacionados às contribuições deste trabalho, e propõe algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2 A ENERGIA SOLAR E O SISTEMA FOTOVOLTAICO**

### **2.1 Considerações Iniciais**

Quase todas as fontes de energia, a saber: hidráulica, biomassa, eólica, combustível fóssil e energia dos oceanos, são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos específicos de determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico.

O aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento de ambientes, denominado aquecimento solar passivo, decorre da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, reduzindo-se, com isso, as necessidades de iluminação e aquecimento. Assim, um melhor aproveitamento da radiação solar pode ser feito com o auxílio de técnicas mais sofisticadas de arquitetura e construção.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são mais utilizados em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais etc.) para o aquecimento de água (higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes). Os concentradores solares destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor. Neste último caso, pode-se gerar energia mecânica com o auxílio de uma turbina a vapor, e, posteriormente, eletricidade, por meio de um gerador.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico. O primeiro caracteriza-se pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, em condições específicas. No segundo, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, por meio do uso de células solares. Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No Brasil, o primeiro é mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, devido a características climáticas, e o segundo, nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica [1].

---

## 2.2 Uma Breve História da Energia Solar

A primeira vez que se fez uso da energia solar em grande porte é creditado, embora não comprovado, a Arquimedes (282 a 212 a.C.), que teria queimado a frota romana na Baía de Syracuse (hoje pertencente a Itália) concentrando raios solares em um foco a ponto de aquecê-los até pegarem fogo. O fato foi referenciado por diversos autores entre 100 a.C. e 1.100 d.C. e no livro *Optics Vitelio*, do matemático polonês Vitelio. O aparelho usado por Arquimedes foi descrito como um vidro composto com 24 espelhos que convergiam para um único ponto focal, enquanto alguns historiadores acreditam que Arquimedes teria utilizado escudos de soldados ao invés de espelhos em função da tecnologia de manufatura de vidros daquela época. Há relatos de que Arquimedes teria escrito um livro (*On Burning Mirrors*), mas nenhuma cópia sobreviveu. Durante o período Bizantino, Proclus repetiu o suposto experimento de Arquimedes e queimou a frota inimiga em Constantinopla.

Já no século XVIII, na Europa e Oriente Médio, começou a serem desenvolvidas fornalhas solares, cuja aplicação era a fundição de metais, principalmente ferro e cobre [2]. Uma das primeiras aplicações em larga escala foi a fornalha solar desenvolvida por Lavoisier em 1774, como ilustrado na Figura 2.1. Esta fornalha possuía uma lente de 1,32 m e outra secundária de 0,2 m e foi capaz de atingir temperaturas de 1.750°C [3].

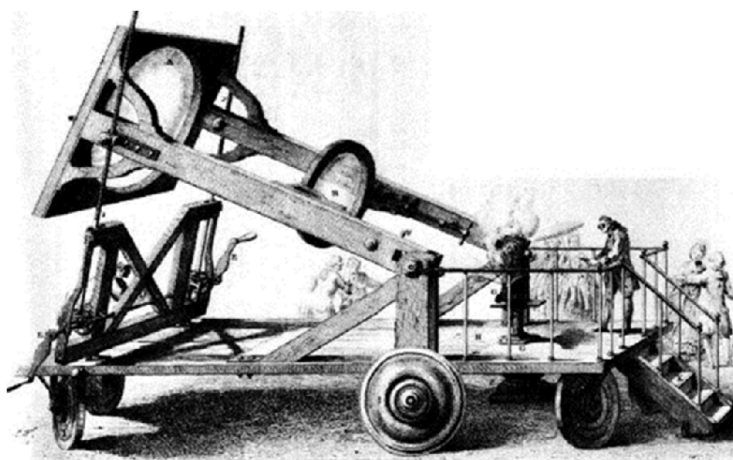


**Figura 2.1 - Fornalha solar de Lavoisier (1774)**

Durante o século XIX surgiram as primeiras tentativas de gerar vapor, à baixa pressão, a partir da radiação solar. As primeiras máquinas a vapor movidas à energia solar teriam sido construídas por Augusto Mouchot de 1864 a 1878 na Europa e norte da África [2; 4].

---

Uma de suas máquinas, uma impressora movida à energia solar foi apresentada em uma exposição internacional em Paris em 1882 e imprimia 500 cópias por hora, como mostra a Figura 2.2, mas foi considerada pelo governo francês cara demais para ser fabricada em larga escala [2; 4].

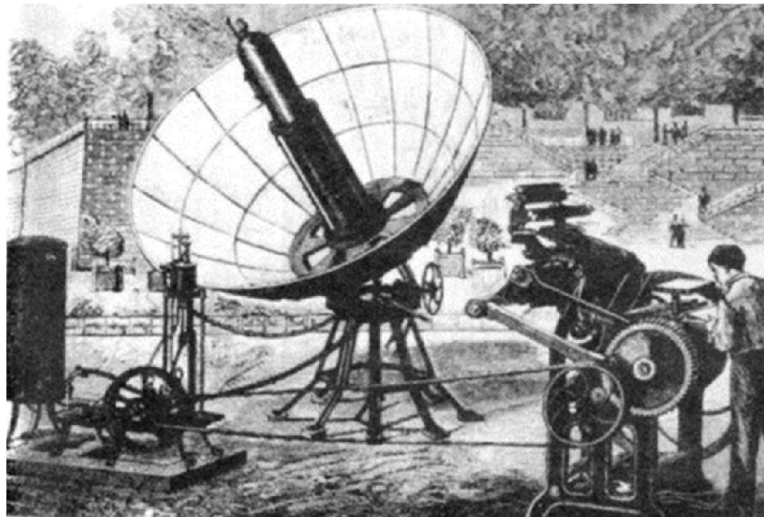


**Figura 2.2 - Coletor parabólico de uma impressora à energia solar (Paris, 1882)**

O desenvolvimento de novos sistemas teve continuidade nos EUA<sup>7</sup>, onde um engenheiro, Capitão John Ericsson, construiu o primeiro motor a vapor movido diretamente à energia solar. O Capitão construiu ao todo oito sistemas de aquecimento direto de água ou ar como fluidos em cilindros-parabólicos. A Figura 2.3 ilustra como seriam estes concentradores.

---

<sup>7</sup> EUA – Estados Unidos da América.

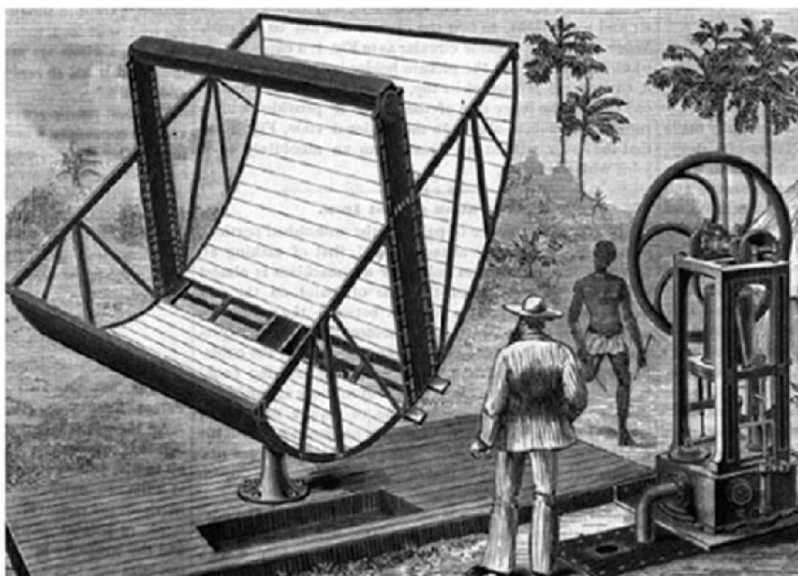


**Figura 2.3 - Concentrador parabólico de John Ericsson (1870)**

O século XX apresentou uma continuidade na evolução do uso da energia solar em concentradores. Em 1901, A. G. Eneas instalou um coletor solar para bombeamento de água em uma fazenda da Califórnia. O sistema consistia de uma estrutura similar a um guarda-chuva invertido, composto por 1788 espelhos alinhados em sua parte interna. Os raios do sol eram concentrados em uma caldeira localizada em seu ponto focal. Na caldeira, água era vaporizada e utilizada para operar uma centrífuga [3].

Em 1912, Frank Shuman e Charles Vernon Boys construíram uma planta de bombeamento de água próximo ao Rio Nilo, no Egito, à época a maior do mundo. A Figura 2.4 apresenta uma foto da planta. O campo solar da planta ocupava cerca de 1.200 m<sup>2</sup>, era composta por cilindros parabólicos de 62 m de comprimento e 4,5 m de largura, a água era aquecida até virar vapor diretamente nos receptores e operava uma bomba com vazão máxima de 22,7 m<sup>3</sup> de água por minuto (potência de 75 kW) [2; 4].

Frank Shuman, inventor e empresário americano, é apresentado por [2] e [4] como um visionário da energia solar e pioneiro da geração de energia em larga escala proveniente de energia solar.

Apesar de o projeto ter sido bem sucedido, a planta foi desativada em 1915 em função da 1ª Guerra Mundial, que se apropriou do material da planta. Ademais, após a guerra, grandes descobertas de campos de petróleo no Oriente Médio e na Venezuela, contribuíram para a expansão do setor petrolífero e em paralelo para um esquecimento da energia solar [2].

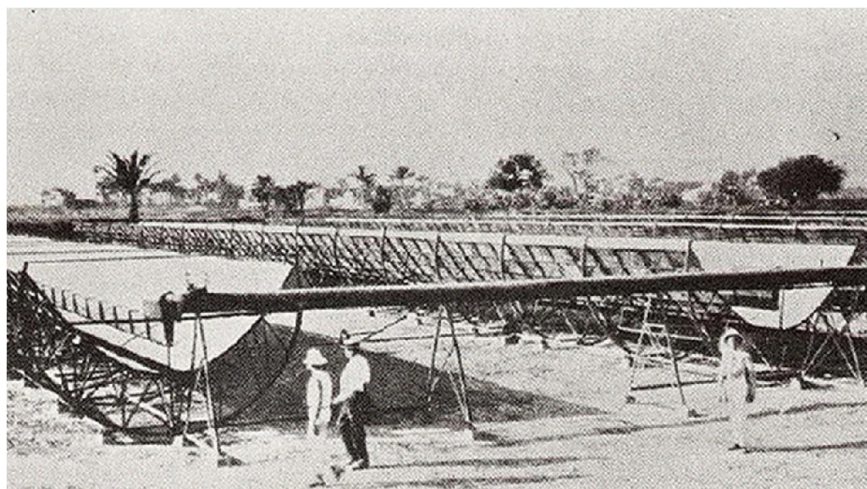


**Figura 2.4 - Planta de bombeamento de águas do Nilo (Egito, 1913)**

Durante a década de 1970 ocorreram o primeiro e o segundo choques do petróleo, em 1973 e 1978 [40]. Essa crise de abastecimento estimulou no mundo o incentivo de diversas fontes alternativas de energia e não por coincidência, o desenvolvimento dos atuais modelos de coletores solares começou nos EUA na década de 1970 coordenados pelo Departamento de Energia.

A primeira planta solar comercial foi instalada no Novo México em 1979 pelo laboratório Sandia (*Sandia National Laboratory*), composta por coletores cilindro parabólicos que atingiam temperaturas de até 500°C e utilizada inicialmente para calor de processos industriais [2; 4].

Os grandes investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento – P&D<sup>8</sup> no setor na Europa também surgiram na década de 1970. A Plataforma Solar de Almería - PSA<sup>9</sup>, vide Figura 2.5, pertencente ao *Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas* - CIEMAT<sup>10</sup> sob o *Ministerio de Ciencia e Innovación*, é o maior centro de P&D em concentradores solares da Europa e situa-se no Deserto de Tabernas, em Almería, Espanha [37]. A PSA foi fundada em 1977 e em 1981 forneceu pela primeira vez à rede, energia elétrica proveniente de fonte solar térmica através do projeto de demonstração chamado *Small Solar Power Systems/Distributed Collector System* - SSPS/DCS<sup>11</sup> constituído de dois campos solares cilindro-parabólicos com uma área de absorção de 7.602 m<sup>2</sup>. Em 1987, o centro de pesquisa assinou uma parceria com o governo Alemão [2; 4].

---

<sup>8</sup> P&D – Pesquisa e Desenvolvimento.

<sup>9</sup> PSA – Plataforma Solar de Almería.

<sup>10</sup> CIEMAT – Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas.

<sup>11</sup> SSPS/DCS – Small Solar Power Systems/Distributed Collector System.

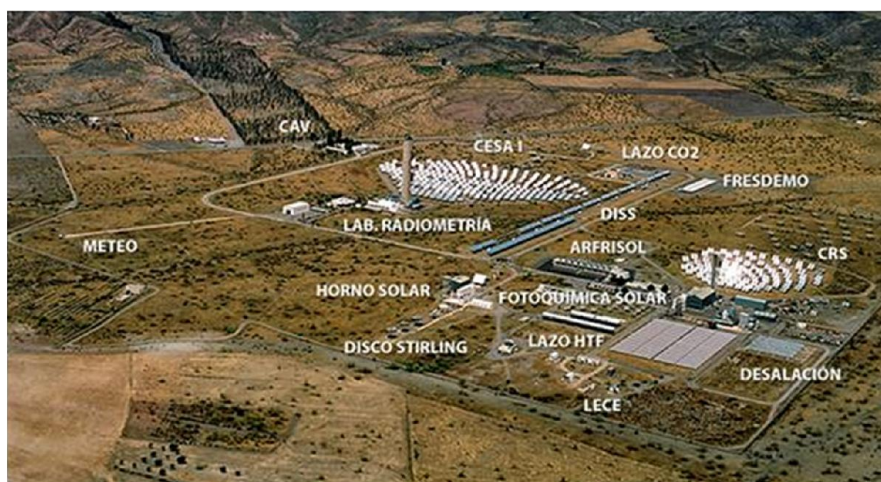


**Figura 2.5 - Planta Solar de Almería (PSA)**

Em 1982 a companhia *Luz International Limited* – Luz<sup>12</sup> desenvolveu coletores solares cilindro parabólicos e foi responsável pela primeira planta comercial de eletricidade do mundo, a SEGS I (de 14MW), que entrou com operação em 1983. Em seguida foram mais oito plantas, as SEGS II a IX, com capacidades de 30 a 80 MW cada [2]. Entretanto, em 1991 a *Luz* faliu e as plantas foram revendidas separadamente para diferentes grupos de investidores e todas elas continuam em operação [2; 4]. Em 1986, o excesso de capacidade ociosa da indústria petrolífera levou ao contrachoque do petróleo, quando o preço do barril de petróleo despencou a menos de 10 dólares [5]. A abundância de petróleo barato diminuiu o investimento e o ritmo de desenvolvimento de diversas fontes alternativas de energia.

Assim, nos EUA, a década de 1990 apresentou uma queda de investimentos no setor, o modelo federal que incentivou o surgimento das SEGS na Califórnia, o *Public Utility Regulatory Policy Act* – PURPA<sup>13</sup>, entrou em decadência e o cenário nos EUA só voltou a ficar favorável à energia solar com a adoção de novas políticas de incentivo em diversos estados do país adotadas nos anos 2000, em sua maioria *Renewable Portfolio Standard* – RPS<sup>14</sup>. No caso da Califórnia, o modelo foi adotado a partir de 2002 [6]. O RPS é um modelo que se baseia em um mecanismo econômico no qual é determinada uma cota de energia renovável (ou de uma fonte específica) e assim o equilíbrio de mercado levaria ao preço de equilíbrio [7].

<sup>12</sup> Luz – Luz International Limited.

<sup>13</sup> PURPA – Public Utility Regulatory Policy Act.

<sup>14</sup> RPS – Renewable Portfolio Standard.

---

Outro marco para o setor no mundo foram as leis de incentivo espanholas, iniciadas em 1998 a partir do Decreto Real D.R. 2818/1998 que propôs os procedimentos administrativos e as condições para beneficiar plantas de energias renováveis e fontes alternativas, que passaram a receber tarifação diferenciada e acima do valor de mercado, tarifação *feed-in*, como forma de incentivo [8].

O conhecimento adquirido em P&D ao longo destes anos e o aprimoramento da tecnologia, bem como incentivos econômicos, contribuem para que EUA e Espanha sejam hoje em dia os países referências no setor de energia solar térmica de alta potência.

## 2.3 Heliotecnica

A luz é formada por um conjunto de radiações eletromagnéticas de frequências muito altas que estão agrupadas dentro de um intervalo ao qual chamamos de *espectro luminoso*.

O Sol transfere energia para a Terra por meio da luz, isto é, pela radiação. Devido à grande distância existente entre o Sol e a Terra (aproximadamente 150 milhões de quilômetros), apenas uma parte mínima dessa radiação atinge a superfície terrestre, que corresponde a uma quantidade de energia de  $1 \times 10^{18}$  kWh/ano. De toda energia emitida pelo Sol ( $3,9 \times 10^{26}$  J/s) apenas ( $1,8 \times 10^{17}$  J/s) chega ao nosso planeta [9].

### 2.3.1 Espectro da Radiação Solar

A radiação solar é um processo de transferência de energia de natureza eletromagnética, oscilações sincronizadas de campos elétricos e magnéticos, propagando-se segundo um movimento ondulatório [10]. As ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio de propagação; elas viajam a uma velocidade aproximada de  $300.000 \text{ km/s}^{15}$ , correspondente à velocidade da luz no vácuo ( $C_0^{16}$ ). As características da radiação eletromagnética são totalmente definidas pelo seu comprimento de onda ( $\lambda^{17}$ ) e pela sua frequência ( $\nu^{18}$ ), relacionadas pela expressão (2.1):

$$\nu = \frac{C_0}{\lambda} \quad (2.1)$$

---

<sup>15</sup> Km/s – Quilômetro por segundo: unidade de velocidade linear.

<sup>16</sup>  $C_0$  – Velocidade da luz no vácuo.

<sup>17</sup>  $\lambda$  – Comprimento de onda.

<sup>18</sup>  $\nu$  – Frequência de onda.

Existem radiações eletromagnéticas que são perceptíveis ao olho humano. A esta chamamos de luz visível [9].

O espectro das ondas eletromagnéticas é contínuo, isto é, existem ondas eletromagnéticas de todos os comprimentos de onda. Contudo, é usual dividir o espectro em faixas com limites mais ou menos precisos e, a cada faixa, atribuir um nome especial como ilustra a Figura 2.6. Por exemplo, como a retina do olho humano é sensível às ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda no intervalo aproximado de  $0,4 \times 10^{-6} \text{ m}$  a  $0,7 \times 10^{-6} \text{ m}$ , elas recebem, coletivamente, o nome de luz. Esses números não são absolutos porque diferentes pessoas têm retinas com diferentes sensibilidades e a mesma pessoa tem sensibilidade diferente conforme a idade e o estado de saúde de um modo geral. As principais faixas, ou regiões, do espectro eletromagnético são: raios gama, raios X, ultravioleta, luz, infravermelho, microondas, ondas de TV e ondas de rádio FM, ondas curtas, AM e ondas longas. Todas as ondas eletromagnéticas transportam energia e é tanto maior essa energia quanto menor for o comprimento de onda [11].

A energia produzida pelo Sol transmite-se no espaço em forma de radiação eletromagnética. Esta radiação é um conjunto contínuo de ondas de diversos comprimentos de onda, dos quais a luz visível é apenas uma pequena parte.

A Figura 2.6 mostra a distribuição da radiação solar extraterrestre e denomina-se de “espectro da radiação” [9].

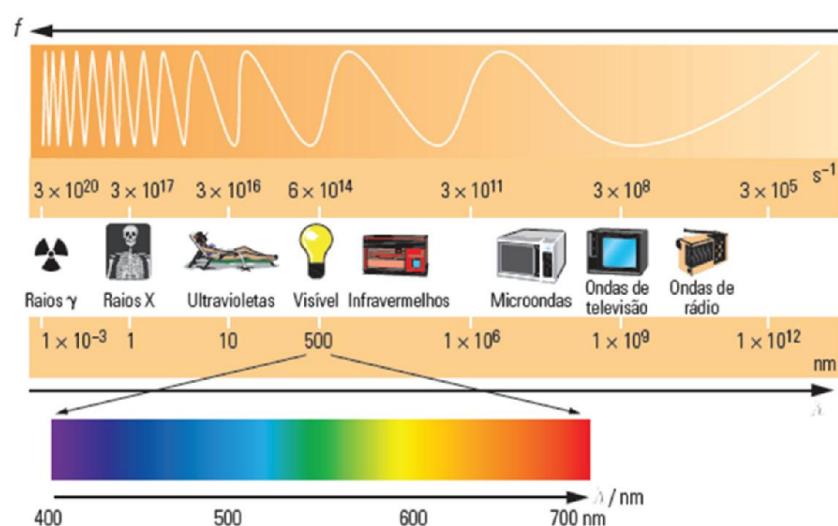


**Figura 2.6 - Frequências e comprimentos de onda da radiação**

A Figura 2.7 representa o espectro de ação da fotossíntese. Os comprimentos de onda do espectro da luz visível mais eficazes na realização da fotossíntese são referentes às luzes azul e alaranjada. Pode-se concluir ainda pela mesma figura que as clorofilas são verdes porque refletem sobretudo a luz verde [38].

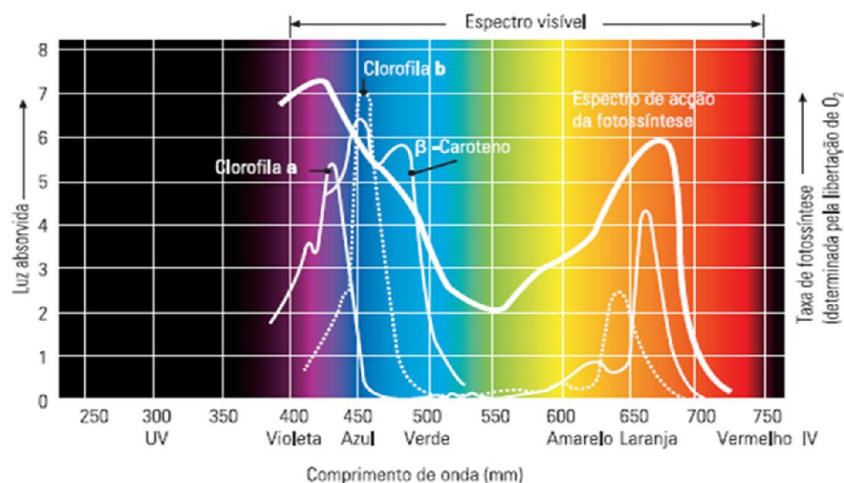


**Figura 2.7 - Ondas do espectro da radiação solar**

A Tabela 2.1 mostra os valores percentuais da distribuição do espectro da radiação solar que incide na atmosfera extraterrestre.

**Tabela 2.1 - Distribuição do espectro da radiação solar na atmosfera extraterrestre**

| Comprimento de onda da banda ( $\mu\text{m}^{19}$ ) | < 0,38<br>(ultravioleta) | 0,38 a 0,78<br>(espectro da radiação visível) | 0,78<br>(infravermelho) |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|
| Porcentagem de energia na banda                     | 7 %                      | 47,3 %                                        | 45,7 %                  |

### 2.3.2 Massa de Ar

As características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento. Essas

<sup>19</sup>  $\mu\text{m}$  – Micro, representado pela letra grega ‘ $\mu$ ’ (lê-se: mí) é um prefixo equivalente ao inverso de um milhão, utilizado como multiplicador de uma dada unidade de medida. Metro, representada pela letra ‘m’, é a unidade de medida, no Sistema Internacional, representativa do comprimento.

modificações dependem da espessura da camada atmosférica e são identificadas por um coeficiente denominado *massa de ar* –  $AM^{20}$ , e, dependente também do ângulo Zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas como: vapor de água, ar, partículas em suspensão, sujidade, etc. [12].

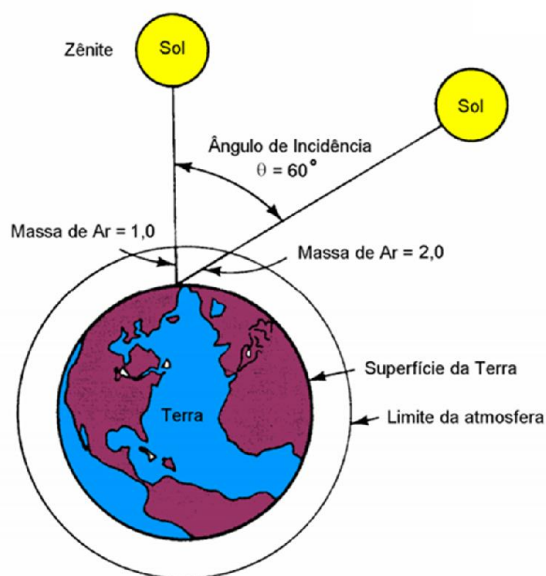


**Figura 2.8 - Massa de ar atravessada pela radiação solar**

A massa de ar  $AM = 1$  ocorre quando  $\Theta^{21} = 0$ . Tal valor corresponde à posição solar no equador ao meio-dia, nos dias de equinócio da Primavera ou do Outono. Esta grandeza pode ser calculada pela equação (2.2).

$$AM = \sec(\theta) \quad (2.2)$$

Como pode ser notado na Figura 2.8, para um ângulo de incidência  $\theta = 60^\circ$  obtém-se uma massa de ar  $AM = 2$ .

As características elétricas dos sistemas solares variam com a temperatura e irradiância ‘S’<sup>22</sup> solar e são apresentadas sob condições padrões de teste – CPT<sup>23</sup>. Estas

<sup>20</sup> AM – Massa de ar. Em inglês: *Air Mass*.

<sup>21</sup>  $\Theta$  – Ângulo de incidência da radiação solar.

<sup>22</sup> S – Irradiância: é o fluxo radiante incidente por unidade de área de qualquer radiação eletromagnética. A sua unidade no Sistema Internacional é  $W/m^2$ .

<sup>23</sup> CPT – Condições Padrões de Teste. Em inglês: *Standard Test Conditions – STC*.

condições se referem a uma temperatura de 25°C, uma massa de ar de 1,5 e um nível de irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>.

As perdas de energia serão maiores para valores mais elevados de massas de ar, como ilustrado na Figura 2.9 [9].

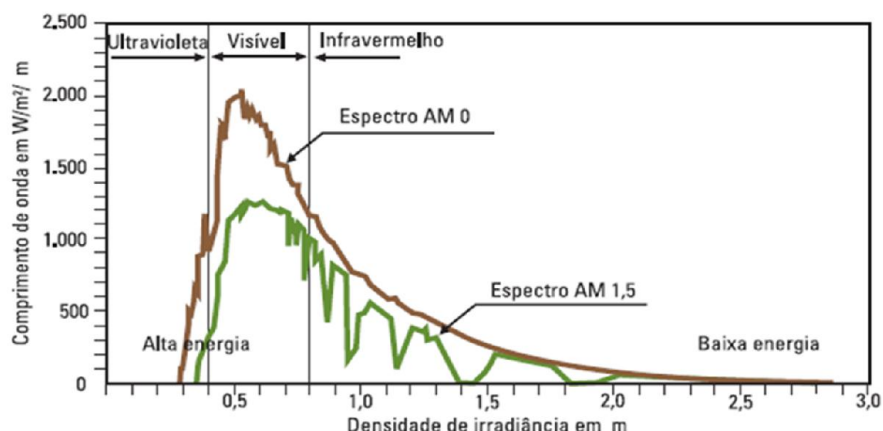


**Figura 2.9 - Comprimento de onda em função da irradiância solar**

### 2.3.3 Componentes da Radiação Solar

A radiação solar global é a quantidade de energia que chega a superfície da Terra na forma de radiação de ondas curtas, após sofrer interações com a atmosfera. Ela é constituída da radiação solar direta, difusa e refletida.

A radiação direta é a energia que chega diretamente na superfície do solo.

A radiação difusa é composta pela energia proveniente das demais direções, correspondendo à radiação que é difundida na atmosfera devido à presença de partículas diversas. Em dias que o céu apresenta-se descoberto a radiação direta é maior que a radiação difusa, uma vez que esta representa cerca de 15% da radiação que chega à superfície terrestre. A radiação difusa em dado instante depende de fatores importantes como altitude e latitude do local, da declinação e do ângulo de elevação do Sol, do índice de turbidez, da quantidade de vapor presente na atmosfera e da nebulosidade. Em condições de céu descoberto e ausência de partículas sólidas em suspensão, aproximadamente metade da radiação solar difusa retorna ao espaço e a outra metade é enviada para a superfície da Terra [13].

A radiação refletida é a parte da energia recebida sobre a superfície terrestre reenviada para o espaço sob forma de energia refletida. As nuvens, as massas de gelo e neve e a própria

superfície terrestre são razoáveis refletores, reenviando para o espaço cerca de 30% a 40% da radiação recebida. A esta razão entre a radiação refletida e incidente chama-se *albedo*. A Figura 2.10 ilustra os tipos de radiação incidentes na Terra [9].

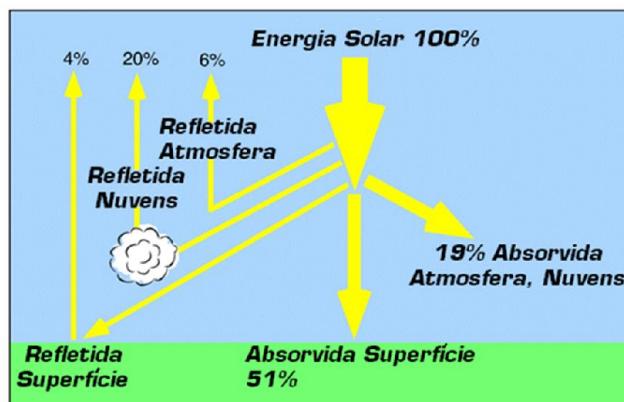


**Figura 2.10 - Tipos de radiação incidentes na Terra**

Em seguida é apresentada na Tabela 2.2 albedos para alguns tipos específicos de superfícies [9].

**Tabela 2.2 - Albedos de alguns tipos específicos de superfícies**

| Superfície            | Albedo      | Superfície                 | Albedo      |
|-----------------------|-------------|----------------------------|-------------|
| Relva                 | 0,18 a 0,23 | Asfalto                    | 0,15        |
| Pastos secos          | 0,28 a 0,32 | Florestas                  | 0,05 a 0,18 |
| Campos lavrados       | 0,26        | Camada de neve fresca      | 0,80 a 0,90 |
| Pastos (Julho/Agosto) | 0,25        | Área de urzes e areal      | 0,10 a 0,25 |
| Terra estéril         | 0,17        | Camada de neve velha       | 0,45 a 0,70 |
| Pedregulhos           | 0,18        | Superfície água (ys > 45°) | 0,05        |
| Cimento liso          | 0,55        | Superfície água (ys > 30°) | 0,08        |
| Betão liso            | 0,30        | Superfície água (ys > 10°) | 0,22        |

## 2.4 Dados do Sol

O Sol emite radiações em toda a gama do espectro eletromagnético, desde os raios gama até às ondas de rádio.

A superfície da Terra recebe anualmente um valor aproximado de  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia solar. Este valor é 10 mil vezes superior ao consumo mundial anual de energia.

**Tabela 2.3 - Dados característicos do Sol**

|                           |                                                                                |                                |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Massa                     | $2,2 \times 10^{27}$ ton <sup>24</sup> .                                       | 334.000 vezes mais que a Terra |
| Diâmetro                  | $10 \times 10^5$ km                                                            | 110 vezes mais que a Terra     |
| Distância à Terra         | $15 \times 10^7$ km                                                            |                                |
| Núcleo                    | Produz 90% energia e tem 320.000 km de diâmetro                                |                                |
| Formato da radiação solar | 7% radiação ultravioleta<br>47% radiação visível<br>46% radiação infravermelha |                                |
| Energia produzida         | $38 \times 10^{25}$ J <sup>25</sup> (W.s <sup>26</sup> )                       |                                |

Devido à excentricidade da órbita terrestre em torno do Sol, o nosso planeta encontra-se mais próximo deste (Sol) em Janeiro do que em Julho como mostra a Figura 2.11.

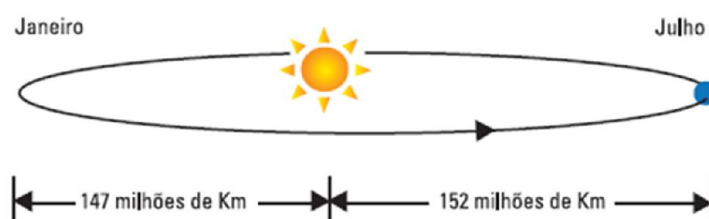


**Figura 2.11 - Distância da Terra ao Sol nos meses de Janeiro e Julho**

A Terra descreve uma órbita elíptica ao redor do Sol, e recebe denominações específicas quando ocupa os extremos da elipse. Quando está mais afastada do Sol

<sup>24</sup> Ton – Tonelada.

<sup>25</sup> J – Joule.

<sup>26</sup> s – segundo.

(aproximadamente  $1,017 \text{ ua}^{27}$ ) denomina-se por *afélio*. Ao ponto em que a Terra se encontra a aproximadamente em  $0,983 \text{ ua}$  chama-se *periélio* [9].

O movimento de translação da Terra ao redor do Sol dura um ano ou, com mais exatidão, 365 dias, 5 horas, 48 minutos e 46 segundos (De 4 em 4 anos acerta-se o calendário com um ano bissexto). Este movimento é efetuado enquanto a Terra gira em torno de seu próprio eixo, realizando uma volta completa por dia. Esta ação é conhecida como movimento de rotação.

#### 2.4.1 Constante Solar

A constante solar é a potência de radiação solar incidente num plano perpendicular à direção desta radiação, quando a Terra está à distância média do Sol. A esta constante solar que alcança a unidade de área da superfície da Terra chamamos de Constante Solar e é dada por  $S^{o28} = 1367 \text{ W/m}^2$ .

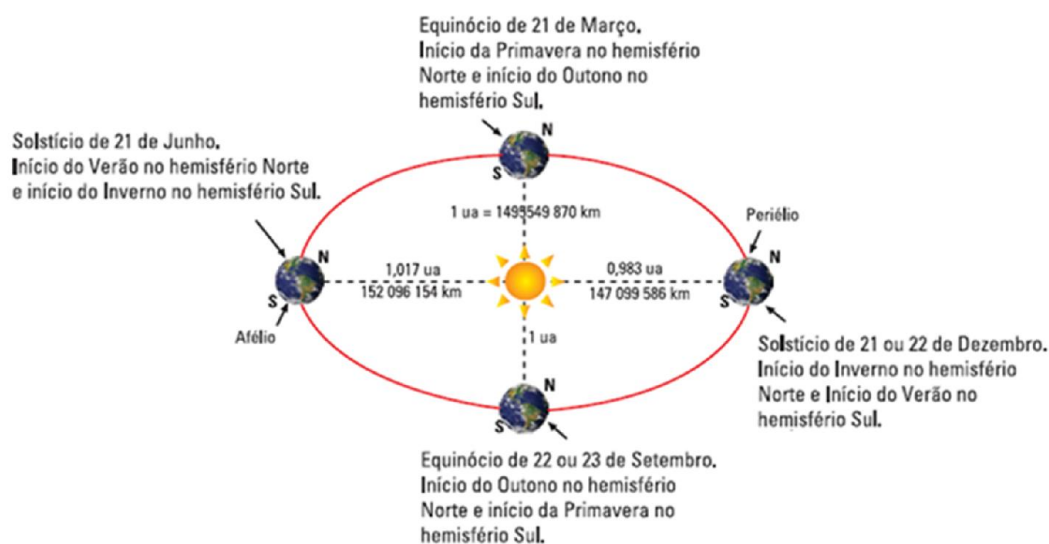


**Figura 2.12 - Órbita descrita pela Terra ao redor do Sol**

#### 2.4.2 Movimento Terra-Sol

Como sabemos, o planeta Terra descreve uma trajetória elíptica num plano que é inclinado em relação ao plano do equador.

<sup>27</sup> ua – unidade astronômica: é a distância entre a Terra e o Sol, aproximadamente 149.597.870 Km. Esta grandeza é usada para comparar as distâncias entre os planetas e o Sol.

<sup>28</sup> S<sup>o</sup> – Constante Solar.

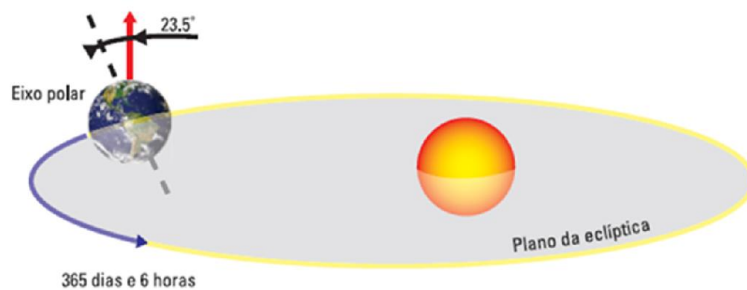


**Figura 2.13 - Movimento Terra-Sol**

Devido à inclinação da Terra, a direção norte-sul geográfica está desviada da direção norte-sul do campo magnético terrestre.

O eixo de rotação, designado eixo polar, é quase perpendicular ao plano da elíptica, formando um ângulo com a normal ao plano da órbita de valor  $23^{\circ}5'$ .

O ângulo formado entre eixo da Terra com o plano da elíptica chamamos de *declinação*. Este ângulo varia com o respectivo dia do ano, entre os limites  $\pm 23,5^{\circ}$  [9].

## 2.5 Coordenadas Geográficas

O posicionamento de qualquer ponto na superfície terrestre pode ser determinado pelas coordenadas geográficas, ou seja, pela latitude e longitude. Para cotação da latitude são considerados os paralelos, enquanto que para a longitude levamos em consideração os meridianos.

A latitude pode ser designada pelo ângulo  $\Phi^{29}$  formado pela vertical de um ponto geográfico considerado e pelo plano do equador, como pode ser constatado na Figura 2.14. Esta distância mede-se em graus, podendo variar entre  $0^{\circ}$  e  $90^{\circ}$  para norte ou para sul. Por exemplo, Uberlândia em Minas Gerais se encontra à latitude  $18.92^{\circ}$  sul (graus decimais) ou, mais usual,  $18^{\circ} 55' 8''$  sul.

---

<sup>29</sup>  $\Phi$  – Latitude.



**Figura 2.14 - Incidência dos raios solares nos hemisférios da Terra**

Cada dia é composto de 24 horas e corresponde a uma rotação total de  $360^\circ$  da Terra. Com isso cada hora equivale a  $15^\circ$  e assim cada  $1^\circ$  corresponde a 4 minutos [9].

Para efeito de fixação de alguns conceitos define-se a esfera celeste como sendo uma casca esférica concêntrica com a Terra, de raio infinitamente maior que o raio terrestre. A partir desta definição, o zênite é o ponto onde a vertical local de um observador, na superfície da Terra, toca a esfera celeste. A Eclíptica é o caminho percorrido pelo Sol na esfera celeste ao longo de um ano. Em termos físicos, é o plano orbital da Terra em torno do Sol. Os solstícios e equinócios são definidos por posições precisas do Sol ao longo da Eclíptica, veja a Figura 2.15.

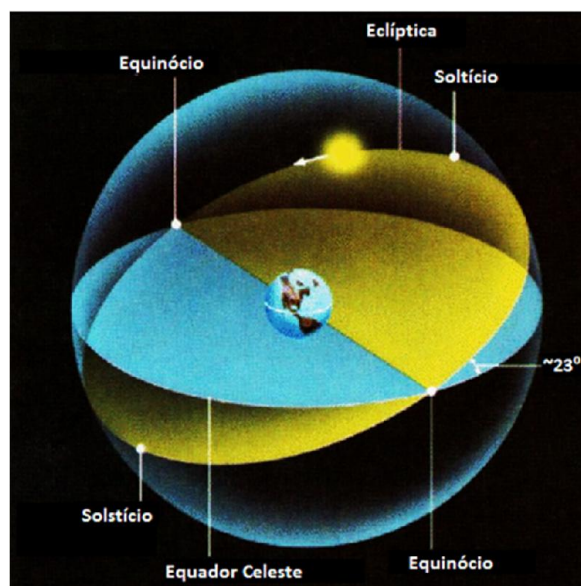


**Figura 2.15 - Declinação Solar**

---

### 2.5.1 Declinação Solar

Na Figura 2.15 pode ser observado ainda que a declinação solar ( $\delta^{30}$ ) é nula nos equinócios e atinge seu valor máximo nos solstícios. Já a Figura 2.16 ilustra a variação da declinação solar ao longo do ano.

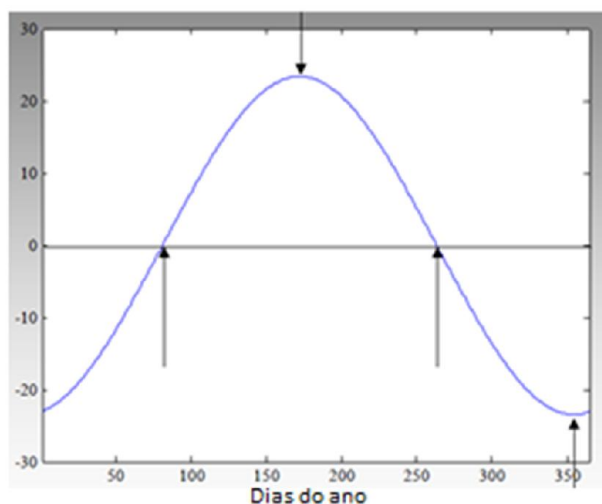


**Figura 2.16 - Declinação solar ao longo do ano**

A declinação solar é o ângulo formado pela linha imaginária Terra-Sol, ao meio-dia solar, com o plano equador. A fórmula que permite obter esse valor com rigor (fórmula de Cooper) é dada pela expressão (2.3) a seguir:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left( \frac{360}{365} \cdot (284 - n) \right) \quad (2.3)$$

Onde, o  $n^{31}$  é o número do dia do ano. Por exemplo: para o dia 1º de Janeiro  $n = 1$ , e no dia 1º de Março  $n = 60$ .

### 2.5.2 Ângulos de Inclinação e de Incidência

O ângulo de inclinação ( $\alpha^{32}$ ) é formado pelo plano da superfície captadora (por exemplo, um painel fotovoltaico) e a horizontal do ponto que se considera. Existem diferentes

---

<sup>30</sup>  $\delta$  – Declinação solar.

<sup>31</sup>  $n$  – Número do dia do ano.

<sup>32</sup>  $\alpha$  – Ângulo de inclinação do painel fotovoltaico.

ângulos ideais de inclinação conforme a latitude do local de montagem do sistema de energia solar.

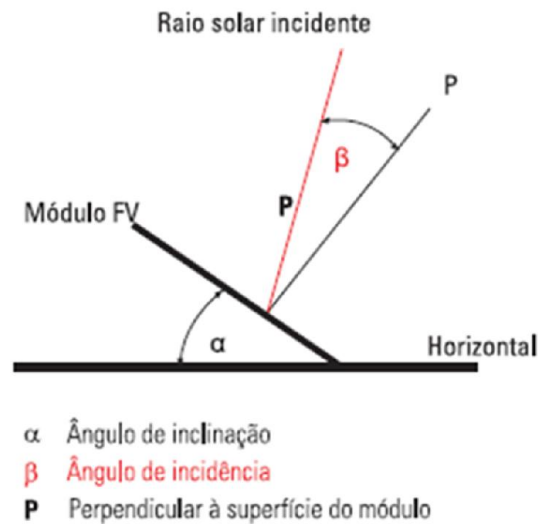


**Figura 2.17 - Ângulos de inclinação e de incidência**

Já o ângulo de incidência ( $\beta^{33}$ ) se encontra entre a perpendicular da superfície do módulo e a linha do raio solar incidente.

O cálculo do ângulo de incidência pode ser realizado pela equação (2.4):

$$\cos(\beta) = \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi^{34}) \cdot \cos(\alpha) \quad (2.4)$$

A Figura 2.18 e a Figura 2.19 ilustram o ângulo de incidência dos raios solares em um local específico em Portugal.

<sup>33</sup>  $\beta$  – Ângulo de incidência da radiação solar no painel fotovoltaico.

<sup>34</sup>  $\varphi$  – Latitude.

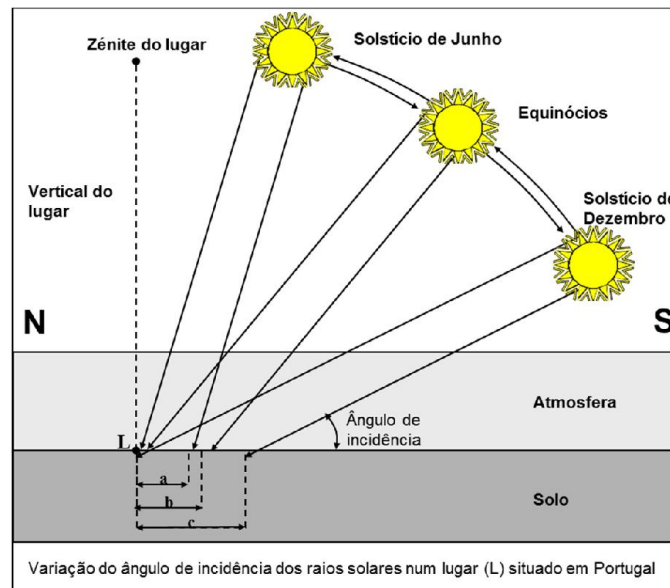


**Figura 2.18 - Variação do ângulo de incidência**

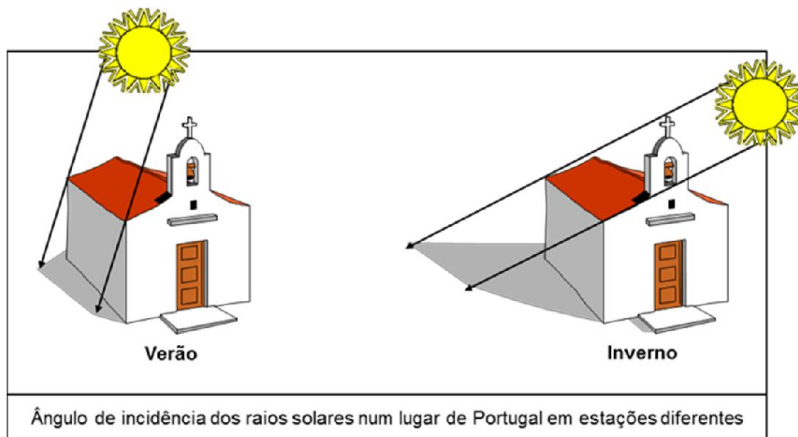


**Figura 2.19 - Variação do ângulo de incidência ao longo de um período do dia**

### 2.5.3 Altura Solar

Para situar um astro no céu, por exemplo, o Sol, precisamos indicar apenas duas quantidades ou coordenadas: a altura e o azimute.

A altura solar, ilustrada na Figura 2.20, é o ângulo que a direção com que vemos o astro faz com o plano do horizonte. Vai de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Nota-se que esta altura é um ângulo, medido no sentido horário, e o seu valor é dado em graus. No caso de medição, o aparelho mais adequado para tal fim é o astrolábio.

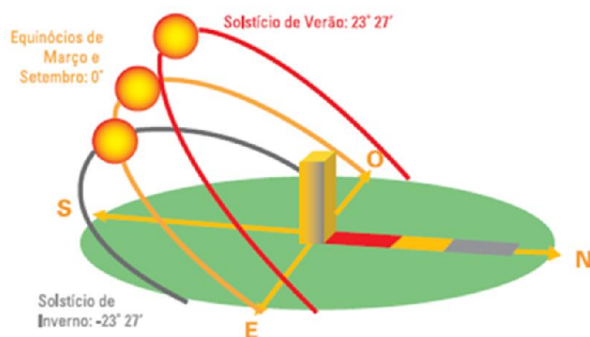


**Figura 2.20 - Variação da altura do Sol**

A altura do Sol ( $Y_{s^{35}}$ ) pode ser determinada conhecendo-se o valor do ângulo de declinação ( $\delta^{36}$ ) e o respectivo valor da latitude do local ( $\varphi$ ).

Eis as fórmulas de cálculo da altura solar:

$$Y_s = 90 - \varphi + \delta \quad (2.5)$$

$$Y_s = 90 + \varphi - \delta \quad (2.6)$$

Para maior precisão deve-se fazer uso da seguinte fórmula:

$$\text{sen}(Y_s) = \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \quad (2.7)$$

Onde, o  $h^{37}$  se refere ao ângulo horário solar (em graus).

#### 2.5.4 Ângulo de Azimute

O azimute, mostrado na Figura 2.21, é o ângulo que a direção do astro, marcada no chão, faz com a reta de sentido Norte no mesmo plano do horizonte, medido também no sentido horário. Este é mensurado normalmente de 0 a 360 graus.

<sup>35</sup>  $Y_s$  – Altura do Sol.

<sup>36</sup>  $\delta$  – Declinação solar.

<sup>37</sup>  $h$  - Ângulo horário solar.

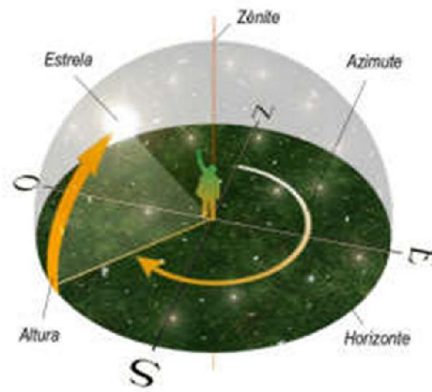


**Figura 2.21 - Altura e azimute do Sol**

À medida que vemos o Sol andar no céu, no seu movimento aparente, a altura e o azimute solares vão variando, ver Figura 2.22. Em Lisboa, nos dias 21 de Março e 23 de Setembro, quando o Sol nasce, o seu azimute é  $90^\circ$ ; e a sua altura  $0^\circ$ ; quando o Sol está a “pino”, o seu azimute é  $180^\circ$  e a sua altura  $51^\circ$ ; e, finalmente, quando o Sol se põe, o seu azimute é  $270^\circ$  e a sua altura outra vez  $0^\circ$ . A altura máxima do Sol é diferente em lugares diferentes do nosso planeta. Assim, visto da região equatorial, o Sol está mais alto e, visto das regiões polares, o Sol está mais baixo.

Medindo a altura do Sol, podemos saber a hora solar, que, não é a hora legal marcada pelos relógios, e, medindo a altura máxima do Sol, podemos também saber se estamos num lugar mais ou menos afastado do equador [9].

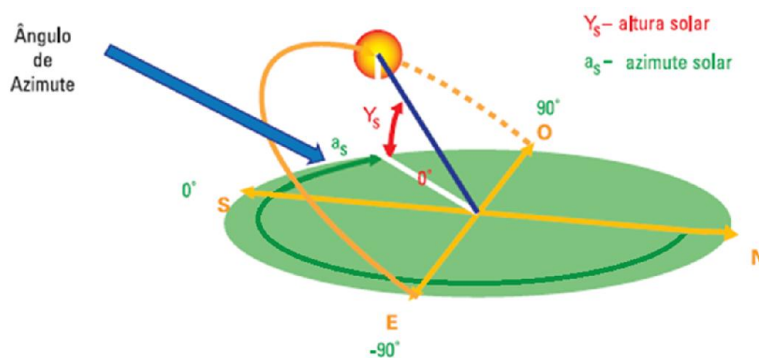


**Figura 2.22 - Ângulo de Azimute**

O cálculo do azimute pode ser realizado de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{sen}(a_s^{38}) = \frac{\cos(\delta) \cdot \text{sen}(h)}{\cos(Y_s)} \quad (2.8)$$

### 2.5.5 Ângulos Característicos da Radiação Solar na Terra

A Figura 2.23 ilustra os ângulos característicos da trajetória solar na Terra.

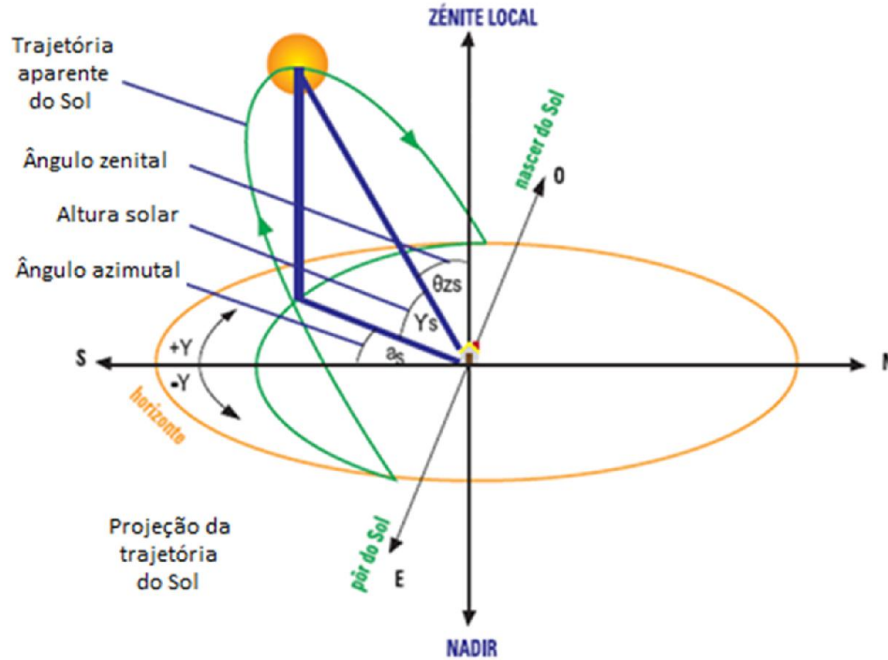


**Figura 2.23 - Ângulos característicos da radiação solar na Terra**

## 2.6 Orientação dos Módulos Solares

A inclinação dos coletores deve otimizar a captação de radiação solar tendo em vista a variação da altura solar ao longo do ano. Este ângulo pode ser aproximado pela seguinte fórmula:

$$\alpha_{ótimo} = 3,7 + 0,69 \cdot \varphi \quad (2.9)$$

<sup>38</sup>  $a_s$  – Azimute solar.

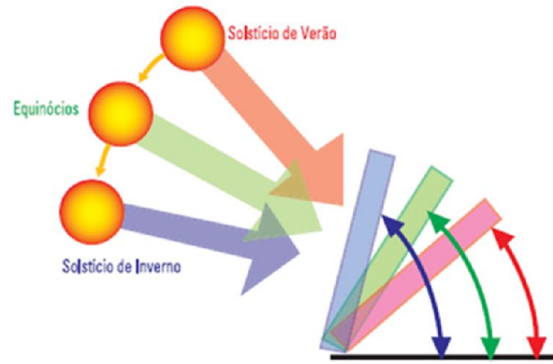


**Figura 2.24 - Posição do módulo face à posição do Sol**

### 2.6.1 Projeções Estereográficas Solares

Em geometria, com aplicações em cartografia, a projeção estereográfica é a representação da superfície de uma esfera sobre um plano tangente a ela, utilizando-se como origem um ponto diametralmente oposto ao ponto de tangência daquele plano com a esfera [14].

Análises de insolação atualmente são feitas, em sua grande maioria, com o auxílio de computadores. Mas nem sempre foi assim, antes os profissionais da área usavam as cartas solares para saber a posição do sol em determinada data do ano. Ainda hoje, é importante ter o entendimento desta técnica, pois em alguns casos ela pode ser mais prática que a utilização de computadores, por exemplo, na hora de fazer uma preliminar ou o esboço de um projeto, ou mesmo para interpretar os dados gerados por um *software*. Há vários tipos de cartas solares, a projeção estereográfica é um exemplo destas.

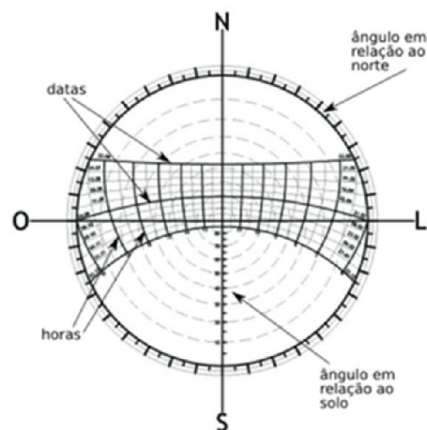


**Figura 2.25 - Carta solar em projeção estereográfica**

---

A carta solar em projeção estereográfica é construída a partir de dois ângulos (azimutal e altura solar) que serão usados para leitura da orientação do raio solar em determinado momento do dia [15].

As linhas horizontais são as datas do ano, já as verticais, os horários do dia. Encontrando-se o ponto de interseção entre estas duas linhas, traça-se uma linha do centro da carta passando pelo ponto do cruzamento de data e hora, até o anel externo. Feito isso, temos o ângulo azimutal (ângulo entre a direção norte e a projeção sobre o solo). E para determinar a altura solar rebata a distância do ponto entre o cruzamento de data e horas e o centro da carta, para a escala situada na parte de baixo da mesma como mostra a Figura 2.26 - Linha horizontal: dia 22 de Junho; linha vertical: 15 horas; ângulo azimutal:  $310^\circ$ ; e altura solar:  $20^\circ$ , aproximadamente.

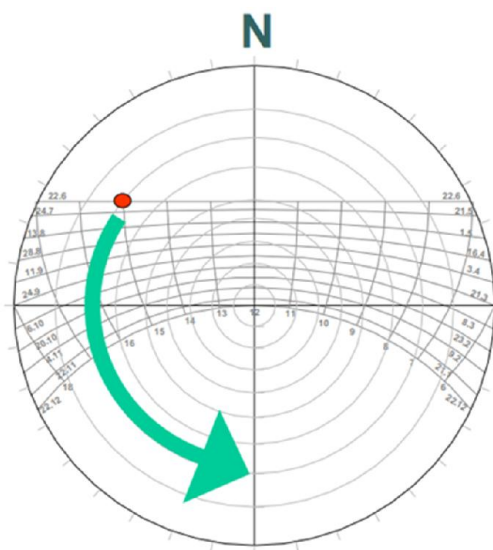


**Figura 2.26 - Exemplo de carta solar em projeção estereográfica**

Uma forma mais prática de determinar as coordenadas solares ao longo do ano e do dia pode ser por meio da projeção estereográfica cilíndrica, como ilustra a Figura 2.27.

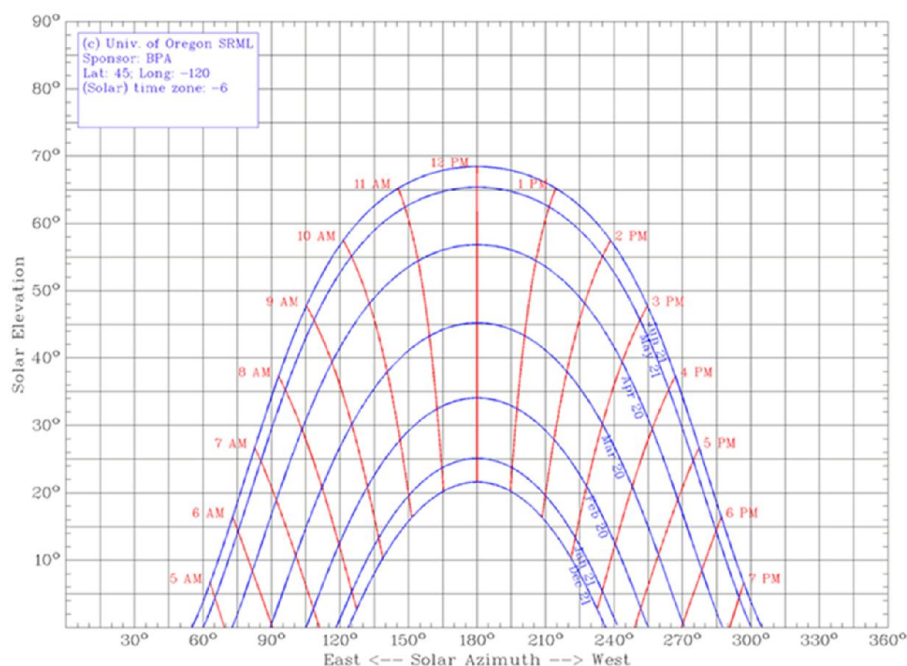


**Figura 2.27 - Carta solar em projeção estereográfica cilíndrica**

É possível com a ajuda de um esquadro e de uma régua determinar os ângulos que determinam a posição do Sol nos diversos momentos e meses do ano. Como exemplo, a 20 de Fevereiro, a altura solar máxima é de  $35^\circ$  (eixo das ordenadas) para um ângulo azimutal de  $180^\circ$  (eixo das abscissas). O valor máximo de altura solar durante o ano acontece em 21 de Junho, com  $68^\circ$ .

A Figura 2.28 ilustra graficamente algumas grandezas, relacionadas ao sol, devido à influência das variações anuais para uma latitude ( $\phi$ ) de  $40^\circ$  N.

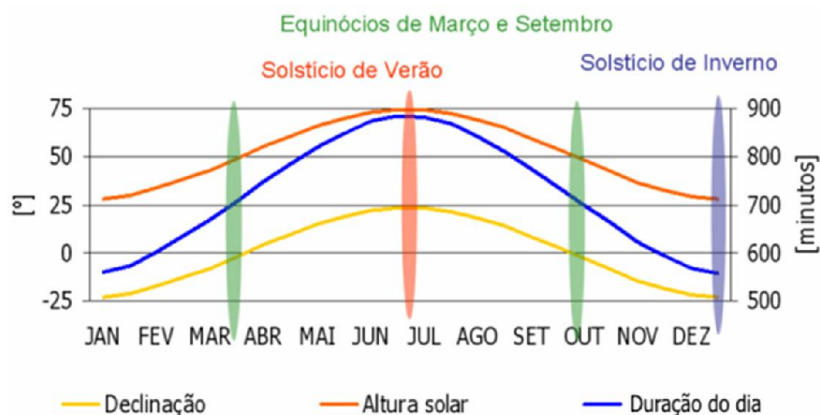


**Figura 2.28 - Duração do dia, declinação e altura solar**

### 2.6.2 Sombreamentos

As projeções estereográficas permitem determinar zonas de sombreamento ao longo do ano [39]. O exemplo abaixo ilustrado pela Figura 2.29 e Figura 2.30 refere-se à cidade de Lisboa (40°N). Verifica-se que existe um obstáculo que impede a incidência da radiação solar direta sobre um painel fotovoltaico para uma altura solar menor que 35° que vai de -40° a -15° do ângulo azimutal. Quer dizer que em determinados períodos de dias específicos do ano, o painel estará em uma zona de sombreamento.

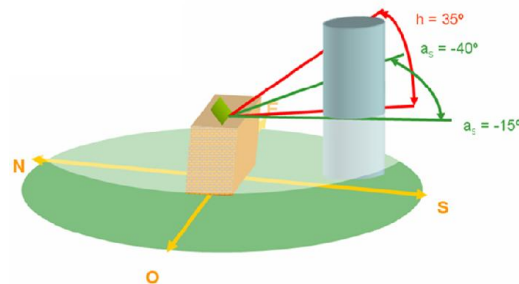


Figura 2.29 - Exemplo de zonas de sombreamento

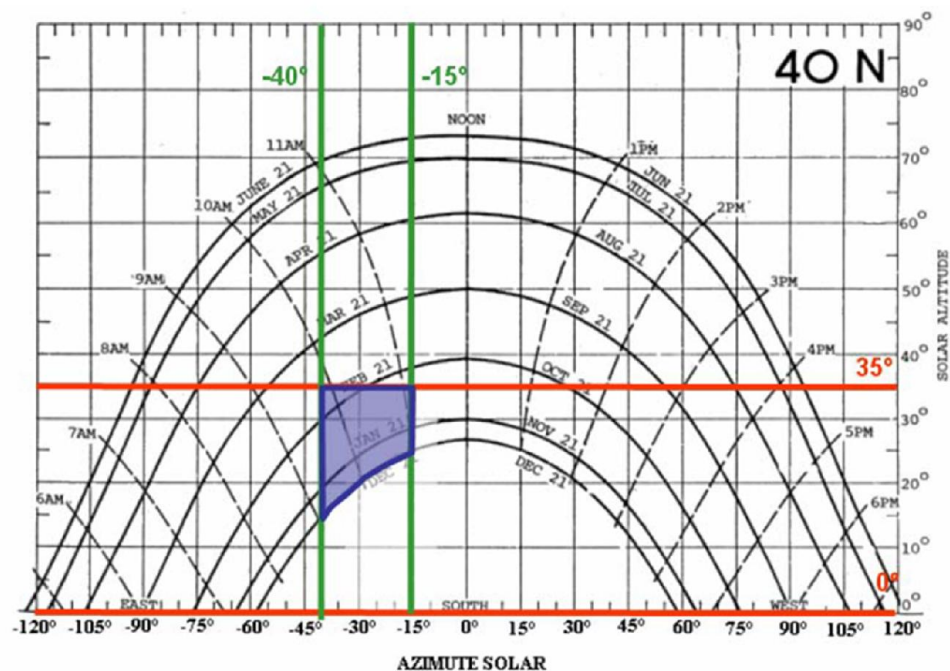


Figura 2.30 - Carta solar de Lisboa em projeção estereográfica cilíndrica

O sombreamento da instalação pode existir sempre que haja obstáculos em seu redor e depende da sua orientação, distância e altura face à mesma. No dia mais desfavorável do

---

período de utilização, a instalação não deve ter mais de 5% da superfície sombreada. E é considerada inoperante quando 20% de sua superfície estiver coberta por sombras [9].

### 2.6.3 *Orientação e Inclinação de Superfícies Absororas*

A quantidade de radiação solar captada numa superfície é máxima quando esta se encontra posicionada perpendicularmente à radiação devido à variação angular da absorptância, e reflectância (Figura 2.31), além do percurso realizado pela radiação na atmosfera (Figura 2.32).

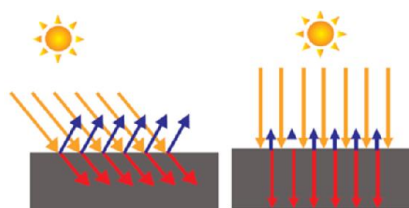


**Figura 2.31 - Variação angular da absorptância e reflectância**

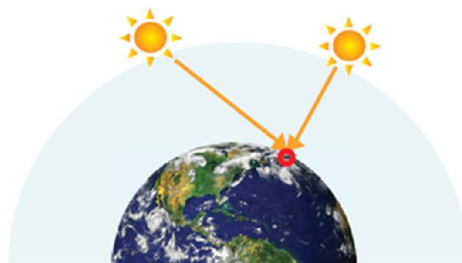


**Figura 2.32 - Percurso realizado pela radiação na atmosfera**

### 2.6.4 *Captação Máxima de Energia Solar*

A radiação solar que atinge um corpo pode ser absorvida, refletida ou transmitida, verificando-se assim a Lei da Conservação de Energia. A energia incidente depende das propriedades do corpo (material, espessura, acabamento da superfície, etc.) e da frequência da radiação. Com relação a esta última, podemos citar como exemplo, o vidro, que é transparente quando incidido de radiações visíveis e opaco à radiação infravermelha.

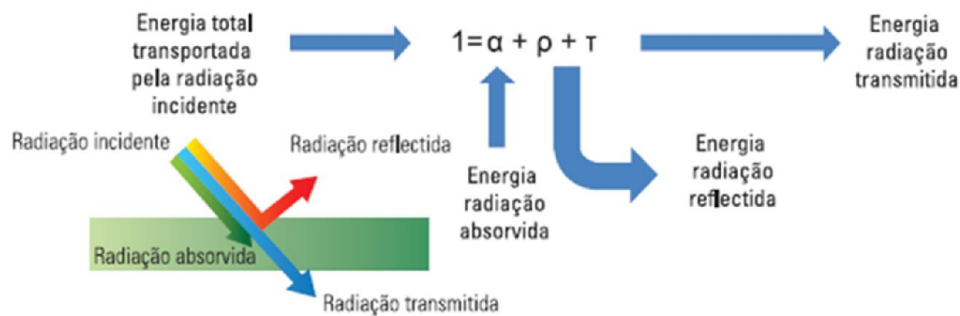


**Figura 2.33 - Energia total transportada pela radiação incidente**

Vale ressaltar ainda que superfícies pretas emitem uma maior quantidade de radiação para o mesmo intervalo de tempo que uma superfície branca, ou seja, tem um maior poder emissor. As experiências cotidianas nos confirmam também que a superfície preta é um bom absorsor.

## **2.7 Instrumentos de Medição**

A medição da irradiância solar total, a qual é a resultante da componente direta com a difusa incidentes em uma superfície é importante para o estudo da influência do clima para a geração de energia elétrica utilizando sistemas solares. Com um histórico dessas medições, é analisada a viabilidade da instalação de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos em um determinado local, garantindo o máximo aproveitamento da energia solar ao longo do ano. As medições-padrão são: radiação global e difusa no plano horizontal e radiação direta normal.

A seguir são apresentados alguns instrumentos de medida da radiação, o uso mais frequente e a classe associada ao seu desempenho [12].

### **2.7.1 Piranômetro**

São utilizados para medir a radiação global. Este equipamento possui uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, sendo uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminada. A expansão das superfícies provoca uma diferença de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar. Existe outro modelo de piranômetro que utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para coletar as medidas solarimétricas. Estes são mais utilizados, devido serem mais baratos que os equipamentos tradicionais. Porém, este aparelho apresenta limitações quanto à sua

---

sensibilidade. Entre os modelos de piranômetros há os de primeira classe (2% de precisão) e também de segunda classe (5% de precisão) [12].



**Figura 2.34 - Piranômetro**

### *2.7.2 Pireliômetro*

São utilizados para medição da radiação direta. Este possui uma pequena abertura para visualizar o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento acompanha o deslocamento do Sol o qual é constantemente ajustado para focalizar melhor a região do sensor. Atualmente os pireliômetros são autocalibráveis, possuindo uma precisão de 5% [12].



**Figura 2.35 - Pireliômetro**

### *2.7.3 Heliógrafo*

Este equipamento registra apenas a duração do brilho solar. A irradiância solar é focalizada em uma esfera de cristal sobre uma fita que, pela ação da irradiância solar, ela se

---

queima se tornando enegrecida. Assim, desse modo é medido o número de horas de insolação [12].



**Figura 2.36 - Heliógrafo**

#### *2.7.4 Actinógrafo*

Este equipamento é utilizado para medir a radiação global, semelhante ao piranômetro, porém com uma precisão menor. Ele é composto de sensores com expansão de um par bimetálico. Esses são conectados a um marcador que registram o valor instantâneo da radiação solar, quando ocorrem suas expansões. Sua precisão varia de 15 % a 20% [12].



**Figura 2.37 - Actinógrafo**

---

## 2.8 Formas de Aproveitamento da Energia Solar

Como se sabe, a energia solar tem imensas aplicações. Sem dúvida que este tipo de energia não polui, não produz ruído, sendo utilizada em sistemas com uma elevada confiabilidade e com extensa durabilidade.

A energia solar pode ser aproveitada para produção de água quente e de energia elétrica, para energia hídrica (é proveniente da evaporação da água e posteriormente transformada em chuva), etc.

Em seguida é apresentada uma figura que indica alguns tipos de aproveitamentos de energia solar [9].

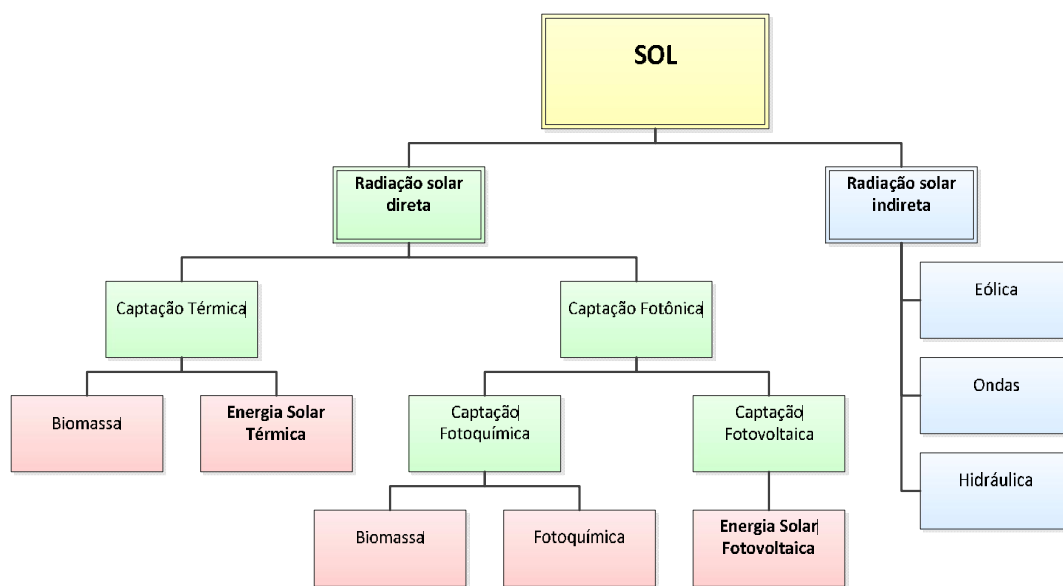


**Figura 2.38 - Organograma com os principais tipos de aproveitamento solar**

## 2.9 Aproveitamento Energético no Brasil

O Brasil, no mês de novembro do ano de 2012, contava com 2.711 empreendimentos em operação, gerando 119.750.206 kW de potência. A previsão para os próximos anos é de adicionar 47.768.708 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 187 empreendimentos atualmente em construção e mais 545 outorgadas [16].

**Tabela 2.4 - Empreendimentos em operação no Brasil**

| <b>Tipo</b>                               | <b>Quant.</b> | <b>Potência Outorgada (kW)</b> | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>%</b>   |
|-------------------------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------|------------|
| Central Geradora Hidrelétrica (CGH)       | 392           | 233.459                        | 231.829                          | 0,19       |
| Central Geradora Eolielétrica (EOL)       | 82            | 1.820.378                      | 1.814.982                        | 1,52       |
| Pequena Central Hidrelétrica (PCH)        | 428           | 4.224.397                      | 4.166.783                        | 3,48       |
| Usina Fotovoltaica (UFV)                  | 10            | 6.578                          | 2.578                            | 0          |
| Usina Hidrelétrica de Energia (UHE)       | 203           | 81.951.467                     | 79.050.714                       | 66,01      |
| Usina Termelétrica de Energia (UTE)       | 1.594         | 33.860.935                     | 32.476.320                       | 27,12      |
| Usina Termonuclear (UTN)                  | 2             | 1.990.000                      | 2.007.000                        | 1,68       |
| Central Geradora Undi-Elétrica (CGU)      | -             | -                              | -                                | 0          |
| Central Geradora Solar Fotovoltaica (SOL) | -             | -                              | -                                | 0          |
| <b>Total</b>                              | <b>2.711</b>  | <b>124.087.214</b>             | <b>119.750.206</b>               | <b>100</b> |

(Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2012)

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>

Os valores de porcentagem são referentes à potência fiscalizada. A potência outorgada é igual à considerada no ato de outorga. A potência fiscalizada é igual à considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora [16].

**Tabela 2.5 - Matriz energética do Brasil**

| <b>Tipo</b>    |                | <b>Capacidade Instalada</b> |                    | <b>%</b>   | <b>Total</b>         |                    | <b>%</b>   |
|----------------|----------------|-----------------------------|--------------------|------------|----------------------|--------------------|------------|
|                |                | <b>N.º de Usinas</b>        | <b>(kW)</b>        |            | <b>N.º de Usinas</b> | <b>(kW)</b>        |            |
| Hidro          |                | 1.023                       | 83.449.326         | 65,24      | 1.023                | 83.449.326         | 65,24      |
| Gás            | Natural        | 105                         | 11.550.013         | 9,03       | 145                  | 13.381.696         | 10,46      |
|                | Processo       | 40                          | 1.831.683          | 1,43       |                      |                    |            |
| Petróleo       | Óleo Diesel    | 956                         | 3.420.098          | 2,67       | 990                  | 7.345.609          | 5,74       |
|                | Óleo Residual  | 34                          | 3.925.511          | 3,07       |                      |                    |            |
| Biomassa       | Bagaço de Cana | 359                         | 8.074.984          | 6,31       | 445                  | 9.801.470          | 7,66       |
|                | Licor Negro    | 14                          | 1.235.643          | 0,97       |                      |                    |            |
|                | Madeira        | 45                          | 379.235            | 0,30       |                      |                    |            |
|                | Biogás         | 19                          | 79.000             | 0,06       |                      |                    |            |
|                | Casca de Arroz | 8                           | 32.608             | 0,03       |                      |                    |            |
| Nuclear        |                | 2                           | 2.007.000          | 1,57       | 2                    | 2.007.000          | 1,57       |
| Carvão Mineral | Carvão Mineral | 10                          | 1.944.054          | 1,52       | 10                   | 1.944.054          | 1,52       |
| Eólica         |                | 82                          | 1.814.982          | 1,42       | 82                   | 1.814.982          | 1,42       |
| Importação     | Paraguai       |                             | 5.650.000          | 5,46       |                      | 8.170.000          | 6,39       |
|                | Argentina      |                             | 2.250.000          | 2,17       |                      |                    |            |
|                | Venezuela      |                             | 200.000            | 0,19       |                      |                    |            |
|                | Uruguai        |                             | 70.000             | 0,07       |                      |                    |            |
| <b>Total</b>   |                | <b>2.709</b>                | <b>127.921.065</b> | <b>100</b> | <b>2.709</b>         | <b>127.921.065</b> | <b>100</b> |

(Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2012)

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>

---

Com relação à matriz energética brasileira, para a geração de energia elétrica, a Tabela 2.5 apresenta os tipos de fontes primárias renováveis e não renováveis empregadas.

A Tabela 2.5 mostra que 74,32% da potência instalada se refere a fontes de energia renováveis (hidrelétrica, biomassa e eólica), 19,29% destas não são renováveis (gás, petróleo, carvão mineral e nuclear) e os outros 6,39% são provenientes de importação.

Observa-se que o Brasil ainda está bastante confortável em relação ao uso de energia renovável em sua matriz elétrica. Porém, a grande maioria das usinas são do tipo hidrelétricas, com isso a capacidade de geração de eletricidade fica condicionada às chuvas. Outro problema está na expansão da potência instalada brasileira. A Amazônia e sua enorme bacia hidrográfica, para o bem ou para o mal, parece ter sido apontada como a nova fronteira da geração hidroelétrica no Brasil. Contudo, a planície amazônica e a gigantesca floresta, envolve uma problemática própria para a construção, operação e aproveitamento hidroelétrico devido ao impacto ambiental e social. Diante destes entraves, para viabilizar os aproveitamentos hidroelétricos do Complexo Tapajós, no Rio Tapajós na Amazônia, a Eletrobrás elaborou o conceito de Usina Plataforma, similar às plataformas de petróleo, com a preocupação de baixo impacto ambiental e social, não apenas na operação da usina, mas também na construção [17]. A preparação da obra começa com a intervenção na natureza praticamente reduzida à área da usina e com pequenos canteiros de obra. Durante a construção, a permanência dos trabalhadores no local é de curto prazo, o que ajuda a reduzir o impacto ambiental, e evita a atração de contingentes populacionais e a construção de cidades no entorno do empreendimento. Não haverá vilas permanentes para os empregados, como aconteceu até hoje. Os trabalhadores poderão ir de helicóptero para o local das usinas, trabalhando por turnos, como acontece nas plataformas de petróleo [18].

Em relação à contribuição para o efeito estufa, as hidrelétricas não são tão limpas como se imagina, pois, com a formação dos lagos, ocorre a liberação do gás carbônico e metano para a atmosfera devido à fermentação dos materiais orgânicos submersos. Há casos, como na hidrelétrica de Balbina, localizada em Manaus, que a contribuição para o efeito estufa chega a ser cinco vezes a de uma usina a carvão de mesma potência [19].

### *2.9.1 Aproveitamento da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil*

O Brasil, em novembro de 2012, contava com 10 empreendimentos de geração de energia fotovoltaica – UFV<sup>39</sup> em operação, totalizando uma potência instalada de 2.578 kW.

---

<sup>39</sup> Usina Fotovoltaica.

Este número, em percentagem, é inexpressivo diante das outras formas de produção de energia no Brasil. A Tabela 2.6 apresenta as usinas fotovoltaicas em operação no Brasil com suas respectivas potências outorgada e fiscalizada, localização e proprietário.

**Tabela 2.6 - Usinas fotovoltaicas em operação no Brasil**

| Usina                       | Potência Outorgada (kW) | Potência Fiscalizada (kW) | Proprietário                                                     | Município          |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Araras - RO                 | 20,48                   | 20,48                     | 100% para Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária | Nova Mamoré - RO   |
| Tauá                        | 5.000                   | 1.000                     | 100% para MPX Tauá Energia Solar Ltda.                           | Tauá - CE          |
| IEE                         | 12,26                   | 12,26                     | 100% para Instituto de Eletrotécnica e Energia                   | São Paulo - SP     |
| UFV IEE/Estacionamento      | 3                       | 3                         | 100% para Instituto de Eletrotécnica e Energia                   | São Paulo - SP     |
| Embaixada Italiana Brasília | 50                      | 50                        | 100% para Embaixada Italiana em Brasília                         | Brasília - DF      |
| PV Beta Test Site           | 1,70                    | 1,70                      | 100% para DuPont do Brasil S.A                                   | Barueri - SP       |
| Pituaçu Solar               | 404,80                  | 404,80                    | 100% para Superintendência dos Desportos do Estado da Bahia      | Salvador - BA      |
| Aeroporto Campo de Marte    | 2,12                    | 2,12                      | 100% para Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária     | São Paulo - SP     |
| Tanquinho                   | 1.082                   | 1.082                     | 100% para SPE CPFL Solar 1 Energia S.A.                          | Campinas - SP      |
| Silva Neto I                | 1,70                    | 1,70                      | 100% para João Bento da Silva Neto                               | Florianópolis - SC |
| Total: 10 Usina(s)          |                         |                           | Potência Total: 2.578,06 kW                                      |                    |

(Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2012)  
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=12&fase=3>

### 2.9.2 Perspectivas Para o uso de Energias Renováveis no Brasil

Em artigo publicado no dia 29 de maio de 2012, intitulado “O novo ouro brasileiro”, Miguel Setas (Vice Presidente na EDP Energias do Brasil S/A) relata que a *Bloomberg New Energy Finance* noticiou que o Brasil, juntamente com a Alemanha, Austrália, Dinamarca, Espanha, Itália e Portugal, atingiu a chamada *grid parity* (paridade com a rede), ou seja, o preço da energia gerada com painéis fotovoltaicos tornou-se competitivo face ao preço da energia da rede [20].

---

No dia 17 de Abril, a ANEEL publicou a Resolução Normativa 482, que veio estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração (menor ou igual a 100 kW) e minigeração (superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW) distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e apresentar o sistema de compensação de energia elétrica [21]. Por isso, no Brasil passará a ser possível instalar painéis fotovoltaicos nas residências ou escritórios, e consumir a energia produzida por esses sistemas, pagando à distribuidora somente o diferencial da energia consumida da rede (consumo líquido). Caso haja excedentes de produção, estes poderão ser utilizados, como créditos, num período de até 36 meses [20].

Esta resolução é um primeiro passo para a construção do mercado de energia solar no Brasil, que, por agora, é quase inexistente. No entanto, não podemos deixar de notar que o modelo adotado pode agravar ainda mais as assimetrias tarifárias existentes no continente brasileiro. Na prática, esta regulação cria maiores incentivos para a instalação de sistemas fotovoltaicos onde existe abundante recurso solar e onde as tarifas da rede são mais elevadas, como por exemplo, em alguns estados do Nordeste brasileiro. Estes sistemas, por *canibalizarem* os consumos da energia fornecida pelas empresas distribuidoras, reduzem a utilização das redes elétricas sem que seja diminuído o seu custo global. Um efeito que pode impactar o setor no médio/longo prazo. Mas, esta resolução da ANEEL é um avanço importante, porque abriu mais um grande mercado para as empresas que atuam no segmento da energia renovável. E em breve podemos vir a assistir a uma corrida ao novo "ouro brasileiro" - o Sol [20].

## **2.10 Sistemas Solares**

### *2.10.1 Introdução*

A conversão da energia solar pode ser utilizada numa enorme variedade de aplicações. Existem duas formas diferentes de utilizar a energia solar: (1) ativa, onde ocorre a transformação dos raios solares noutras formas de energia como térmica e elétrica; e (2) passiva, onde há o aproveitamento da energia para aquecimento de edifícios ou prédios, por meio de concepções e estratégias construtivas.

---

## 2.10.2 Aquecimento Solar

### 2.10.2.1 Aquecimento Solar Passivo

O aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento de ambientes, denominado aquecimento solar passivo, decorre da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, reduzindo-se, com isso, as necessidades de iluminação e aquecimento. Assim, um melhor aproveitamento da radiação solar pode ser feito com o auxílio de técnicas mais sofisticadas de arquitetura e construção.

### 2.10.2.2 Aquecimento Solar Ativo

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são mais usados em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais etc.) para o aquecimento de água (higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes). Os concentradores solares destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor. Neste último caso, pode-se gerar energia mecânica com o auxílio de uma turbina a vapor, e, posteriormente, eletricidade, por meio de um gerador.

#### 2.10.1.1.1 Coletor Solar

A radiação solar pode ser absorvida por coletores solares, principalmente para aquecimento de água, a temperaturas relativamente baixas (inferiores a 100°C). O uso dessa tecnologia ocorre predominantemente no setor residencial, mas há demanda significativa e aplicações em outros setores, como edifícios públicos e comerciais, hospitais, restaurantes, hotéis e similares. Esse sistema de aproveitamento térmico da energia solar, também denominado aquecimento solar ativo, envolve o uso de um coletor solar discreto. O coletor é instalado normalmente no teto das residências e edificações. Devido à baixa densidade da energia solar que incide sobre a superfície terrestre, o atendimento de uma única residência pode requerer a instalação de vários metros quadrados de coletores. Para o suprimento de água quente de uma residência típica (três ou quatro moradores), são necessários cerca de 4 m<sup>2</sup> de coletor. Um exemplo de coletor solar plano é apresentado na Figura 2.39 [1].

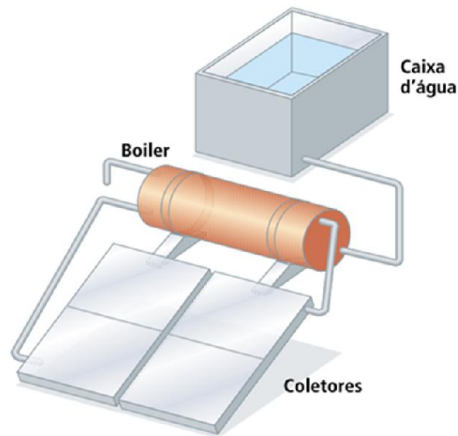


**Figura 2.39 - Ilustração de um sistema solar de aquecimento de água**

#### 2.10.1.1.2 Concentrador Solar

O aproveitamento da energia solar aplicado a sistemas que requerem temperaturas mais elevadas ocorre por meio de concentradores solares, cuja finalidade é captar a energia solar incidente numa área relativamente grande e concentrá-la numa área muito menor, de modo que a temperatura desta última aumente substancialmente. A superfície refletora (espelho) dos concentradores tem forma parabólica ou esférica, de modo que os raios solares que nela incidem sejam refletidos para uma superfície bem menor, denominada foco, onde se localiza o material a ser aquecido. Os sistemas parabólicos de alta concentração atingem temperaturas bastante elevadas e índices de eficiência que variam de 14% a 22% de aproveitamento da energia solar incidente, podendo ser utilizada para a geração de vapor e, conseqüentemente, de energia elétrica. Contudo, a necessidade de focalizar a luz solar sobre uma pequena área exige algum dispositivo de orientação, acarretando custos adicionais ao sistema, os quais tendem a ser minimizados em sistemas de grande porte. Entre meados e final dos anos 1980, foram instalados nove sistemas parabólicos no sul da Califórnia, EUA, com tamanhos que variam entre 14 MW e 80 MW, totalizando 354 MW de potência instalada. Trata-se de sistemas híbridos, que operam com auxílio de gás natural, de modo a atender a demanda em horários de baixa incidência solar. Os custos da eletricidade gerada têm variado entre US\$ 90 e US\$ 280 por megawatt-hora. Recentes melhoramentos têm sido feitos, visando a reduzir custos e aumentar a eficiência de conversão. Em lugar de pesados espelhos de vidro, têm-se empregado folhas circulares de filme plástico aluminizado [1].

---

### 2.10.3 Conversão de Energia Solar em Elétrica

Além dos processos térmicos supracitados, a radiação solar pode ser diretamente convertida em energia elétrica, por meio de efeitos da radiação sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Entre esses, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico. O primeiro se caracteriza pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, quando tal junção está a uma temperatura mais elevada do que as outras extremidades dos fios. Embora muito empregado na construção de medidores de temperatura, seu uso comercial para a geração de eletricidade tem sido impossibilitado pelos baixos rendimentos obtidos e pelos custos elevados dos materiais [1].

#### 2.10.3.1 Efeito Termoelétrico

Os efeitos termoelétricos estão presentes nos metais e ligas, e alguns deles chamados "efeitos de junção" só aparecem em junções de diferentes metais. Nos metais, estes efeitos apresentam eficiência de no máximo 3%. Porém, nos semicondutores esta eficiência pode chegar a 20%, conforme resultados apresentados pelo *Jet Propulsion Laboratory* - JET<sup>40</sup> da NASA [22].

Os efeitos termoelétricos conhecidos para materiais homogêneos são: Efeito Joule, Efeito Thomson, e Efeito Bridgman. Já para as junções de materiais, temos: Efeito Peltier e Efeito Seebeck.

O Efeito Joule é caracterizado pela potência elétrica dissipada por um material que apresenta resistência ôhmica é proporcional ao quadrado do fluxo de intensidade da corrente elétrica que o atravessa, independentemente do sentido que este fluxo de corrente possua no material.

O Efeito Thomson existe quando uma quantidade extra de calor é liberada ou absorvida por um condutor homogêneo, quando submetido a um gradiente térmico ou diferenças de temperatura e atravessado por um fluxo de corrente elétrica. Este calor depende do sentido do fluxo de corrente elétrica em relação ao sentido do gradiente térmico aplicado.

O Efeito Peltier, descoberto em 1834, ao contrário do que ocorre no efeito Seebeck, ocorre quando um fluxo de corrente atravessa um corpo formado por uma junção de dois materiais diferentes faz surgir uma quantidade de calor que será liberada ou absorvida nas vizinhanças da fronteira entre estes dois materiais. Este calor depende do sentido do fluxo de

---

<sup>40</sup> JET – Jet Propulsion Laboratory.

---

corrente elétrica em relação à junção. Se houver uma variação na direção ou no módulo do fluxo de corrente elétrica com a posição em qualquer trecho do material, então aparecerá um "Efeito Peltier secundário" interno, produzindo uma absorção ou liberação de calor naquele trecho. Este efeito é chamado de Efeito Bridgman. O Efeito Peltier em junções metálicas, em geral, é mascarado pelo efeito do aquecimento Joule. Por isso o uso de materiais semicondutores nos permite ter este efeito pronunciado de modo a permitir seu uso em dispositivos para refrigeração.

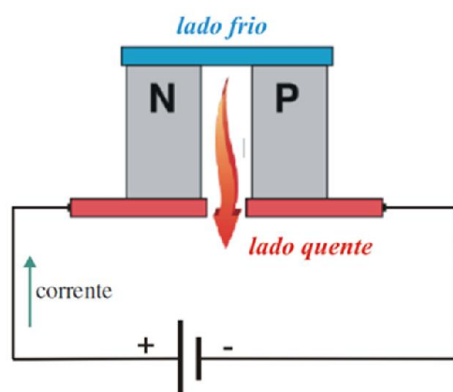


**Figura 2.40 - Efeito Peltier: o fluxo de corrente elétrica desloca o calor**

O Efeito Seebeck acontece quando dois condutores diferentes (ligados por uma junção) são submetidos a um gradiente de temperatura, ocorrendo o aparecimento de uma diferença de potencial elétrica entre as extremidades fria e quente, fazendo com que uma corrente elétrica percorra os condutores, isso se o circuito for um caminho fechado. A tensão e a corrente dependem do sentido do gradiente térmico em relação à junção. Thomas Seebeck descobriu este efeito em 1821. Este fenômeno é muito usado para medição precisa de temperatura com o que chamamos de termopares. Para geração termoelétrica este efeito é otimizado com o uso de materiais semicondutores.

Os efeitos descritos acima são simultâneos, pois se acham presentes no mesmo material, desde que as condições de material homogêneo ou junção, gradientes térmicos e circuitos fechados para a condução de corrente elétrica sejam satisfeitas [22]. Sensores termoelétricos são baseados em dois efeitos que são reversíveis (diferentes dos irreversíveis por efeito Joule), o Efeito Peltier e o Efeito Thomson.

---

### 2.10.3.2 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar.

#### 2.10.3.2.1 Breve Histórico

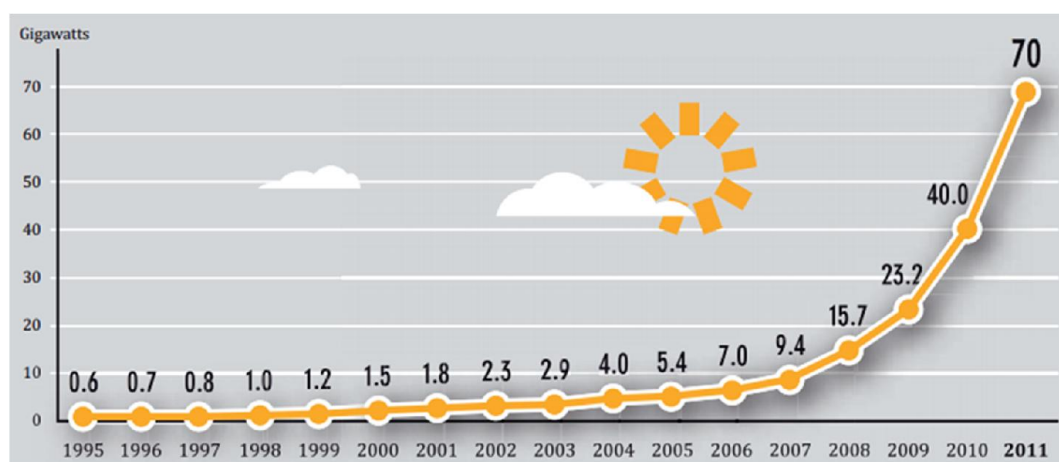
O físico francês Alexandre Edmond Becquerel (1820 - 1891) foi o primeiro a descobrir o efeito fotovoltaico, em 1839. O físico notou que certos materiais, quando expostos à luz, apresentavam uma pequena diferença de potencial nos extremos de sua estrutura. Em 1873 o professor inglês Willoughby Smith (1828 - 1891) descobriu o efeito fotovoltaico no selênio e, alguns anos depois, juntamente com seu aluno William G. Adams (1836 - 1915) também notou este efeito em junções de platina e selênio. Essas descobertas serviram de base para que o americano Charles Fritts, em 1883 desenvolvesse o primeiro protótipo de célula fotovoltaica. As células eram feitas de selênio e possuíam uma camada fina de ouro. O preço de confecção de cada célula era muito elevado e o rendimento das células era de cerca de 1,5% [23].

Em 1954, pesquisadores do laboratório *Bell Labs* nos Estados Unidos descobriram acidentalmente que diodos de junção p-n produziam tensão quando as luzes do laboratório estavam acesas. A partir desse evento, pesquisas feitas nesse laboratório levaram à confecção de uma célula de silício p-n com eficiência de aproximadamente 6% apenas um ano depois. Houve então um grande interesse nessa tecnologia, uma vez que se propôs a utilização de células solares fotovoltaicas para fornecer energia elétrica para satélites [24].

A partir da década de 60 o tema energia solar atraiu o interesse de diversas instituições, que passaram a investir em novas descobertas nessa área. Em 1958 a NASA lançou o satélite *Vanguard*, cuja energia reserva era produzida a partir de células fotovoltaicas de silício. Em 1959 a *Hoffmans Electronics* dos Estados Unidos apresentou células de silício com eficiência de 10%. No Japão em 1963 apareceram os primeiros módulos fotovoltaicos no comércio. Em 1973, a crise mundial do petróleo provocou o interesse de muitas nações na busca de energias alternativas e a energia fotovoltaica chamou a atenção de muitos devido à construção da primeira residência alimentada por painéis fotovoltaicos na Universidade de *Delaware*, nos Estados Unidos. Na década de 80 surgiu a primeira célula de filme fino. Nessa mesma década foi instalado no Canadá um sistema com 6 MW e foi testado na Austrália a primeira célula com eficiência maior do que 20%. Em 1995 uma iniciativa alemã propôs a larga utilização de

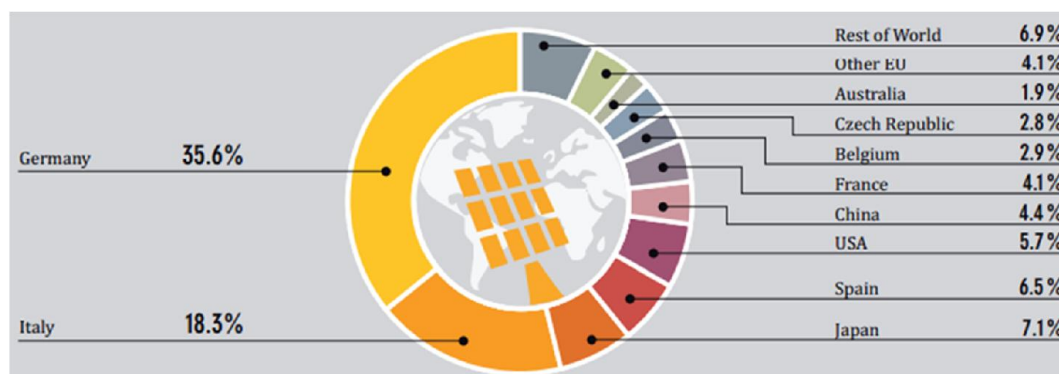
sistemas fotovoltaicos residenciais, o que impulsionou a criação de legislações para a geração e utilização da energia solar fotovoltaica em vários países. No ano de 1997 a potência instalada fotovoltaica mundial atingiu a marca de 100 MW e dois anos depois, em 1999, a potência instalada mundial subiu para 1000 MW. No ano de 2000 foi concebido na Austrália o primeiro bacharelado em engenharia solar e fotovoltaica. Em 2002 a potência instalada mundial atingiu a marca de 2000 MW, o dobro do valor registrado três anos antes [24].

A Figura 2.41 apresenta a capacidade mundial total de geração de energia elétrica oriunda das plantas fotovoltaicas, de 1995 até o ano de 2011. Já a Figura 2.42 mostra dos 10 países com maior capacidade operacional de plantas fotovoltaicas em 2011 [25].



(Fonte: Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>ST</sup> Century – REN21, 2012)  
<http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012.pdf>

**Figura 2.41 - Capacidade mundial total solar fotovoltaica, 1995-2011**



(Fonte: Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>ST</sup> Century – REN21, 2012)  
<http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012.pdf>

**Figura 2.42 - Lista dos 10 países com maior capacidade operacional de plantas FV, 2011**

---

#### 2.10.3.2.2 A Célula Solar e o Efeito Fotovoltaico

Células solares convertem luz solar em eletricidade. Isso ocorre devido à utilização de materiais semicondutores, como o silício, que emitem elétrons quando são atingidos por um feixe de fótons. Como resultado tem-se uma diferença de potencial entre os extremos do material. O mesmo efeito pode ser observado, por exemplo, com a utilização de eletrodos conectados a um sistema líquido, porém praticamente todos os sistemas compostos por células solares convencionais utilizam semicondutores [26].

Uma célula solar é composta basicamente de duas camadas finas compostas cada uma por um material semicondutor distinto. Uma camada é a camada positiva,  $p$ , e a outra é a camada negativa,  $n$ . A Figura 2.43 apresenta a estrutura de uma célula solar típica.

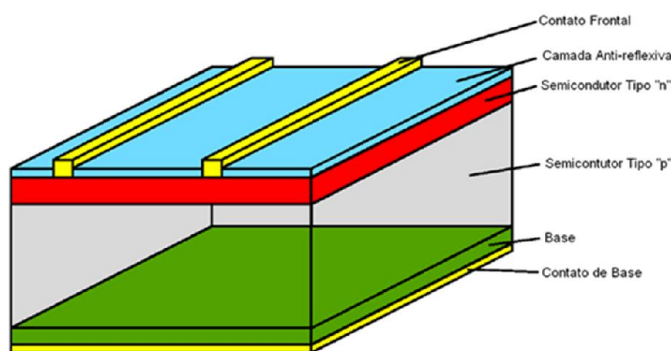


**Figura 2.43 - Estrutura típica de uma célula solar fotovoltaica**

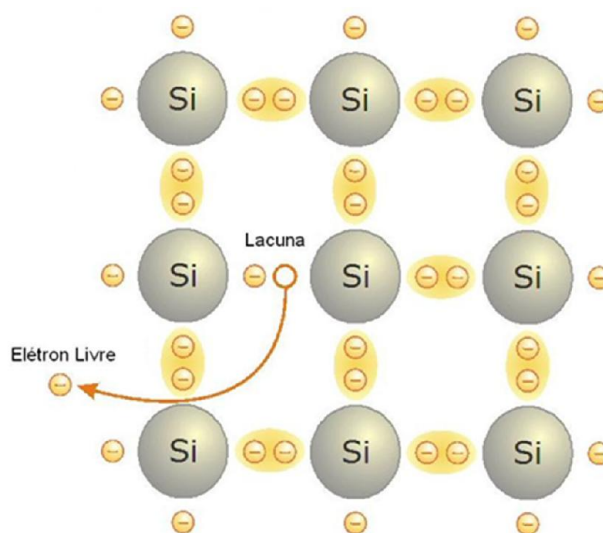
Quando a camada  $n$  é exposta à luz solar, ela passa a ser constantemente atingida por fótons, que transferem energia para os elétrons da camada de valência dos átomos do material semicondutor. Cada fóton pode transferir energia para apenas um elétron. Quando o fóton transfere energia suficiente para que o elétron da camada de valência dê um salto quântico, este deixa de fazer parte da eletrosfera do átomo de material semicondutor e pode mover-se livremente. Caso a energia transferida pelo fóton não seja suficiente para que o elétron avance para um nível mais energético, essa energia é convertida em energia cinética para o átomo e como consequência tem-se o aquecimento da célula solar. Em uma célula solar, os elétrons são atingidos por fótons de diferentes comprimentos de onda e transferem diferentes quantidades de energia para os elétrons da camada de valência dos átomos do material semicondutor, fazendo com que alguns deles tornem-se elétrons livres e outros apenas

---

aqueçam a célula solar. À conversão de luz solar em eletricidade dá-se o nome de efeito fotovoltaico [27].

Quando um átomo da camada n libera um elétron, tem-se uma lacuna na camada de valência do átomo e este passa a ter carga positiva. Elétrons da camada p são atraídos pelas cargas positivas da camada n e deixam suas camadas de valência da camada p para ocupar as lacunas existentes na camada n. Assim tem-se carga positiva na camada p devido à falta de elétrons e carga negativa na camada n devido ao excesso de elétron [28].

Um átomo de silício possui quatro elétrons na sua camada de valência. Para estabelecer uma configuração elétrica estável similar à do gás nobre Argônio, os átomos de silício compartilham pares de elétrons, como mostrado na Figura 2.44. Ao receber energia proveniente de um fóton, um elétron da camada de valência do átomo de silício desprende-se da eletrosfera do átomo e torna-se um elétron livre.



Fonte: [28] - Adaptado

**Figura 2.44 - Ligação entre átomos de silício (lacuna e elétron livre)**

Quando estabelecido um circuito elétrico com uma carga resistiva entre as camadas p e n, tem-se a circulação dos elétrons livres da camada n em direção as lacunas da camada p, como mostrado na Figura 2.45.

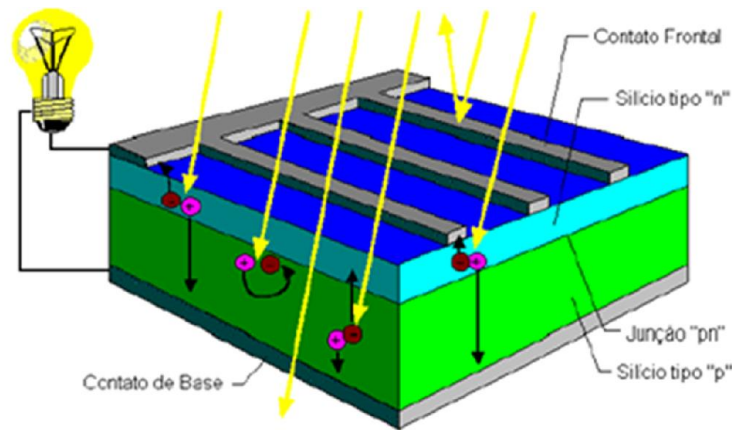


**Figura 2.45 - Célula solar com carga resistiva**

Apenas uma parte da irradiação solar incidente sobre uma célula solar fotovoltaica é convertida em eletricidade, absorvida. Apenas fótons cuja energia é compatível com a energia necessária para o salto quântico dos elétrons da camada de valência são capazes de produzir corrente elétrica. Fótons que possuem uma quantidade de energia não compatível caracterizam perdas (queda de rendimento) para o sistema fotovoltaico. Outras perdas são provocadas pelos efeitos de reflexão e transmissão dos fótons, como mostrado na Figura 2.46 a seguir.

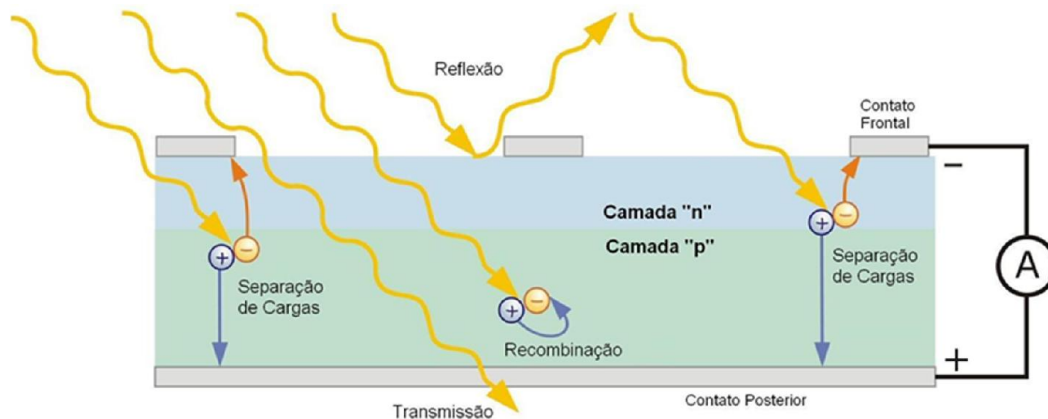


**Figura 2.46 - Célula solar fotovoltaica sob irradiação solar**

A tecnologia de implementação de semicondutores na geração fotovoltaica foi amadurecendo. Nesse contexto de evolução de tecnologia, diversos semicondutores se destacaram, dentre alguns podemos citar o silício cristalino (c-Si<sup>41</sup>), Silício amorfo

<sup>41</sup> c-Si : Silício cristalino.

hidrogenado (a-Si:H<sup>42</sup> ou simplesmente a-Si), Telureto de cádmio (CdTe<sup>43</sup>), disseleneto de cobre e índio (CuInSe<sub>2</sub> ou CIS<sup>44</sup>) e disseleneto de cobre, gálio e índio (CuInGaSe<sub>2</sub> ou CIGS<sup>45</sup>).

#### 2.10.4 Tipos de Células Fotovoltaicas e suas Curvas Características

Existem diversos tipos de células solares fotovoltaicas. Cada tecnologia apresenta características elétricas próprias. As características elétricas mais utilizadas para descrever o comportamento da célula são mostradas na Tabela 2.7 a seguir:

**Tabela 2.7 - Parâmetros elétricos característicos de uma célula solar**

| Grandeza                   | Símbolo   | Unidade           | Descrição                                                                     |
|----------------------------|-----------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Tensão de circuito aberto  | $U_o$     | [V]               | Tensão obtida nos terminais da célula em circuito aberto (STC <sup>46</sup> ) |
| Corrente de curto circuito | $I_k$     | [A]               | Corrente de curto circuito da célula (STC)                                    |
| Tensão MPP <sup>47</sup>   | $V_{MPP}$ | [V]               | Tensão da célula para operação no ponto de máxima potência (STC)              |
| Corrente MPP               | $I_{MPP}$ | [A]               | Corrente da célula para operação no ponto de máxima potência (STC)            |
| Potência MPP               | $P_{MPP}$ | [W <sub>p</sub> ] | Potência máxima da célula (STC)                                               |
| Rendimento                 | $\eta$    | %                 | Porcentagem da energia incidente convertida em energia elétrica.              |

O ponto de máxima potência, citado na tabela anterior, é o ponto no qual a célula fornece a maior quantidade de potência possível. A Figura 2.47 apresenta, em azul, a curva característica da corrente versus a tensão da célula solar e, em vermelho, a curva da potência versus a tensão da célula solar. No mesmo gráfico, em alaranjado, tem-se as linhas que definem os valores de corrente e tensão do ponto de máxima potência.

<sup>42</sup> a-Si:H ou a-Si: Silício amorfo hidrogenado.

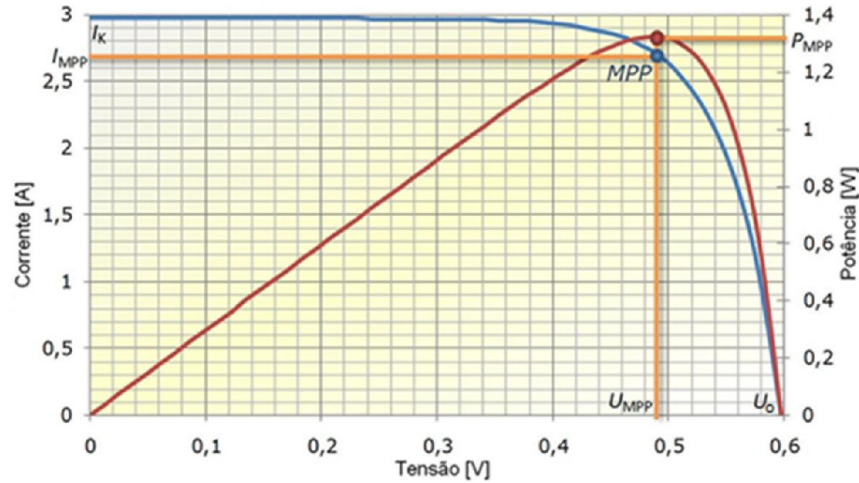
<sup>43</sup> CdTe: Telureto de cádmio.

<sup>44</sup> CuInSe<sub>2</sub> ou CIS: Disseleneto de cobre e índio.

<sup>45</sup> CuInGaSe<sub>2</sub> ou CIGS: Disseleneto de cobre, gálio e índio.

<sup>46</sup> STC - Condições de teste padrão (em inglês: *Standard Test Conditions*).

<sup>47</sup> MPP - Ponto de máxima potência (em inglês: *Maximum Power Point*).



Fonte: [28] – Adaptado.

**Figura 2.47 - Curvas características de um painel fotovoltaico**

Além das características elétricas, outro fator é utilizado para avaliar a qualidade das células solares. Esse fator é denominado fator de preenchimento ( $F_p$ ) e quantifica a semelhança da curva corrente *versus* tensão da célula com o retângulo de máxima potência, mostrado na cor alaranjada no gráfico anterior. O valor de  $F_p$  é sempre menor do que um e pode ser calculado segundo a seguinte equação:

$$F_p = \frac{(P_{mpp})}{(U_o \cdot I_K)} = \frac{(U_{mpp} \cdot I_{mpp})}{(U_o \cdot I_K)} \quad (2.10)$$

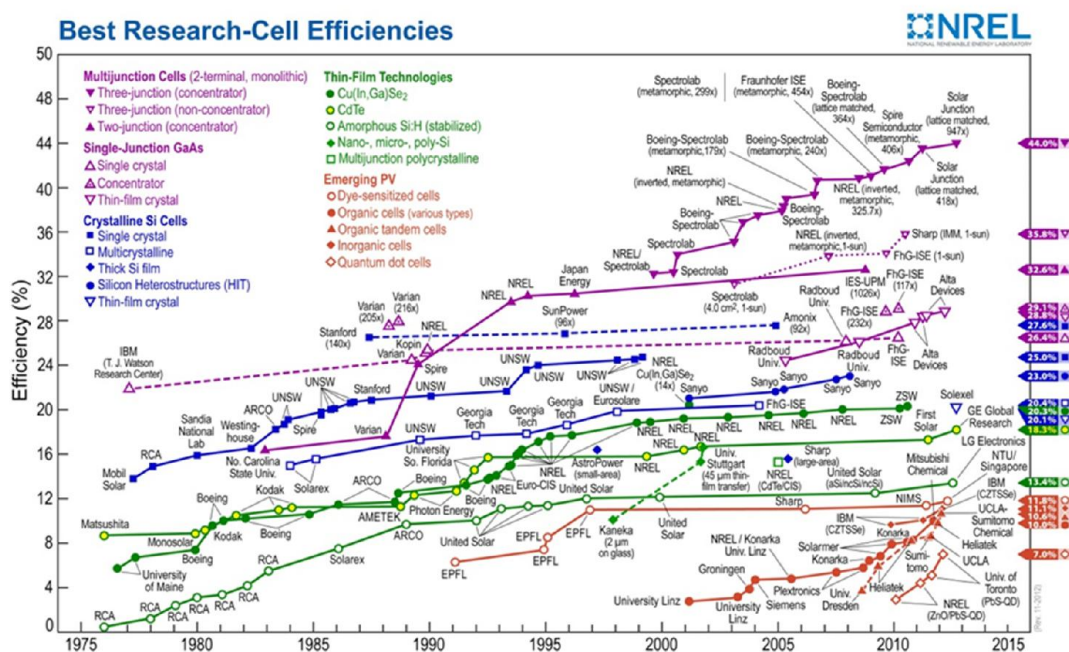
No cálculo de  $F_p$  são utilizados os valores de tensão de circuito aberto ( $U_o$ ) e corrente de curto-circuito ( $I_K$ ). O ponto de máxima potência da célula solar também é utilizado no cálculo do rendimento da célula. O rendimento relaciona a máxima potência que a célula pode fornecer com a potência fornecida à célula em forma de irradiação solar. Seu valor significa o percentual de energia solar incidente que é transformado em energia elétrica pela célula. O cálculo do rendimento pode ser feito segundo a equação a seguir:

$$\eta = \frac{(P_{mpp})}{(P_{sol})} = \frac{(F_p \cdot U_o \cdot I_K)}{(P_{sol})} \quad (2.11)$$

O rendimento de células solares varia de acordo com o material constituinte e aspectos construtivos.

As células solares tradicionais, primeira geração, são feitas de silício, são normalmente de placa plana, e geralmente, são as mais eficientes. A segunda geração é chamada de células solares de película fina, porque são feitas de materiais de silício amorfo ou de materiais diferentes do silício como telureto de cádmio. Células solares de película fina utilizam camadas de materiais semicondutores apenas alguns micrômetros de espessura. Devido à sua flexibilidade, as células solares de filme fino são ligeiramente dobráveis.

A terceira geração de células solares é feita a partir de novos materiais, além de silício, incluindo tintas solares impressas por impressão convencional, corantes solares, e plásticos condutores. As novas células solares usam lentes de plástico ou espelhos para concentrar a luz solar em um pequeno pedaço de material fotovoltaico de alta eficiência. Este material é caro, mas é necessário somente uma pequena quantidade. Esses sistemas estão se tornando rentáveis para uso por prédios públicos e na indústria. No entanto, como as lentes devem ser viradas para o sol, a utilização de coletores concentradores está limitada às partes do país mais ensolaradas [29]. A Figura 2.48 ilustra a eficiência dos principais tipos de células fotovoltaicas.



[http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg)

**Figura 2.48 - Eficiência das células solares**

---

Além das clássicas células fotovoltaicas feitas de silício cristalizado, existem outros tipos, produzidas com materiais diferenciados, visando maior eficiência ou menor custo. As células fotovoltaicas de película fina foram a grande aposta para o futuro da energia solar fotovoltaica, mas o aprimoramento das técnicas de produção e a fabricação em larga escala tornaram as células de silício cristalizado mais viáveis comercialmente [30].

As células fotovoltaicas de silício cristalizado são assim chamadas porque a matéria prima é o silício em forma de cristal (Figura 2.49), que depois de purificado em 99,9% e dopado, é resfriado, cristalizado e fatiado em lâminas para a criação das células. Como o silício é o segundo material mais abundante na crosta terrestre (o primeiro é o oxigênio), está disponível em quantidade quase ilimitada. Infelizmente o silício está sempre misturado a outros materiais, principalmente o oxigênio, e sua purificação é um processo trabalhoso. A purificação do silício começa com a adição de carbono (e forma de carvão), em um forno de arco-voltaico, para que esse combine com o oxigênio, sendo liberado  $\text{CO}_2$ . Com esse processo consegue-se silício com até 98% de pureza (chamado de grau-metalúrgico), que ainda é demasiado impuro, sendo necessário mais uma etapa de purificação. Esta etapa consiste em misturar, ao silício, quantidades controladas de ácido hidrocloreídrico, o que iniciará a formação de hidrogênio e triclorosilano que é, em seguida, destilado até obter o silício, na maioria das vezes através de um processo de deposição de vapor. No processo chamado de *Siemens*, o triclorosilano é misturado a hidrogênio, em um reator com temperaturas entre  $1.000^\circ\text{C}$  e  $1.200^\circ\text{C}$ , juntamente com finas varetas de silício, onde o silício do triclorosilano se depositará. As varetas de silício crescem em diâmetro em torno de 10 cm a 15 cm, sendo utilizadas para a fabricação do silício policristalino e monocristalino [30].



**Figura 2.49 - Silício Cristalizado**

---

#### 2.10.4.1 Silício Monocristalino

Para a fabricação das células monocristalinas, o silício purificado, mas em forma de policristal, tem que ser transformado em um único cristal, o que é feito através do Processo *Czochralsky* (pronuncia-se xô-rálsqui), que consiste em derreter o novamente o silício em um cadinho de quartzo, em temperatura em torno de 1420 °C. Uma semente de monocristal de silício é inserida no cadinho e, à medida que o mosto é resfriado, o cadinho e a semente giram. O cristal semente é vagarosamente erguido do cadinho, orientando a formação de um novo cristal único de silício (monocristal) de aproximadamente 30 cm de diâmetro e vários metros de comprimento. Esse monocristal será cortado em um formato (semi) quadrado e depois fatiado em lâminas (chamadas de *waffers*), com espessura de aproximadamente 0,3 mm. O pó de serragem, liberado durante a serragem é derretido novamente, junto com as partes cônicas do cilindro de silício. As lâminas serão tratadas quimicamente para a remoção de rebarbas, que desbasta até 0,01 mm de cada lado. Começando com as lâminas já devidamente dopadas com boro, ou seja, do tipo-P, será criada uma camada superior do tipo-N, através do processo de difusão de vapor de fósforo em um forno de difusão a temperaturas em torno de 800°C a 900 °C, criando a junção-PN. Depois de aplicada uma camada de material antirreflexo, serão impressos os contatos frontais e traseiros, e por fim as células são desbastadas nas laterais para a remoção de possíveis causadores de curto-circuitos [30].



**Figura 2.50 - Célula de silício monocristalino**

---

#### 2.10.4.2 Silício Policristalino

O silício purificado, como explicado anteriormente, é derretido em um cadinho de quartzo e moldado em forma de cubo e, através de um processo controlado de aquecimento e resfriamento, o bloco se solidificará em uma única direção, de maneira a conseguir uma formação cristalina o mais homogênea possível. Como o silício cristaliza livremente, há a formação de vários cristais, por isso o nome: policristalino. Os vários cristais aumentam as perdas por recombinação, fazendo com que as células de silício policristalino sejam menos eficientes que as de silício monocristalino. Durante o processo de solidificação são criados lingotes de silício policristalino que serão serrados em barras, utilizando uma serra fio e depois cortados em lâminas (*wafers*) de aproximadamente 0.3 mm de espessura, mais uma vez por uma serra fio. Todo esse processo de serragem provoca perdas de material na forma de pó de serragem. O silício já é dopado com a impureza tipo-P (geralmente boro) durante a purificação. Após a serragem e limpeza, as lâminas serão dopadas com fósforo (em apenas uma face), será aplicada uma camada de material antirreflexo (que aumentará a absorção luminosa) e, por fim, serão impressos os contatos frontais e traseiros [30].

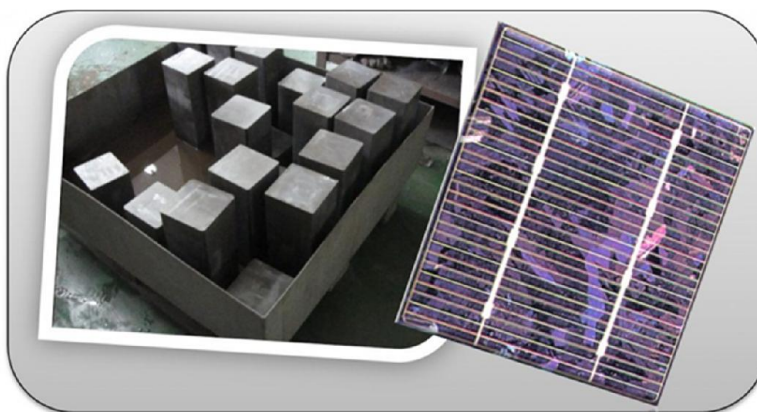


**Figura 2.51 - Célula de silício policristalino**

#### 2.10.4.3 Película Fina

As células de película fina utilizam muito menos matéria-prima e energia para sua fabricação, não tem restrições de tamanho e forma e podem até mesmo serem flexíveis e transparentes. Foram a promessa para baratear o custo dos módulos fotovoltaicos, desde os

---

anos 90, mas devido a vários fatores não conseguiram tirar o posto do silício cristalizado. Um dos principais motivos, que é comum a todas as tecnologias de *thin-film*, é a nova técnica de obtenção de silício grau-solar, que barateou o silício cristalizado. As três tecnologias de película-fina mais utilizadas e disponíveis comercialmente são o silício amorfo, o Disseleneto de Cobre Índio (e Gálio) e o Telureto de Cádmio que, devido às suas característica de absorção da luz, camadas muito finas (de menos de 0,001mm) são teoricamente suficientes para a conversão da radiação solar. Além disso, os átomos desses materiais são mais susceptíveis à contaminação por átomos estranhos e, comparadas à tecnologia de fabricação do silício cristalizado, as tecnologias de película fina consomem muito menos energia. Enquanto a temperatura de manufatura do silício cristalizado fica em torno de 1.500 °C, a temperatura de produção das películas finas está entre 200 °C e 600 °C [30].

A principal desvantagem das tecnologias de película-fina, se comparadas ao silício cristalizado, está na menor eficiência. Além disso, o silício cristalizado vive mais tempo; com fabricantes dando até 20 anos de garantia de eficiência mínima. Vejamos, então, as particularidades de cada um dos tipos de película-fina.

#### 2.10.4.4 Silício Amorfo

O silício amorfo (sem forma) não possui uma estrutura cristalina, mas uma rede irregular. Devido a isso, ocorrem ligações livres que absorvem hidrogênio até a saturação. Esse silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) é criado em reatores de plasma, pela deposição de silano gasoso (SiH<sub>4</sub>), em temperaturas entre 220 °C e 250 °C. O dopante é adicionado por uma mistura de gases que contém o devido material: B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> para o tipo-P e PH<sub>3</sub> para o tipo-N. Devido à pequena extensão da difusão do a-Si:H dopado, os elétrons e buracos livres na junção-PN não sobrevivem tempo suficiente para gerar uma corrente elétrica externa. Por isso uma camada de a-Si:H intrínseco (não dopado) é colocada entre camadas de a-Si:H do tipo-N e do tipo-P, na qual as cargas elétricas duram mais tempo. É nessa camada que acontece a absorção da luz e liberação dos elétrons. Como contatos frontais, podem ser utilizados o Óxido de Estanho (SnO), o Óxido de Estanho e Índio (ITO – do inglês: Indium Tin Oxide) ou o Óxido de Zinco (ZnO). Se os materiais forem depositados na parte frontal do vidro, como mostrado na figura, será criada uma estrutura do tipo p-i-n. Os materiais podem ser depositados em uma sequência inversa (n-i-p) na parte traseira do substrato. Isso permite que sejam criados módulos fotovoltaicos flexíveis em substrato leves não transparentes, como plástico ou metal, que são mais adequados à colocação em telhados. A principal desvantagem

---

do silício amorfo está na sua baixa eficiência, que diminui ainda mais durante os primeiros 6 a 12 meses de operação, devido à degradação induzida pela luz (através do efeito Staebler-Wronsky), antes de se estabilizar e alcançar a potência nominal de operação. Alguns fabricantes produzem células empilhando as estruturas p-i-n umas sobre as outras. Com essa técnica, é possível criar células que aproveitam uma parte maior do espectro da radiação solar, otimizando cada camada para uma banda de cor específica, através da mistura com outros materiais, por exemplo o germânio (a-SiGe). Além disso, células empilhadas sofrem menos os efeitos de envelhecimento, e as camadas de a-Si:H do tipo-I são mais finas e, conseqüentemente, menos susceptíveis à degradação pela luz [30].

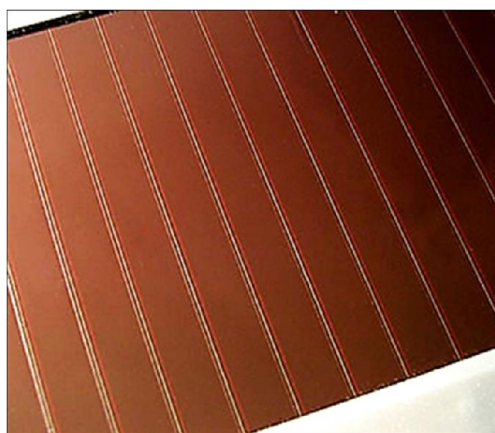


**Figura 2.52 - Célula de silício amorfo**

#### 2.10.4.5 CIS/CIGS

Para a fabricação das células, o substrato de vidro é inicialmente revestido com uma fina camada de molibdênio em um processo de pulverização catódica. A camada do tipo-P de CIGS pode ser fabricada pela vaporização simultânea dos elementos (cobre, índio, gálio e selênio) em uma câmara de vácuo, sob temperaturas entre 500°C e 600°C; ou pela pulverização dos elementos em camadas individuais em temperatura ambiente, com posterior cozimento rápido em temperatura de 500°C.

Como contato frontal transparente, é utilizado o óxido de zinco dopado com alumínio (ZnO:al), que é do tipo-N. Entre os dois tipos (P e N) de semicondutor é colocada uma camada de óxido de zinco intrínseco e uma camada de sulfato de cádmio ajuda a reduzir perdas provocadas pela combinação entre o óxido de zinco e o CIS.

---

Diferentemente do silício amorfo, as células de CIGS não sofrem de degradação sob a ação da luz. Mas é necessário um selamento robusto, para evitar a degradação do óxido de zinco, o que inutilizaria o módulo.

Os módulos fotovoltaicos de CIGS são os mais eficientes, entre as tecnologias de película fina, com até 11% de eficiência. Infelizmente o seu custo não está tão baixo quanto o do silício, além do uso de índio, que é um material raro, altamente requisitado pela indústria de *smartphones*. O índio é o componente principal das telas táteis (*touchscreen*) capacitivas.

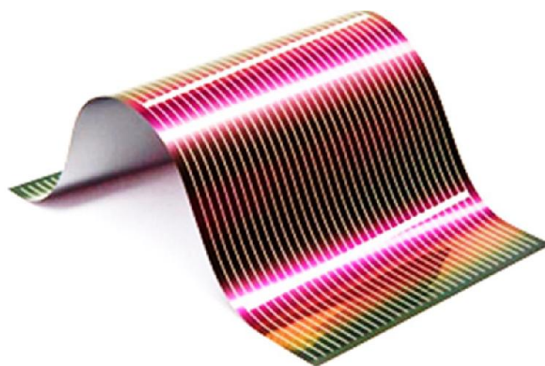


**Figura 2.53 - Célula CIS/CIGS**

#### 2.10.4.6 Telureto de Cádmio

As células fotovoltaicas de CdTe são fabricadas em um substrato de vidro, com uma camada de condutor transparente como contato frontal, onde geralmente é utilizado o óxido de estanho e índio (OTI). O contato frontal é revestido com uma finíssima camada de Sulfeto de Cádmio (CdS) que é um semicondutor do Tipo-N, depois com uma camada de Telureto de Cádmio (CdTe), que é do Tipo-P. Esse procedimento pode ser feito por uma espécie de impressão em tela (*silk-screen*).

Para fabricar módulos maiores, ou com maior eficiência, pode-se utilizar de disposição por vaporização em uma câmara de vácuo com temperaturas de aproximadamente 700°C. A junção P-N de CdS-CdTe é ativada quando entra em contato com uma atmosfera com cloro.

A principal dificuldade para a fabricação de módulos fotovoltaicos utilizando o CdTe é a toxicidade do cádmio. O Telureto de Cádmio é um composto atóxico, que é tóxico somente durante o processo de fabricação, o que exige procedimentos rigorosos de controle.

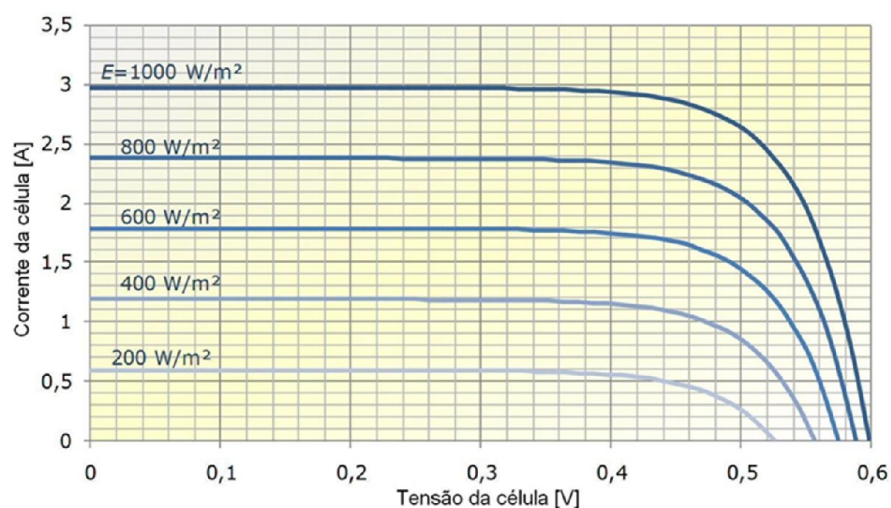
Assim como as células de CIGS, as células de CdTe não se degradam sob a ação da luz.



**Figura 2.54 - Célula de Telureto de Cádmio - CdTe**

#### 2.10.5 Fatores que Afetam as Características Elétricas do Painel Fotovoltaico

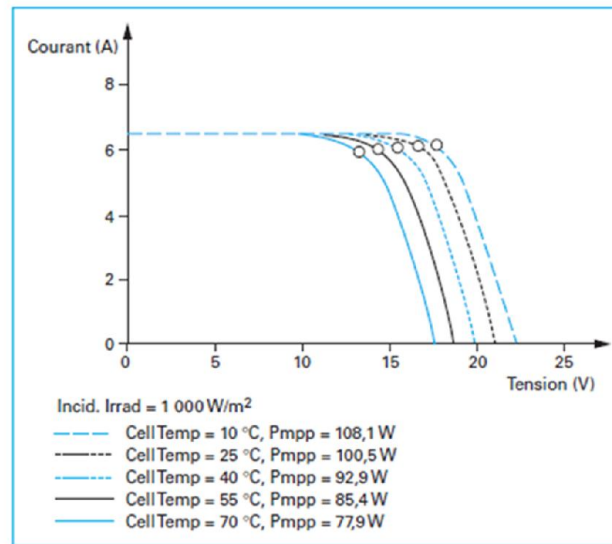
A corrente do painel é função da irradiância do sol, sabendo disso podem-se traçar as curvas que representam a influência da intensidade de irradiação nas características de tensão e corrente da célula solar, como mostrado na Figura 2.55 [28].



Fonte: [28]– Adaptado.

**Figura 2.55 - Influência da irradiação na curva corrente *versus* tensão da célula solar**

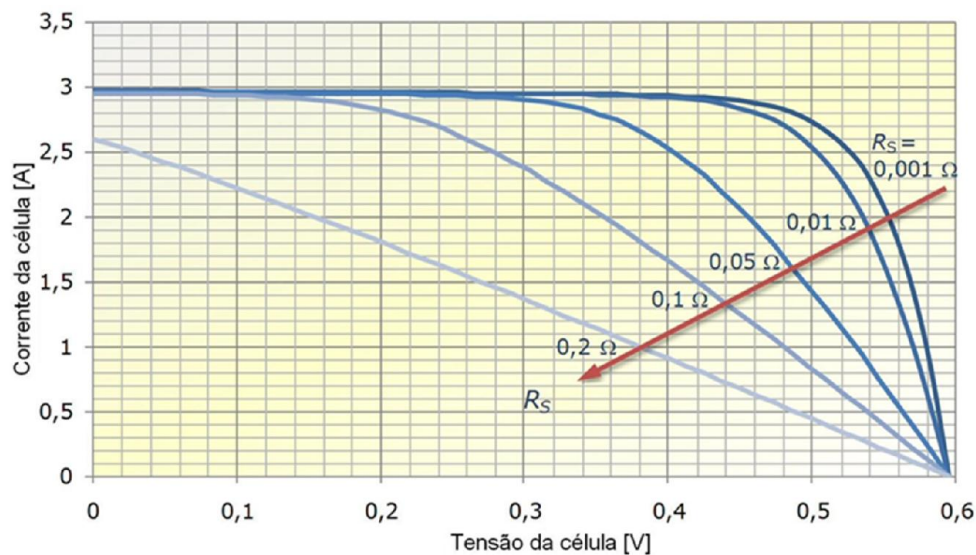
A corrente do painel também é função da temperatura de operação do painel fotovoltaico. Pela Figura 2.56, verifica-se que, ao contrário da irradiância, a influência da temperatura é negativa, pois, com seu aumento o ponto de potência máximo é reduzido [31].



Fonte: [31] – Adaptado.

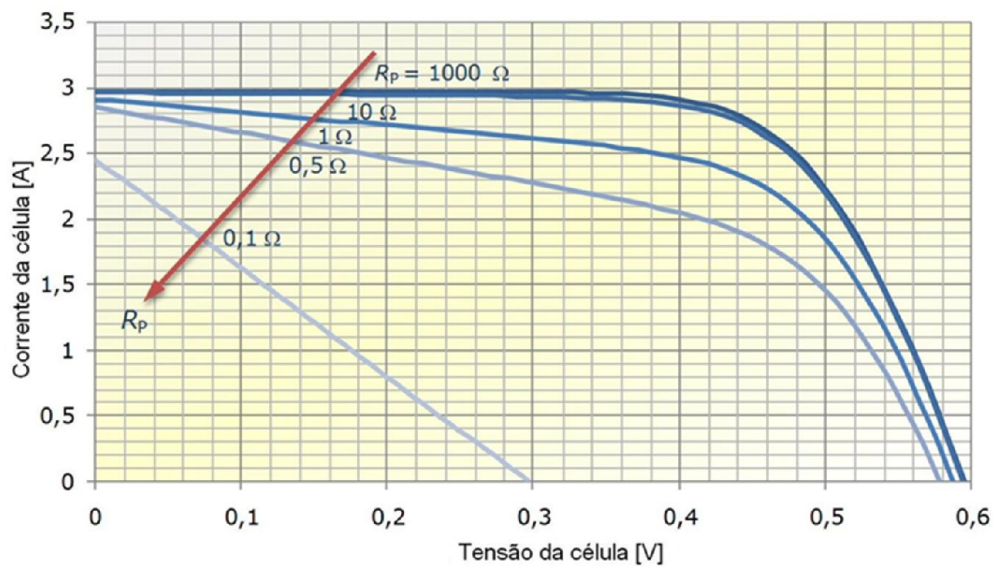
**Figura 2.56 - Influência da temperatura na curva corrente versus tensão da célula solar**

Em células solares convencionais o valor da resistência série é da ordem de  $m\Omega$  enquanto a resistência em paralelo é normalmente superior a  $10 \Omega$ . Ao modificar os valores das resistências série e paralelo, obtêm-se novas curvas de corrente versus tensão da célula solar. A Figura 2.57 mostra o efeito causado pela variação da resistência série, enquanto a Figura 2.58 mostra o efeito causado pela variação da resistência em paralelo na curva característica da célula solar.



Fonte: [28]– Adaptado.

**Figura 2.57 - Influência da variação da resistência série**



Fonte: [28]– Adaptado.

**Figura 2.58 - Influência da variação da resistência paralelo**

#### 2.10.6 Associação de Células Fotovoltaicas

As células solares fornecem tensão e corrente insuficientes para a alimentação da maioria das cargas. Por esse motivo, são associadas formando módulos. Já o conjunto destes chamamos de painel, como ilustra a Figura 2.59.

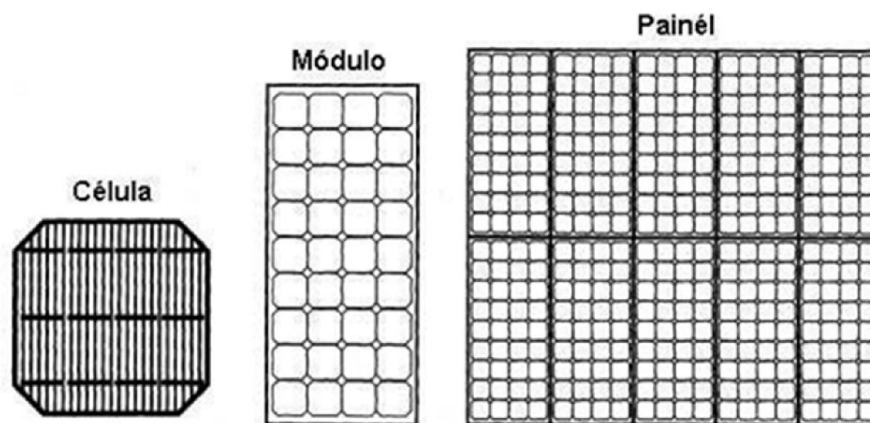
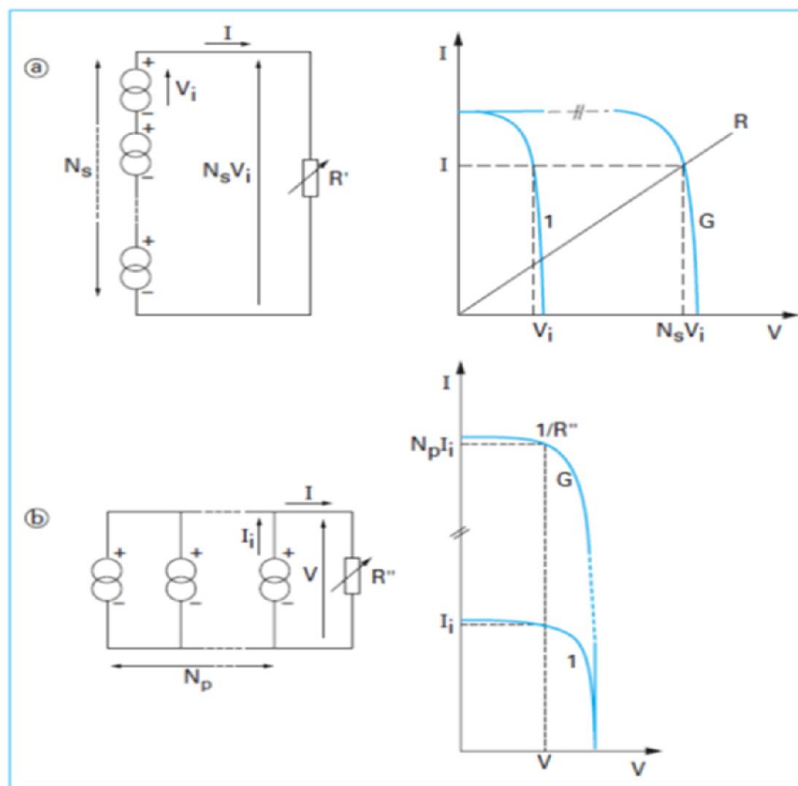


**Figura 2.59 - Ilustração da célula, do módulo e do painel**

Usualmente são associadas cerca de 32 a 40 células com o objetivo de fornecer tensão necessária para o carregamento de baterias de chumbo ácido de 12 V. Podem ser utilizados também módulos que contêm uma quantidade menor de células ou uma quantidade expressivamente maior de células, o número destas associadas varia conforme a aplicação [28].

A Figura 2.60 ilustra o resultado da associação das células fotovoltaicas em série (a) e em paralelo (b).



Fonte: [31] – Adaptado.

**Figura 2.60 - Associação em série (a) e em paralelo (b) das células fotovoltaicas**

A Figura 2.62 e a Figura 2.61 ilustram, respectivamente, uma associação células solares cristalinas e uma representação esquemática da associação destas células em um módulo. Observa-se que a corrente elétrica é a mesma para todas as células e a tensão elétrica nos terminais extremos é equivalente à soma das tensões individuais das células.

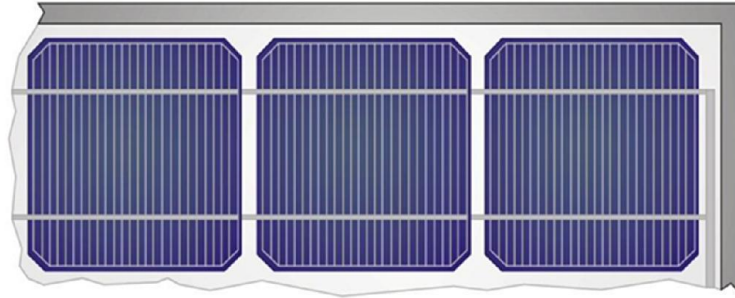


**Figura 2.61 - Associação de células cristalinas**

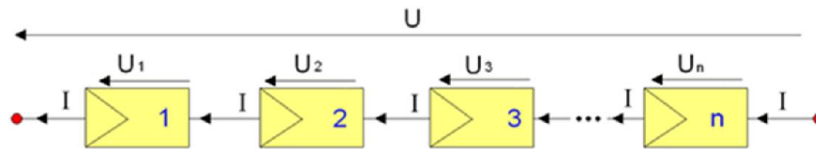
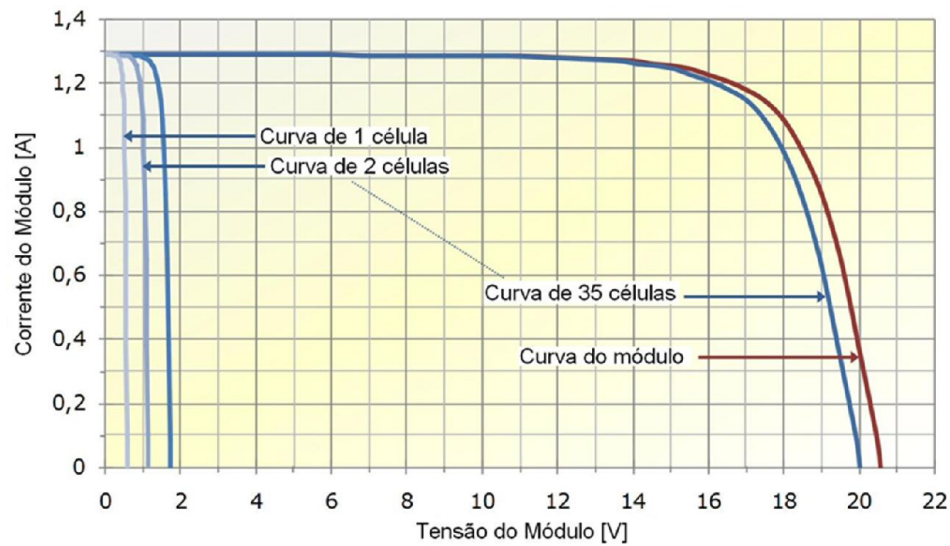


**Figura 2.62 - Associação de células – representação em símbolos**

A curva característica da corrente *versus* a tensão do módulo é semelhante à curva das células. Cada célula contribui com um aumento da tensão terminal podendo ser possível ilustrar essa contribuição individualmente, conforme mostrado na Figura 2.64.



Fonte: [28] – Adaptado.

**Figura 2.63 - Contribuição individual das células na curva do módulo**

---

### 2.10.7 Sistemas Fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistemas isolados, híbridos e conectados a rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e poderá ter uma unidade de armazenamento.

#### 2.1.1.1 Sistemas Isolados

Sistemas isolados, em geral, utiliza-se alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou armazena-se na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, o que é o caso da irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou estocadas em reservatórios.

Em sistemas que necessitam de armazenamento de energia em baterias, usa-se um dispositivo para controlar a carga e a descarga na bateria. O "controlador de carga" tem como principal função não deixar que haja danos na bateria por sobrecarga ou descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas pequenos onde os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC).

Para alimentação de equipamentos de corrente alternada (CA) é necessário um inversor. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor de ponto de máxima potência necessário para otimização da potência final produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto na utilização de eletrodomésticos convencionais [12].

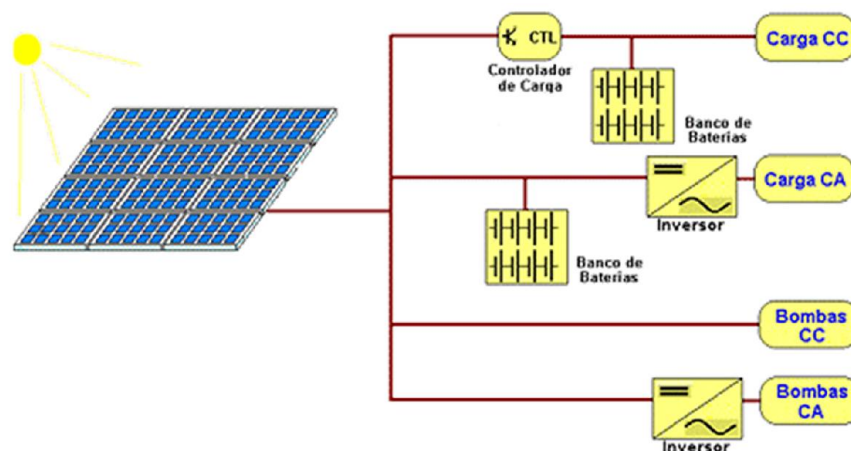


**Figura 2.64 - Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada**

#### 2.1.1.2 Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são aqueles que, desconectado da rede convencional, apresenta várias fontes de geração de energia como por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica torna-se complexo na necessidade de otimização do uso das energias. É necessário um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados para sistemas de médio a grande porte vindo a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas de corrente contínua, o sistema híbrido também apresenta um inversor. Devido a grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso [12].



**Figura 2.65 - Exemplo de sistema híbrido**

### 2.1.1.3 Sistemas Conectados à Rede

Estes sistemas utilizam os painéis fotovoltaicos, e não utilizam armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede. Este sistema representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual esta conectada. Todo o arranjo é conectado em inversores, e, logo em seguida ligado à rede. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada [12]. Esta topologia de sistema fotovoltaico que foi estudada nesta dissertação.

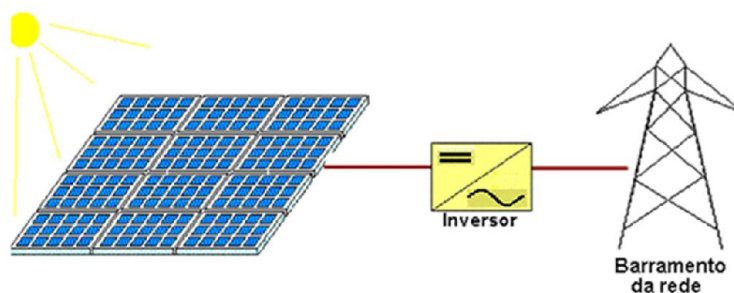


**Figura 2.66 - Sistema conectado à rede**

## CAPÍTULO 3 MODELAGEM MATEMÁTICA

### 3.1 Considerações Iniciais

Uma vez enunciado o estado da arte e os principais conceitos técnicos associados à tecnologia atual de geração fotovoltaica, o presente capítulo tem por objetivo apresentar os modelos físicos e matemáticos representativos das distintas partes que compõem o complexo em estudo, assim como sua implementação computacional no *Alternative Transients Program* - ATP. O sistema de geração fotovoltaica analisado neste trabalho é composto de um arranjo de módulos (painel) conectados a um conversor elevador de tensão (*boost*) que por sua vez se conecta a um inversor, e, finalmente por meio deste último é realizada a conexão do sistema à rede elétrica. Ressalta-se ainda que o sistema possui rastreamento do ponto máximo de potência, malha de captura de fase, em inglês: *phase locked loop* e controle da potência injetada na rede.

Destaca-se ainda que a modelagem em pauta tem por objetivo desenvolver uma ferramenta no ATP que contemple desde as variações de temperatura e irradiância solar incididas no painel até a injeção de potência ativa na rede. Sendo assim, este modelo permitirá realizar diversos tipos de estudos relacionados ao desempenho de um sistema de geração fotovoltaica.

### 3.2 Plataforma Computacional Utilizada

A escolha da plataforma computacional para os fins desta pesquisa incidiu num *software* que permite a realização de estudos de naturezas diversas, como por exemplo: regime permanente e transitório, estudos harmônicos, estudos dinâmicos, etc. Salienta-se que tal versatilidade é conseguida graças à utilização de técnicas baseadas no domínio do tempo. Dentre deste princípio, destaca-se o ATP, o qual tem grande notoriedade na comunidade científica e acadêmica de vários países no que tange a estudos de estabilidade transitória e eletromagnética. Dentre as várias vantagens do simulador, pode-se citar:

- Existência de uma biblioteca padrão, com diversos elementos que permitem simulações de sistemas elétricos, tais como: resistor, indutor, capacitor, etc.;
- Versatilidade gráfica;
- Facilidade na análise de resultados;

- Possibilidade de definição de parâmetros de simulação como tempo de simulação e passo de integração;
- Possibilidade de modelagem de sistemas elétricos mediante conexão de blocos representativos, como gerador, transformador, cabos, etc.;
- Criação de novos modelos por meio dos elementos *Transient Analysis of Control Systems* – TACS ou da linguagem de simulação MODELS.

Merece destaque ainda o fato de que o ATP se encontra livremente disponível para *download*, representando assim uma ferramenta sem custo de obtenção e que oferece um excelente custo-benefício para sua utilização. Os resultados obtidos em diversas pesquisas envolvendo a aplicação deste programa em modelagens de novos sistemas de potência têm se mostrado extremamente satisfatórios, fator este que fortalece a preferência pelo *software* para este trabalho.

### 3.3 Sistema Fotovoltaico em Estudo

O sistema fotovoltaico completo a ser estudado compreende desde a modelagem da irradiância solar, parâmetro de entrada para o painel, até sua conexão com a rede de energia elétrica.

As principais partes constituintes do sistema são: painel fotovoltaico, conversor elevador de tensão (*boost*) e seu controle com rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), inversor de tensão com seu controle integrado com a malha de captura de fase (PLL) e, por meio de um indutor de acoplamento, todo este sistema é conectado à rede elétrica. Um diagrama simplificado deste sistema está ilustrado na Figura 3.1

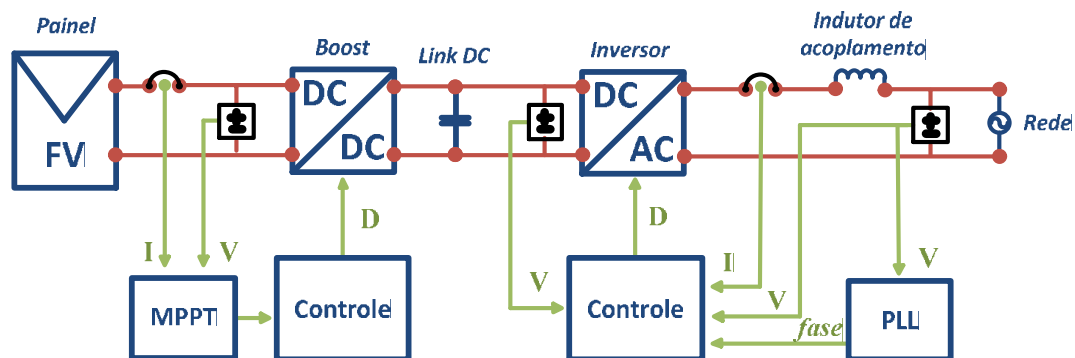


Figura 3.1 - Diagrama simplificado do sistema de geração fotovoltaica implementado

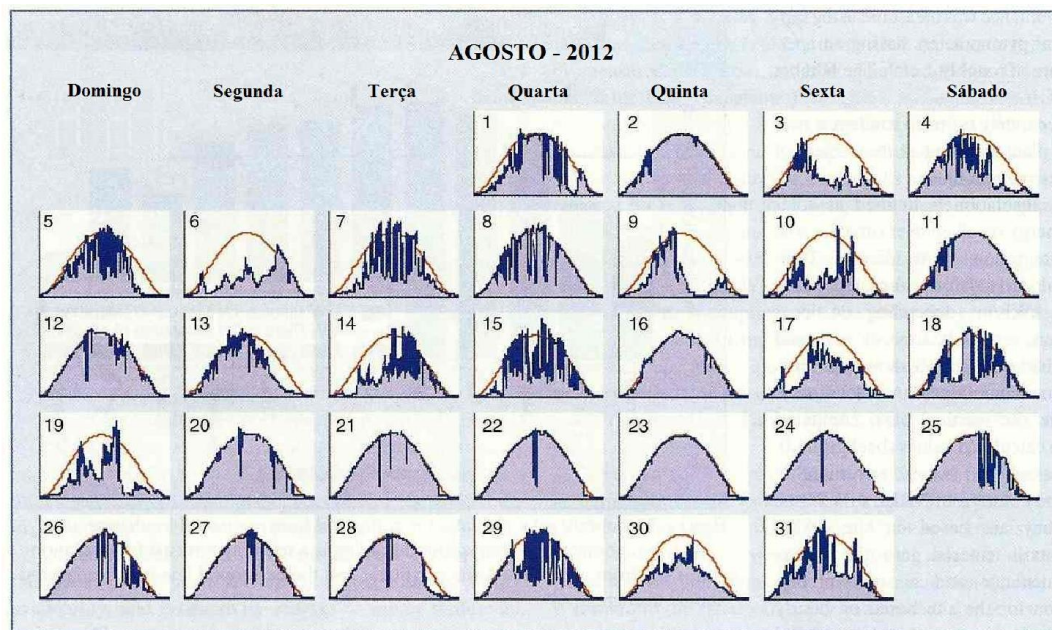
### 3.4 Condições Climáticas

Para que a simulação represente de forma mais precisa a realidade física, dois parâmetros relacionados às condições climáticas do local de operação do módulo fotovoltaico devem ser obrigatoriamente considerados nas simulações: a temperatura ambiente e a irradiância solar.

Para todas as simulações a temperatura ambiente será considerada igual a 25°C. No entanto, os equacionamentos do módulo foram realizados para temperatura em Kelvin. Portanto, será utilizado o valor de 298,15 K.

Diversos fatores atenuantes dificultam o aproveitamento da energia que o Sol disponibiliza antes de atravessar a atmosfera terrestre. Os principais são a massa de ar e a quantidade de nuvens. Estes impedem que os raios solares diretos atinjam os painéis fazendo com que a irradiância solar incidente nos painéis fotovoltaicos seja muito variável.

A Figura 3.2 ilustra perfis de variação de irradiância solar ao longo de um dia [42].



Fonte: [42] – Adaptado.

**Figura 3.2 - Perfis de variação de irradiância ao longo de um dia**

A partir da Figura 3.2 ficam evidentes as bruscas variações de irradiância solar. Portanto, a modelagem da irradiância, que é parâmetro de entrada para o painel fotovoltaico, contemplará este comportamento.

Como este trabalho não visa estimar a produção de energia ao longo de um determinado tempo, não haverá simulações ao longo de todo um dia. O foco deste trabalho se encontra na

modelagem de um sistema completo de geração fotovoltaica que responda dinamicamente às condições impostas.

A temperatura foi representada por uma fonte de tensão contínua de amplitude 298,15.

### 3.5 O Painel Fotovoltaico

O módulo escolhido para extração de dados e especificação completa do painel fotovoltaico é o modelo KD135SX-UPU da marca Kyocera. Ressalta-se, no entanto que a representação computacional desenvolvida neste trabalho é genérica e poderá ser parametrizada com dados de qualquer outro módulo fotovoltaico.

#### 3.5.1 Teoria e Modelagem Matemática

O modelo elétrico que representa um módulo fotovoltaico ideal é mostrado na Figura 3.3 (a), onde a corrente  $I$  fornecida pelo módulo a uma carga, é equivalente à associação de uma fonte de corrente contínua  $I_{ph}$  em paralelo com um diodo. Onde o módulo de  $I_{ph}$  é proporcional ao nível  $S$  de irradiância do sol, que incide sobre a célula, e o comportamento da corrente pela *junção PN* é representado pela corrente do diodo  $I_d$ .

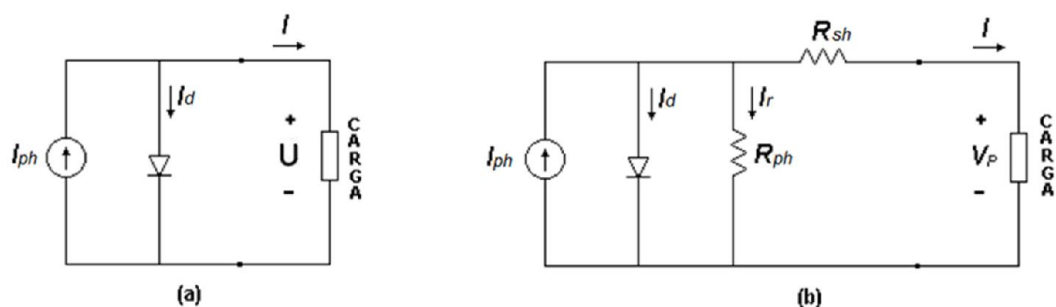


**Figura 3.3 - Circuito equivalente de um módulo fotovoltaico conectada a uma carga: (a) modelo ideal e (b) modelo real.**

O desempenho de um painel real difere do ideal, pois este não apresenta todas as características que se esperam encontrar num módulo real. Os fatores de perdas do módulo real são representados pelas resistências em série e em paralelo inseridas no modelo ideal.

Assim, o módulo fotovoltaico é modelado por uma fonte de corrente cujo valor depende da variação da irradiância solar e da temperatura ambiente; por um diodo em paralelo com a fonte de corrente cuja característica varia em função da temperatura do módulo e do

---

estado em que se encontra o módulo (carga aplicada a este); por uma resistência  $R_{ph}$  em paralelo com o diodo que caracteriza as correntes de fuga que ocorrem nas extremidades da célula solar e, finalmente, por uma resistência  $R_{sh}$  na saída que caracteriza as quedas de tensão na condução de carga entre o material semicondutor e o contato externo. A Figura 3.3 (b) apresenta o circuito equivalente de um módulo real [33].

Uma vez apresentado o esquema elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica é agora possível apresentar sua respectiva equação.

O circuito da Figura 3.3 (b) é usado junto com as seguintes equações para expressar as curvas características (corrente-tensão: IV e potência-tensão: PV) de um painel fotovoltaico.

$$I = I_{ph} - I_d - I_r \quad (3.1)$$

A fonte de corrente dependente,  $I_{ph}$ , equação (3.2) varia em função da radiação solar e da temperatura em que se encontra o painel, onde  $I_{SC}$  é a corrente de curto-circuito do painel,  $J_o$  o coeficiente de temperatura,  $T$  a temperatura do módulo fotovoltaico,  $T_{ref}$  a temperatura de referência,  $S$  é a irradiância solar em  $W/m^2$  e  $S_{ref}$  a irradiância solar de referência.

$$I_{ph} = [I_{SC} + J_o(T - T_{ref})] \cdot \frac{S}{S_{ref}} \quad (3.2)$$

A corrente do diodo,  $I_d$ , equação (3.3) em paralelo com a fonte de corrente apresenta um comportamento não linear dependente da temperatura do painel bem como do estado de funcionamento em que este se encontra. Esta é equação principal associada ao diodo sendo que  $K$  representa a constante de Boltzmann ( $1,3806505 \times 10^{-23}$ ),  $q$  é a carga elementar de um elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$ ) e  $n$  o fator de idealidade de cada célula solar (adotado valor típico 1,2), conhecido também como coeficiente de emissão.

A variável  $I_o$  nas equações (3.3) e (3.4) é a corrente de saturação inversa do diodo sendo  $E_g$  a banda de energia do semicondutor (adotado valor típico 1,12).

---


$$I_d = I_o \times \left[ \exp\left(\frac{q \cdot (I \cdot R_{sh} + V)}{N_s \cdot n \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

$$I_o = I_{DO} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot \exp\left\{\frac{q \cdot E_g}{n \cdot K} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right\} \quad (3.4)$$

Por fim vêm as equações associadas às variáveis  $I_{DO}$  e  $E_g$ . A variável  $I_{DO}$  é uma constante dependente apenas das características fixas do painel.

$$I_{DO} = \frac{I_{SC}}{\exp\left[\left(\frac{q \cdot V_{OC}}{n \cdot K \cdot T \cdot N_s}\right) - 1\right]} \quad (3.5)$$

$$E_g = N_s \times \left( E_{gref} - 7.02 \times 10^{-4} \times \frac{T^2}{T + 1108} \right) \quad (3.6)$$

Para completar o conjunto de equações associadas a um painel fotovoltaico é ainda necessário o cálculo das resistências  $R_{sh}$  e  $R_{ph}$  presentes no modelo da Figura 3.3 (b). As resistências tratam de constantes que podem ser calculadas recorrendo a características fixas do painel fotovoltaico.

$$R_{sh} = \frac{V_{OC} - V_{MPPT}}{I_{MPPT}} \quad (3.7)$$

$$R_{ph} = \frac{V_{OC}}{I_{SC} - I_{MPPT}} \quad (3.8)$$

Para a devida modelagem do painel a partir das equações acima, para se representar uma *string* de módulos fotovoltaicos basta multiplicar a variável  $N_s$  pelo número de módulos que se deseja ter em série. Já para se colocar *strings* em paralelo, a resistência série deve ser dividida pelo número de *strings* em paralelo e as variáveis a seguir devem ser multiplicadas por este mesmo valor, são elas: corrente de saturação do diodo, corrente de curto-circuito, resistência shunt e coeficiente de temperatura.  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto.

### 3.5.2 Implementação Computacional

As equações supracitadas foram implementadas no ATP por meio da MODELS. A Figura 3.4 ilustra o painel fotovoltaico alimentando uma carga R, e ainda, seus parâmetros de entrada, temperatura e irradiância.

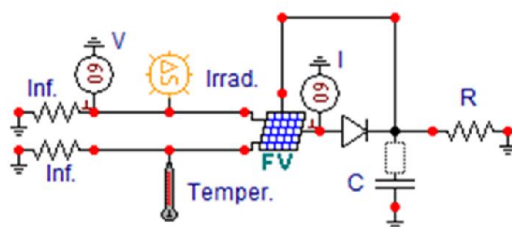


Figura 3.4 - Pannel fotovoltaico implementado no ATP

## 3.6 O Conversor Elevador de Tensão

### 3.6.1 Teoria e Modelagem Matemática

O conversor será dimensionado para a condição de tensão de entrada igual ao da configuração escolhida para o painel. Serão conectados oito módulos da Kyocera em série, modelo KD135SX-UPU. A esse grupo de módulos em série denomina-se *string*.

O cálculo dos componentes do conversor *boost*, foram extraídos da referência [34], a qual considera o modo de condução contínuo – MCC<sup>48</sup>.

O cálculo da resistência da carga, que será utilizada para o conversor *boost*, e da corrente que passa pela mesma é efetuado, respectivamente, pelas equações (3.9) e (3.10).

O projeto será realizado para que a tensão de saída do *boost* tenha um valor em torno de 400 V. Lembrando-se que esta tensão se encontra no barramento de corrente contínua (*link DC*) que é a entrada para o inversor.

O rendimento desse circuito será adotado em torno de 93%. Além disso, o valor da tensão de entrada será a soma das tensões dos oito módulos em série, ou seja, igual a 141,6 V.

A tensão de saída do *boost*, por sua vez, será contínua e com amplitude igual a 400 V. Esta irá funcionar como uma fonte de entrada para o inversor.

<sup>48</sup> MCC – Modo de condução contínuo.

---


$$P_o = \frac{V_o^2}{R_{pv}} \rightarrow R_{pv} = \frac{V_{mp}^2}{P_o} \rightarrow R = \frac{141,6^2}{1080} \rightarrow R_{pv} = 18,56 \, \Omega \quad (3.9)$$

$$V_o = R \cdot I_{carga} \rightarrow I_{carga} = \frac{400}{18,56} \rightarrow I_{carga} = 21,55 \, A \quad (3.10)$$

Por meio da equação (3.11), a qual expressa a relação de ganho estático do conversor *boost*, pode-se calcular a razão cíclica (ou ciclo de serviço/trabalho – em inglês: *duty cycle*), representado pela letra D.

$$1 - D = \frac{V_{mp}}{V_o} = \frac{141,6}{400} \rightarrow D = 0,646 \quad (3.11)$$

### 3.6.1.1 Cálculo do Indutor do *Boost*

O valor eficaz da corrente de entrada será calculado de acordo com a tensão eficaz de entrada dada pela expressão (3.12).

$$I_{entrada} = \frac{P_{entrada}}{V_{máx}} = \frac{1080}{141,6} = 7,62 \, A \quad (3.12)$$

A corrente de saída do circuito de potência  $I_{output}$  pode ser obtida pela equação (3.13). Lembrando-se que a potência de saída ( $P_{saída}$ ) é calculada pela multiplicação do rendimento do conversor ( $\eta = 0,93$ ) pela potência de entrada ( $P_{entrada} = 1080$ ).

$$I_{output} = \frac{P_{saída}}{V_{saída}} = \frac{0,93 \cdot 1080}{400} = 2,70 \, A \quad (3.13)$$

Para a determinação do indutor do *boost* falta apenas o cálculo da ondulação (em inglês: *ripple*) desejada na corrente. Que neste trabalho será adotada igual a 50%. A equação (3.14) mostra este cálculo.

$$\Delta I = 0,50 \cdot I_{entrada} = 0,50 \cdot 7,62 = 3,81 \, A \quad (3.14)$$

---

Enfim, para determinação do indutor a ser utilizado no conversor, para um chaveamento de 50 kHz encontra-se o valor de indutância expressa pela fórmula (3.15) a seguir.

$$L_{boost} = \frac{V_{mp} \cdot D}{f_{chaveamento} \cdot \Delta I} = \frac{141,6 \cdot 0,646}{50 \text{ kHz} \cdot 3,81} \cong 480 \mu H \quad (3.15)$$

Ainda, a partir deste valor de  $480 \mu H$  do indutor, pode-se calcular a corrente máxima que passa pelo mesmo de acordo com a equação (3.16).

$$I_{Lmáx} = I_{entrada} + \frac{\Delta I}{2} = 7,62 + \frac{3,81}{2} = 9,525 A \quad (3.16)$$

### 3.6.1.2 Cálculo do Capacitor de Entrada do Boost

Para o cálculo do capacitor de entrada  $C_{in}$  mínimo, adota-se um valor de *ripple* máximo de 1% sobre a tensão contínua de entrada, de acordo com as seguintes equações:

$$C_{in\_mín} \geq \frac{I_{entrada} \cdot D_{máx}}{f_s \cdot \Delta V_O} \quad (3.17)$$

$$C_{in} \geq \frac{7,62 \cdot 0,646}{50 \text{ kHz} \cdot 141,6 \cdot 0,01} \quad (3.18)$$

$$C_{in} \geq 70 \mu F \quad (3.19)$$

Dessa maneira, define-se o valor mais próximo comercialmente de capacitor eletrolítico sendo igual a 100  $\mu F$  e 385 V.

### 3.6.1.3 Cálculo do Capacitor de Saída do Boost

Para o cálculo do capacitor de saída do *boost*, ou de entrada do inversor, será utilizada a equação (3.20).

$$C_{output} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2} \cdot M}{V_{output} \cdot \eta \cdot V_{in}}\right) P_{output}}{4 \cdot \pi \cdot \Delta V_{cp}} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2} \cdot 0,77}{311 \cdot 0,934 \cdot 0,01}\right) \cdot 1080}{4 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (400 \cdot 0,01)} \quad (3.20)$$

$$C_{output} = 291,2 \mu F \quad (3.21)$$

Assim, será considerado um valor comercial de capacitância de saída do *boost* igual a 330  $\mu F$  e 500 V.

### 3.6.2 Implementação Computacional

O *boost* foi implementado no ATP fazendo-se uso dos seguintes elementos discretos: capacitores de entrada e saída do *boost* (CAP\_RS); indutor (IND\_RP); diodo (DIODE); e da chave controlada por TACS (SW\_TACS).

Para a correta operação deste sistema os parâmetros CLOSED e GIFU da chave foram especificados com o valor unitário. Isto significa, no caso do CLOSED, garantir que a chave estará fechada em regime permanente, e, no caso do GIFU, que o diodo será checado: se estiver diretamente polarizado com uma tensão maior que a máxima tensão direta este estará em modo de condução; e se a corrente for maior que a máxima reversa este estará em bloqueio. Isto reduz os problemas de erros numéricos.

A Figura 3.5 ilustra a montagem realizada no ATP.

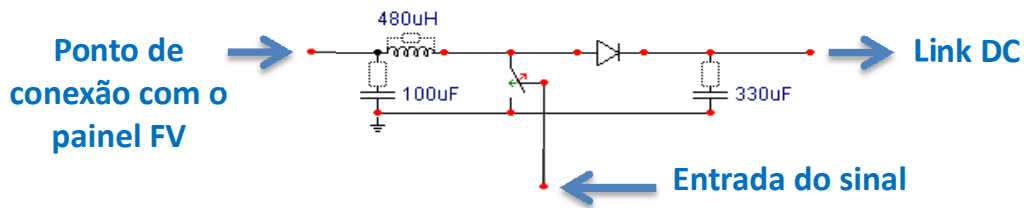


**Figura 3.5 – Conversor elevador de tensão implementado no ATP**

---

## 3.7 O Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

### 3.7.1 Teoria e Modelagem Matemática

Como ilustra a Figura 3.2 pode haver variações muito abruptas com a irradiância incidente no painel fotovoltaico. Nessas condições, o ponto de máxima potência do sistema varia continuamente, consequentemente o ponto de operação deve ser alterado para maximizar a energia produzida. A técnica mais utilizada para o rastreamento do ponto de máxima potência é o Perturbe e Observe [35].

O algoritmo P&O opera com perturbações periódicas (isto é, incrementando ou decrementando) na tensão terminal do sistema e comparando a potência de saída do sistema FV com a do ciclo de perturbação anterior ( $P_{atual}$  com  $P_{anterior}$ ).

Após a alteração no valor de tensão de operação do sistema, se a potência aumentar ( $dP/dV_{PV} > 0$ ), o sistema de controle move o ponto de operação do sistema nessa direção, caso contrário, o ponto de operação é movido na direção oposta. No próximo ciclo de perturbação o algoritmo continua operando do mesmo modo.

Uma desvantagem do algoritmo *P&O* é que a tensão terminal é perturbada em cada ciclo de MPPT, dessa maneira quando o ponto de máxima potência é atingido, a potência de saída oscila em torno do máximo valor, resultando em perda de potência do sistema FV. Isso ocorre independente das condições atmosféricas.

Na técnica clássica do *P&O*, as perturbações do ponto de operação FV tem uma amplitude fixa. Entretanto, deve-se atentar à escolha do passo para a perturbação do algoritmo de rastreamento da máxima potência. Uma escolha errônea pode levar a perdas de potência devido à saturação da corrente de saída do painel, atingindo-se a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) ou à saturação de tensão, atingindo-se a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ). A Figura 3.6 ilustra o fluxograma completo do algoritmo *P&O*. Para efetuar o controle do MPPT, foi realizado o sensoramento da tensão e da corrente dos painéis fotovoltaicos e ainda a utilização de um conversor CC-CC, um conversor elevador de tensão.

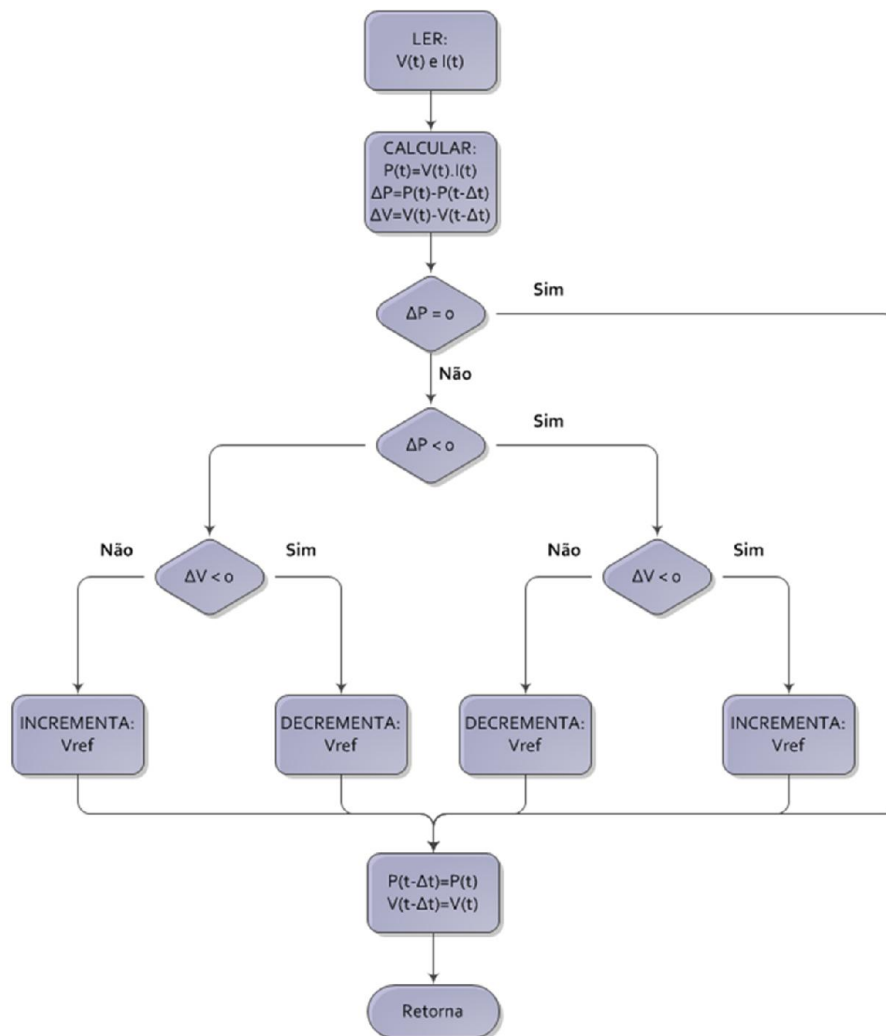


**Figura 3.6 - Fluxograma do algoritmo P&O**

O algoritmo *P&O* foi programado para operar com perturbações de 1 V e o valor inicial para a tensão de referência é igual a 141,6 V, valor este equivalente a oito módulos KD135SX-UPU da Kyocera em série operando no ponto de máxima potência.

---

### 3.7.2 Implementação Computacional

A implementação do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) foi realizada no ATP por meio da TACS<sup>49</sup>. Trata-se de um módulo de simulação do *software* para análise no domínio do tempo de sistemas controle. Adequado para circuitos de eletrônica de potência e mecanismos de acionamentos.

O sensoriamento da tensão e da corrente de saída do painel fotovoltaico foi realizado por meio de um elemento da TACS chamado *coupling to circuit* (EMTP\_OUT). Este componente possui três parâmetros de entrada: tempo de início de amostragem, tempo de parada de amostragem e tipo. Para a tensão deve ser utilizado o número 90 no campo *tipo*, já para corrente deve ser usado o número 91. Como as duas grandezas elétricas se encontravam no mesmo ponto elétrico foi utilizada a chave *measuring switch* (SWMEAS) para separar os pontos e principalmente possibilitar a leitura da corrente, que deve ser feita em uma chave. Em seguida é realizada a multiplicação dos sinais pelo elemento MULT2 gerando assim um sinal de potência. Este por sua vez será derivado pelo elemento DEVICE59. A partir de então o DEVICE60 compara este sinal representativo da derivada da potência com zero. Se este for menor ou igual a zero a saída será nula, caso contrário será unitária, ou seja, é gerada uma onda quadrada de valores alternantes entre zero e um. Quando o valor for igual a um, é acionada a chave SW\_TACS que é responsável por somar, no caso deste MPPT, entende-se: perturbar o sistema, adicionando 1 Volt na tensão de perturbação (indicada na Figura 3.7) que será somada à tensão de referência igual a 141,6 V. Quando o valor for igual a zero ocorre um processo semelhante, mas agora subtraindo 1 Volt na tensão de perturbação. Somadas as tensões de perturbação e referência se faz uma comparação com a tensão de saída do painel fotovoltaico. O erro produzido será ajustado por um compensador proporcional-integrador (PI) e finalmente, outro DEVICE60 faz a comparação desta saída do PI com uma onda triangular, criada na MODELS<sup>50</sup>, de amplitude unitária e frequência 50 kHz. O resultado deste sistema determina o ciclo de serviço (em inglês: *duty cycle*) que atuará para abrir e fechar a chave do *boost*, e assim fornecer a tensão de projeto igual a 400 V no link DC.

---

<sup>49</sup> TACS - *Transient Analysis of Control Systems*.

<sup>50</sup> MODELS - Linguagem de simulação do ATP.

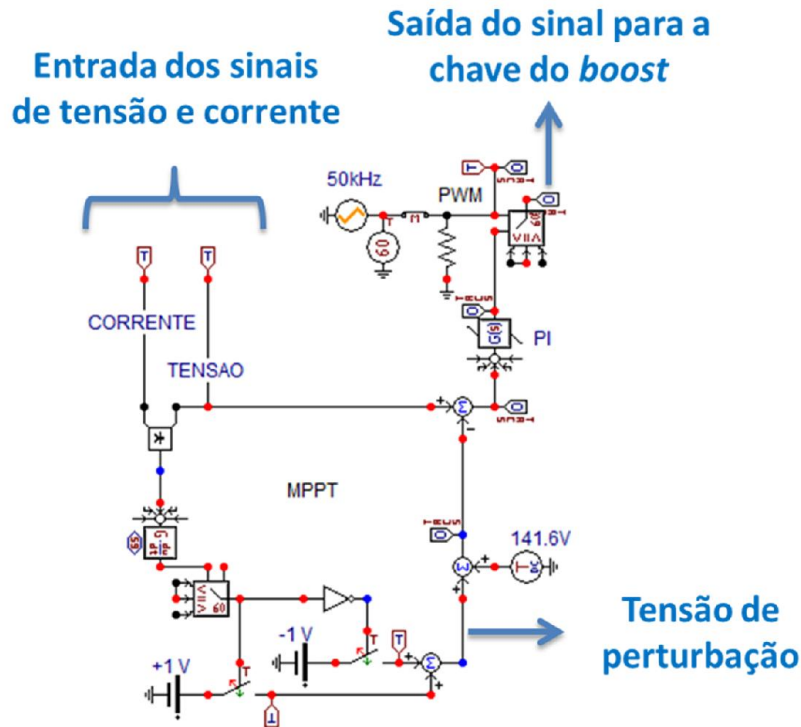


**Figura 3.7 - Rastreador do ponto de máxima potência e PWM implementado no ATP**

### 3.8 O Inversor

O inversor de frequência constitui-se em um dispositivo que, a partir de uma tensão contínua, produz, neste caso, um sistema monofásico de tensões que serão conectadas à rede elétrica. Por se tratar de um elemento destinado à integração do sistema de geração fotovoltaica, atuando como fonte de geração distribuída, sua estratégia de controle deve prover uma interligação apropriada tanto no que tange à questão da transmissão de energia da fonte primária (irradiância solar) para a rede, como também na viabilização de meios para a operação nos termos requeridos pelas condições em regime permanente, dinâmico e transitório.

Em seguida são retratados os aspectos teóricos, matemáticos e computacionais mais relevantes abordados na constituição do modelo representativo do inversor de frequência no ATP.

---

### 3.8.1 Teoria e Modelagem Matemática

Os inversores CC<sup>51</sup>-CA<sup>52</sup> são usados onde o objetivo é produzir uma tensão de saída CA senoidal, a qual a magnitude e frequência ambas podem ser controladas. Isto é realizado pelo modo de chaveamento CC-CA do inversor, o qual recebe uma tensão CC na entrada e produz a tensão de saída CA desejada. Eles podem ser classificados conforme dois tipos de alimentação CC existente na sua entrada. Aquele do tipo VSI<sup>53</sup> utiliza um filtro capacitivo no elo CC, enquanto o tipo CSI<sup>54</sup> utiliza um indutor.

Neste trabalho e na maioria das aplicações para sistemas FV utiliza-se o inversor do tipo VSI. A Figura 3.8 ilustra o esquema deste inversor, elo CC mais as chaves, e ainda o indutor de acoplamento e a rede elétrica.

O arranjo do inversor compreende as seguintes unidades básicas: o Elo CC, o inversor e a lógica de disparo.

O Elo CC é na verdade um filtro capacitivo, com o objetivo de manter a tensão CC constante e com ondulação reduzida. E o inversor consiste de uma ponte composta por quatro chaves semicondutoras controladas. De acordo com a frequência de chaveamento destas, a tensão CA pode ser variada em amplitude e frequência.

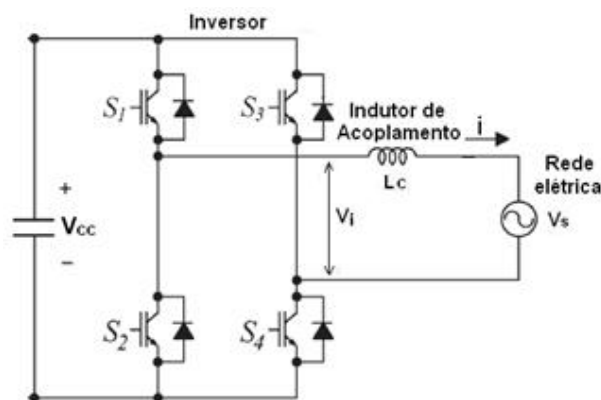


**Figura 3.8 - Inversor monofásico conectado à rede elétrica**

---

<sup>51</sup> CC – Corrente Contínua.

<sup>52</sup> CA – Corrente Alternada.

<sup>53</sup> VSI – Inversor de Fonte de Tensão. Em inglês: *Voltage Source Inverter*.

<sup>54</sup> CSI – Inversor de Fonte de Corrente. Em inglês: *Current Source Inverter*.

A lógica de disparo é responsável pelo instante de abertura e fechamento das chaves semicondutoras do inversor. O controle PWM<sup>55</sup> é a mais utilizada nos inversores VSI. A definição do instante de operação de cada chave é realizada pela comparação de um sinal senoidal com uma onda triangular, conforme mostra a Figura 3.9 (a). Então, conforme mostra a Figura 3.9 (b), quando a moduladora (referência senoidal) é maior que a portadora (triangular), a saída do comparador causa a entrada em condução da chave semicondutora correspondente, e quando ocorre o contrário a chave semicondutora é bloqueada.

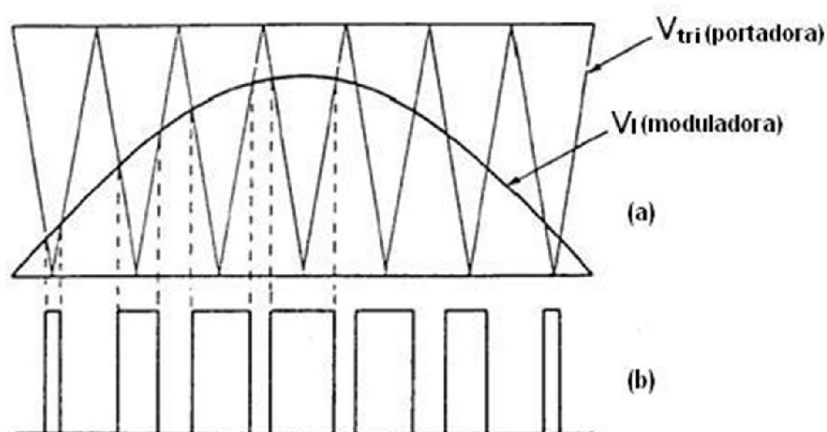


**Figura 3.9 - Modulação por largura de pulso - PWM**

Para este caso, a tensão CC de entrada é essencialmente constante em magnitude. Então, o inversor deve controlar a magnitude e a frequência da tensão CA de saída. Isto é obtido pela modulação da largura de pulso do chaveamento do inversor.

Assim, para produzir uma forma de onda de tensão de saída senoidal, a moduladora com uma frequência desejada é comparada com a portadora, como mostra a Figura 3.10 (a). A frequência da forma de onda triangular estabelece a frequência de chaveamento do inversor.

<sup>55</sup> PWM – Controle por Modulação de Largura de Pulso. Em inglês: *Pulse Width Modulation Control*.

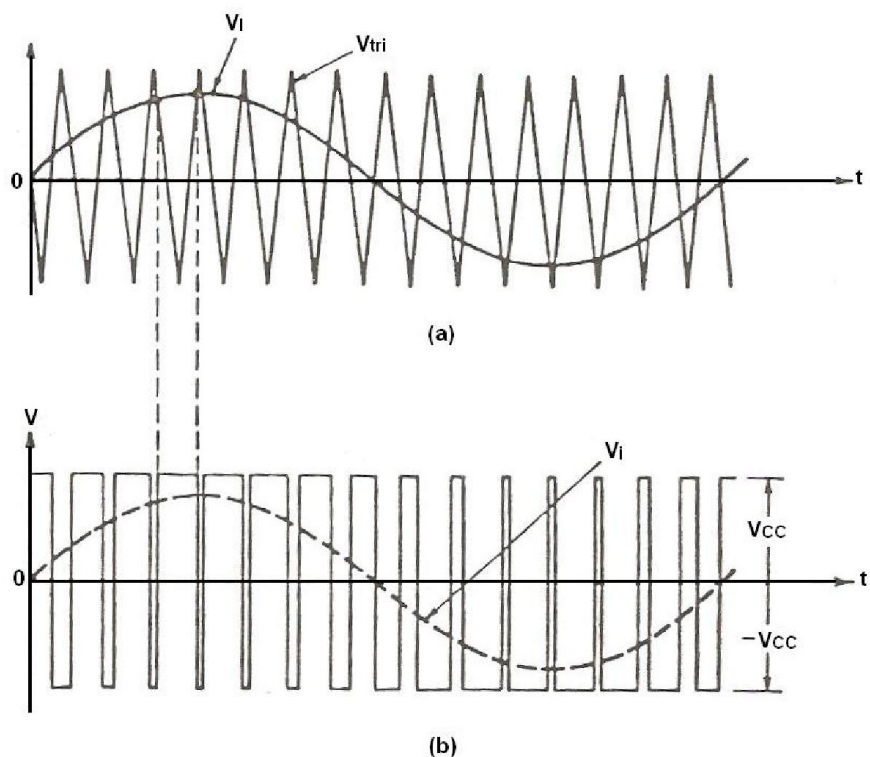


**Figura 3.10 - Forma de onda triangular e senoidal**

A forma de onda triangular tem uma frequência de chaveamento, a qual é chamada de onda portadora. O sinal de controle (moduladora ou senóide de controle) é usado para modular a razão de chaveamento e tem uma dada frequência, a qual é a frequência fundamental desejada da tensão de saída do inversor.

O diagrama de blocos da unidade que produz os pulsos necessários ao disparo das chaves do inversor a partir dos sinais enviados pela unidade de controle é mostrado na Figura 3.11.

O resultado dessa operação é enviado para as chaves do inversor, o qual, a partir desse sinal de entrada, define a amplitude e frequência da onda senoidal a ser gerada no barramento ao qual o inversor está conectado.

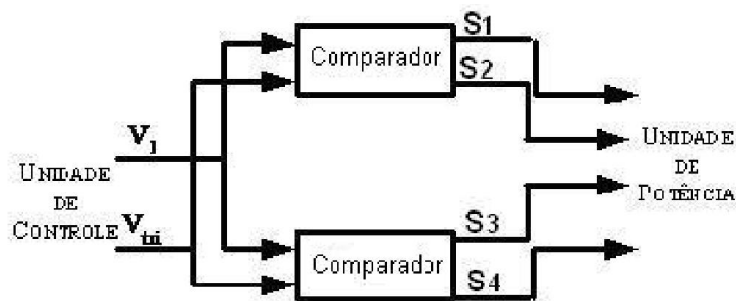


**Figura 3.11 - Diagrama de blocos da unidade de distribuição de pulsos do inversor**

O inversor VSI utilizado neste trabalho é o *full-bridge*. Neste inversor, as chaves estão em pares (S1, S4) e (S2, S3). Estas são acionadas simultaneamente.

### 3.8.2 Implementação Computacional

A seção anterior esclareceu e forneceu as informações necessárias para a modelagem matemática do inversor. Ele possui quatro terminais, dois para a conexão com o link CC e outros dois onde surgirá a tensão bifásica, que por sua vez, propiciará a injeção de corrente na rede. O controle do inversor será apresentado posteriormente.

A Figura 3.12 ilustra o circuito de potência do inversor Full-Bridge utilizado nas simulações.

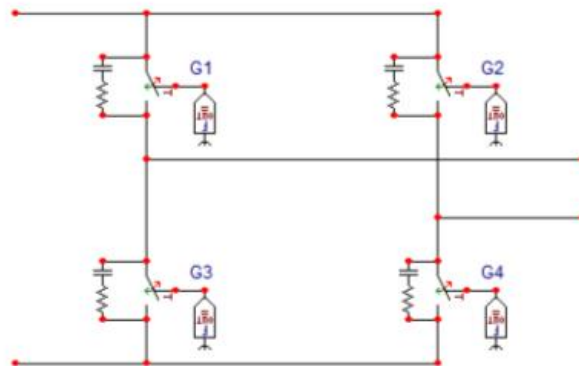


**Figura 3.12 - Inversor**

---

### 3.9 Indutância de Acoplamento com a Rede Elétrica

#### 3.9.1 Teoria e Modelagem Matemática

O indutor conectado entre a saída do inversor e a rede permite o controle da corrente que flui entre os dois sistemas.

As especificações do inversor são as seguintes:

- $V_{DC} = V_{IN} = 400 \text{ V}$ ;
- $R_s = 0,1 \Omega$ ; e
- $V_{out} = 311 \text{ V}_{pico}$ .

A razão cíclica média é dada pela variável  $D_{\text{médio}}$  que pode ser obtida pela expressão (3.22).

$$D_{\text{médio}} = \frac{V_{out} + V_{in}}{2 * V_{in}} \quad (3.22)$$

$$D_{\text{médio}} = \frac{311 + 400}{2 * 400} \quad (3.23)$$

$$D_{\text{médio}} = 0,889 \quad (3.24)$$

Adotando-se um rendimento para o conversor de 93 % e para o inversor de 96%, encontra-se uma potência de saída do conjunto conversor-inversor igual a de 964,22 W. A corrente de saída eficaz será de 4,38 A e a corrente de pico será de 6,19 A. O *ripple* de corrente adotado para a indutância de acoplamento é:

$$\Delta I = 0,1 * I_{pico} \quad (3.25)$$

$$\Delta I = 0,1 * 6,19 \quad (3.26)$$

$$\Delta I = 0,619 \text{ A} \quad (3.27)$$

A frequência de chaveamento adotada é 50 kHz. Assim, calcula-se o filtro de saída do inversor que será acoplado à rede elétrica:

---


$$L_f = \frac{V_{DC} * (2 * D_{médio} - 2 * D_{médio}^2)}{f_s * \Delta I} \quad (3.28)$$

$$L_f = \frac{400 * (2 * 0,888 - 2 * 0,888^2)}{50kHz * 0,619} \quad (3.29)$$

$$L_f = 2,55 \text{ mH} \quad (3.30)$$

### 3.9.2 Implementação Computacional

Neste caso, trata-se da inserção de um indutor (*IND\_RP*) entre o inversor e a rede elétrica.

## 3.10 O Controle da Corrente Injetada na Rede

### 3.10.1 Teoria e Modelagem Matemática

O controle do inversor será composto por duas malhas de controle, uma de corrente e a outra de tensão.

O inversor conectado à rede elétrica terá controle de corrente no indutor de acoplamento, já que a tensão no barramento da rede tem amplitude e frequência pré-estabelecidas. Dessa maneira, efetua-se o controle de potência injetada através do controle de corrente.

A partir da potência de referência divide-se esta pela tensão eficaz da rede, encontrando-se assim o valor da corrente. Multiplicando este resultado à raiz quadrada de dois e em seguida somando-o ao erro de tensão do barramento CC define-se a amplitude de corrente que será utilizada na malha de controle. Esta por sua vez terá sua forma definida pela fase gerada no PLL. Após comparação com a corrente injetada na rede, o erro de corrente passa por um compensador do tipo proporcional-integrador e enfim, por meio de um PWM, são gerados os sinais para as chaves do inversor.

O projeto de um compensador depende da função de transferência do inversor. O compensador de corrente controlará a malha de corrente que é mais rápida que a de tensão.

Como critério de projeto, define-se a frequência de corte muito menor que a frequência de chaveamento. Matematicamente entende-se, neste caso, dez vezes menor. Portanto, para uma frequência de chaveamento de 50 kHz, temos 5 kHz para a frequência de corte. Outro parâmetro de projeto é adotar a margem de fase em torno de 72 graus.

A função de transferência do inversor a ser utilizada para o cálculo do compensador de corrente, de acordo com [41], é a seguinte:

$$\hat{G}_{id}(s) = \frac{\hat{I}_L(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{2 * L_f * V_{DC}}{L_f * (R_s + L_f * s)} \quad (3.31)$$

### 3.10.2 Implementação Computacional

O sistema de controle supracitado está ilustrado na Figura 3.13. A seta vermelha e pequena destaca o compensador proporcional-integrador. Este foi implementado para a malha de controle de corrente do inversor por meio de um módulo do *software* Matlab, chamado *Sisotool*. Esta ferramenta, permite projeto de compensadores onde se tem um sistema com apenas uma entrada e uma saída disponibilizando-se ferramentas como o local das raízes, diagrama de Bode, *Nichols* e *Nyquist*. Salienta-se ainda que o *Sisotool* possui uma ferramenta de enorme praticidade para otimização do compensador previamente escolhido, bastando para isso, definir a margem de fase e a frequência de corte desejadas.

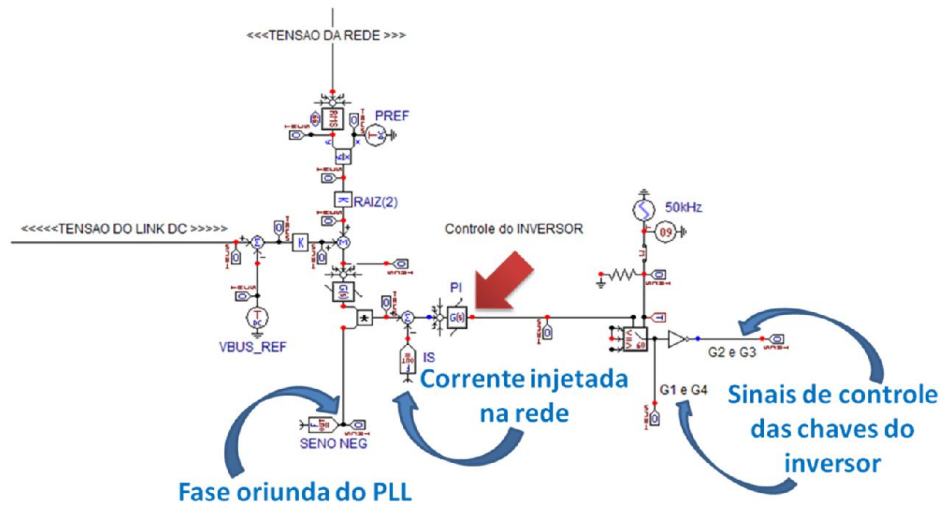


**Figura 3.13 - Sistema de controle do inversor**

A Figura 3.14 a seguir ilustra a arquitetura de controle padrão do Matlab/Sisotool, que foi adotada neste trabalho.

A função de transferência do inversor está representada no diagrama pela letra ‘G’, relativa à planta ou processo a ser controlado. A letra ‘C’ se refere ao compensador a ser

dimensionado. As letras ‘F’ e ‘H’ são respectivamente o pré-filtro e o sensor, considerados unitários. Por fim, a letra ‘r’ simboliza o sinal de entrada e a letra ‘y’ o sinal de saída.

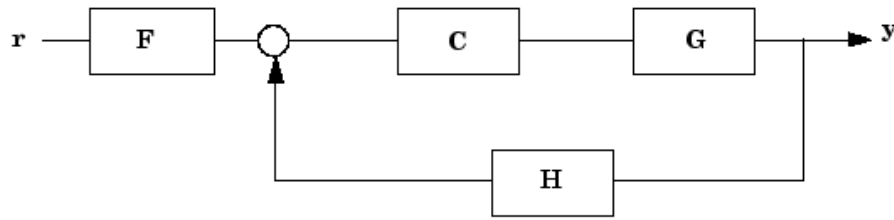


**Figura 3.14 - Arquitetura de controle padrão do Matlab/Sisotool**

A especificação do compensador foi realizada como descrito a seguir. Inicialmente foi criado um script (arquivo de extensão .m). Neste foram declaradas a indutância de acoplamento  $L_f = 2,55e - 3$ , a tensão no link CC  $V_{DC} = 400$  e a resistência da rede  $R_s = 0,1$ . Estas são as três variáveis que definem a função de transferência  $\hat{G}_{id}(s)$  do inversor. Esta deve ser multiplicada pela amplitude da onda moduladora, a triangular. Como já mencionado, o sensor e o pré-filtro assumiram valores unitários. A expressão logo a seguir ilustra a aplicação do *Sisotool*.

$$sisotool(G, C, H, F) \quad (3.33)$$

Executado o script abre-se o gerenciador do *Sisotool*, onde foi *setado* em *Control and Estimation Tools Manager/Automated Tunning/PID Tunning* uma margem de fase igual a 72 graus e uma largura de banda em torno de 5 kHz. Realizadas tais ações, o *software* encontra a função de transferência do compensador proporcional-integrador da malha de controle de corrente do inversor a ser utilizado, como mostra a expressão a seguir.

$$0,009515 \cdot \frac{(s+1.85e4)}{s} \quad (3.34)$$

No diagrama de bode de magnitude pode-se verificar que se trata de um sistema estável. Já no diagrama de fase, ratificam-se os valores de projeto escolhidos para margem de fase e frequência de corte. Veja a Figura 3.15 abaixo.

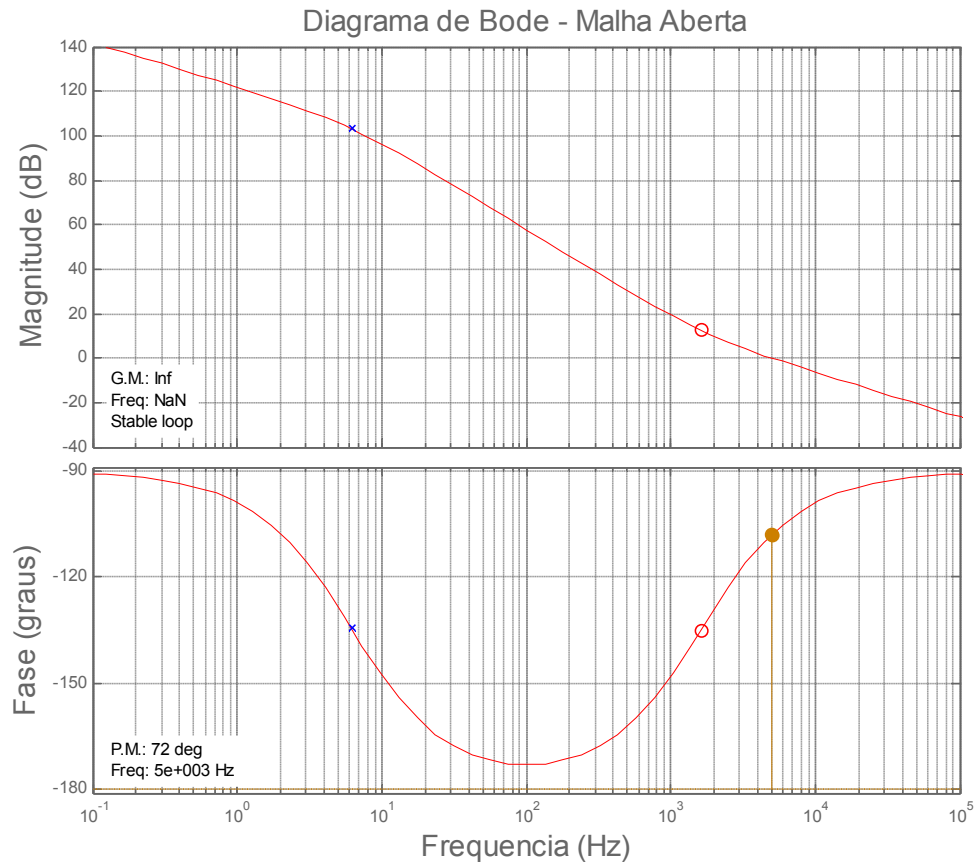


**Figura 3.15 - Diagrama de Bode de malha aberta**

O comportamento do compensador proporcional-integrador pode ser visualizado na Figura 3.16. Pode ser verificado que diante de uma perturbação do tipo degrau unitário, após um *overshoot* de 16,5% em 0,121 milisegundos, o regime permanente é atingido em 0,4 milisegundos.

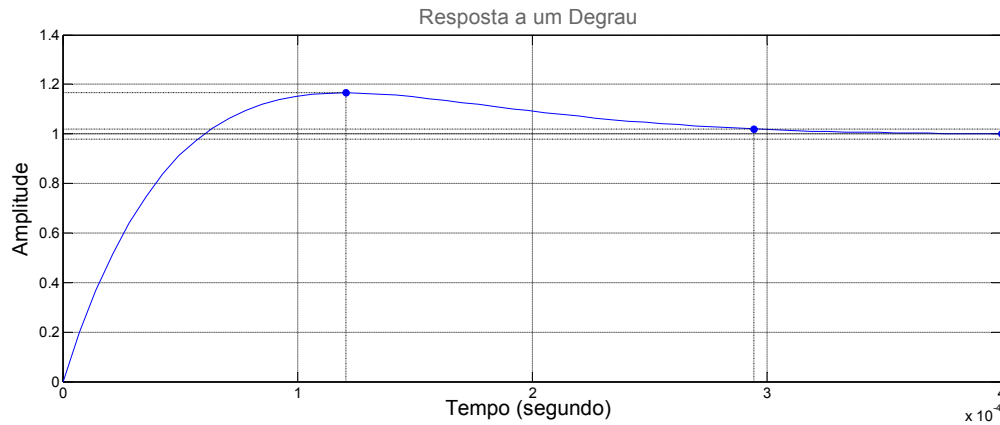


**Figura 3.16 - Resposta do sistema a um degrau**

Esta configuração recém-apresentada não proveu resultados satisfatórios. Diante de tal situação o compensador teve de ser re-parametrizado. Isto se deu empiricamente. Verificou-se então que elevando-se o ganho para 1,5 obtinham-se resultados coerentes com os esperados. Para o novo ganho do compensador o sistema continua estável, havendo um aumento na frequência de corte e na margem de fase.

Com relação à resposta do sistema a um degrau unitário não se tem mais *overshoot*. Seu comportamento passou de subamortecido para criticamente amortecido. O regime permanente é alcançado em 1,4 microsegundos, ou seja, houve um significativo aumento na velocidade de resposta do sistema, como ilustra a Figura 3.17.

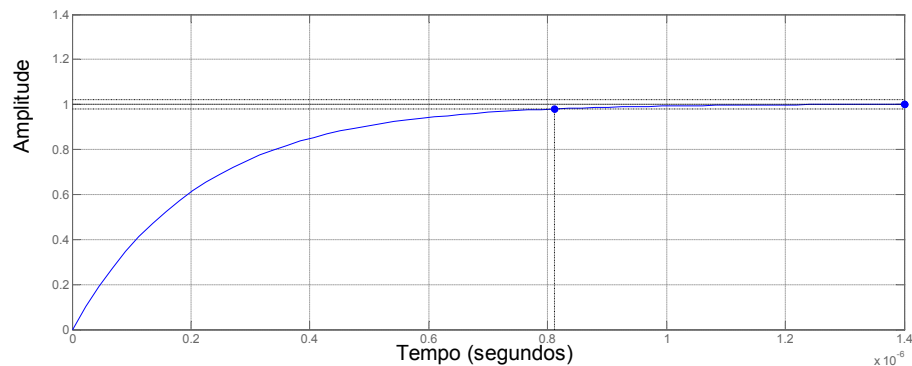


**Figura 3.17 - Nova resposta do sistema a um degrau**

---

## 3.11 A Malha de Captura de Fase

### 3.11.1 Teoria e Modelagem Matemática

A malha de captura de fase (em inglês: *Phase Locked Loop* - PLL) é um circuito que realiza o atracamento em frequência e fase do sistema fotovoltaico. Isto é realizado a partir da leitura da tensão e corrente injetada na rede elétrica.

### 3.11.2 Implementação Computacional

O esquema implementado não considera os requisitos de velocidade de atracamento e imunidade a distúrbios da rede, como conteúdo harmônico. No entanto, apresenta todos elementos estruturais para a operação de um PLL básico. Existem vários algoritmos disponíveis na literatura, os quais são otimizados para acelerar a velocidade de resposta e permitir uma maior blindagem a problemas da rede.

O esquema da malha de captura de fase está ilustrado na Figura 3.18. A partir da leitura da diferença de potencial nos terminais da fonte de tensão é utilizado um multiplicador, de valor inverso ao pico da tensão nominal da rede, para tornar este valor unitário em condição nominal. A partir de então este sinal é multiplicado por um outro oriundo da malha de realimentação do circuito. O resultado deste produto tem o dobro da frequência dos sinais de entrada e realimentação, que são de 60 Hz. Aplicando um filtro passa-baixa (*LO\_PASS*) serão eliminados os sinais de alta frequência. Desta forma, elimina-se as harmônicas do sinal de entrada. Além disso, o filtro foi implementado para atenuar o sinal de forma a obter o valor médio desta onda senoidal. Para tal fim, foi utilizado um filtro de um polo com frequência de corte em 6 Hz, ou seja, o sinal de 60 Hz estará atenuado de 20 decibéis. Em seguida, é colocado um proporcional-integrador de ganho 100 e constante de tempo 0,15 segundos. Tem-se então um sinal de frequência angular em radianos por segundo, definido pelo dobro da frequência elétrica em hertz vezes o número PI (aproximadamente 3,14). Executando-se, enfim, a integração desta frequência encontra-se a fase deste sinal. Aplicando-se a função cosseno a esta termina a malha de captura de fase.

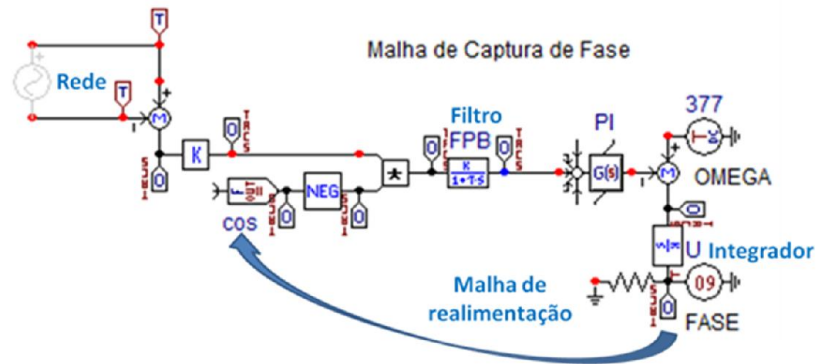


**Figura 3.18 - Malha de captura de fase**

### 3.12 A Rede

A rede foi implementada utilizando-se uma fonte de tensão alternada senoidal desconectada (*ACIPHUG*) de 311 V e 60 Hz. Como as fontes alternadas do ATP geram sinais cossenoidais, para transforma-lá para senoidal bastou atrasar a fase de 90 graus. Isto foi feito para dar sentido à implementação da malha de captura de fase. Se esta ação não tivesse sido realizada o PLL não atuaria para injetar a corrente na rede com fator de potência unitário.

## CAPÍTULO 4 ESTUDOS COMPUTACIONAIS

### 4.1 Considerações Iniciais

Neste quarto capítulo serão apresentados, inicialmente, resultados preliminares das partes constituintes do sistema e somente então, serão expostos os estudos dos casos realizados com o sistema completo.

Em um primeiro momento, Caso-1, serão verificadas as respostas do painel fotovoltaico isolado alimentando uma carga resistiva. A seguir, adicionaremos o conversor elevador de tensão com o rastreador do ponto de máxima potência, Caso-2. Será analisado ainda o funcionamento da malha de captura de fase, Caso-3. E somente então o sistema será todo conectado à rede, Caso-4.

### 4.2 Casos estudados

#### 4.2.1 Caso 1: Painel Fotovoltaico operando isoladamente

Neste primeiro Caso, serão analisadas as curvas características de corrente *versus* tensão do módulo e depois de todo o painel fotovoltaico. E ainda, estas serão comparadas com os valores e curvas fornecidas pelo fabricante em sua folha de dados.

Como apresentado anteriormente, os parâmetros foram extraídos do *datasheet* de um módulo policristalino do fabricante KYOCERA, modelo KD135SX-UPU.

Sabendo que o valor da resistência série está relacionado com a queda de tensão nos contatos das células, ele será função da temperatura. Ou seja, se há variação na temperatura, a resistência série também vai variar seu valor.

Para que o valor da resistência série correspondesse à operação em temperatura ambiente igual a 25 °C, neste trabalho, foi utilizado uma ferramenta do *software* PowerSim denominada *Solar Module (Physical Model)*. Por meio deste é possível entrar com os parâmetros do módulo, oriundos do fabricante, e assim, por um processo iterativo encontrar o melhor ajuste para simulação. Esta operação, trata-se na verdade, de fornecer um valor para a resistência shunt e assim encontrar o valor de resistência série para que a curva de potência do módulo fique o mais próxima possível daquela encontrada no *datasheet*.

Inicialmente são definidos duas condições de operação: a irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> e a temperatura ambiente de 25 °C.

---

Em seguida, o próximo grupo de dados são aqueles extraídos da folha de dados do fabricante: número de células igual a 36; potência máxima 135 W; tensão no ponto de máxima potência 17,7 V; corrente no ponto de máxima potência 7,63 A; tensão de circuito aberto 22,1 V; Corrente de curto-circuito 8,37 A; coeficiente de temperatura da tensão -0,08 V/°C; e coeficiente de temperatura da corrente 0,00502 A/°C. Ainda, juntamente com estes dados deve-se informar também as condições de teste padrão: irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura de referência 25 °C, e ainda o *slope* (dv/di) -0,44 V/A.

A determinação do *slope* foi realizada por meio de análise das curvas de tensão *versus* corrente encontradas no *datasheet* do fabricante. Este cálculo é realizado tomando dois pontos da região linear das curvas, após o ponto de máxima potência. A partir destes pontos é realizada a divisão da variação de tensão pela variação de corrente, ou seja, dv/di.

Existe ainda outro grupo de parâmetros do modelo. Nele estão contidos a banda de energia de 1,12 eV, o fator de idealidade 1,2 ; o coeficiente que determina o quanto a irradiância afeta a temperatura das células solares, considerado igual a 0,003; e por último o valor da resistência shunt, 1000 ohm.

A partir da entrada destes dados o *software* calcula o coeficiente de temperatura, neste caso encontrando o valor 0,005 A/K, a corrente de saturação igual a 1,94E-8 A, e uma resistência série de 0,0085 ohm.

A Figura 4.1 ilustra as (a) curvas retiradas da folha de dados do fabricante e (b) aquelas geradas pelo modelo desenvolvido no ATP para as mesmas temperaturas. Visivelmente se constata a grande semelhança das curvas nos quesitos: valores e comportamento.

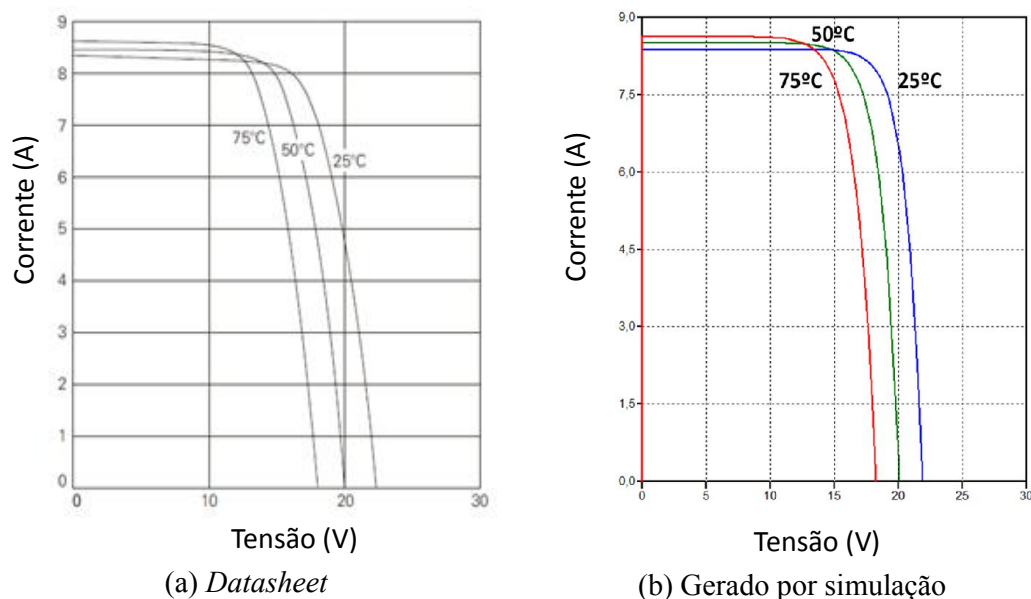


**Figura 4.1 - Características de tensão e corrente dos módulos fotovoltaicos para três temperaturas distintas**

Os resultados apresentados na Figura 4.1 foram realizados para uma irradiância constante igual a  $1000 \text{ W/m}^2$  e massa de ar de 1,5.

Realizadas as simulações deste Caso1 verificou-se os valores de corrente para as três temperaturas. Aos  $25^\circ\text{C}$  a corrente de curto medida é de 8,38 A.

A Tabela 4.1 apresenta as especificações elétricas do módulo Kyocera KD135SX-UPU nas condições padrões de teste. Nesta verificamos que a corrente de curto-circuito é igual a 8,37 A. Portanto, o valor oriundo da simulação equivale a um erro de apenas 0,1%.

**Tabela 4.1 - Especificações elétricas do módulo KD135SX-UPU em CPT**

| Condições Padrões de Teste [*CPT]                    |                                                  |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Máxima Potência                                      | 135 Watts                                        |
| Tolerância                                           | +5% / -5%                                        |
| Voltagem de Máxima Potência                          | 17.7 Volts                                       |
| Corrente de Máxima Potência                          | 7.63 Amps                                        |
| Voltagem de Circuito Aberto                          | 22.1 Volts                                       |
| Corrente de Curto-Circuito                           | 8.37 Amps                                        |
| Voltagem Máxima do Sistema                           | 600 Volts                                        |
| Coefficiente de Temperatura da Corrente ( $I_{cc}$ ) | $(5.02 \times 10^{-3}) \text{ A/}^\circ\text{C}$ |
| Coefficiente de Temperatura da Voltagem ( $V_{ca}$ ) | $(-8.0 \times 10^{-2}) \text{ V/}^\circ\text{C}$ |

\*CPT: Irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$ , Espectro de Massa de Ar 1.5 e Temperatura de Célula de  $25^\circ\text{C}$ .

Na Figura 4.2 são apresentadas (a) as curvas da folha de dados do fabricante para cinco níveis de irradiância solar e na parte (b) da mesma figura, são mostrados os resultados oriundos das simulações. Estas por sua vez foram feitas com a temperatura fixa a 25 °C e massa de ar de 1,5.

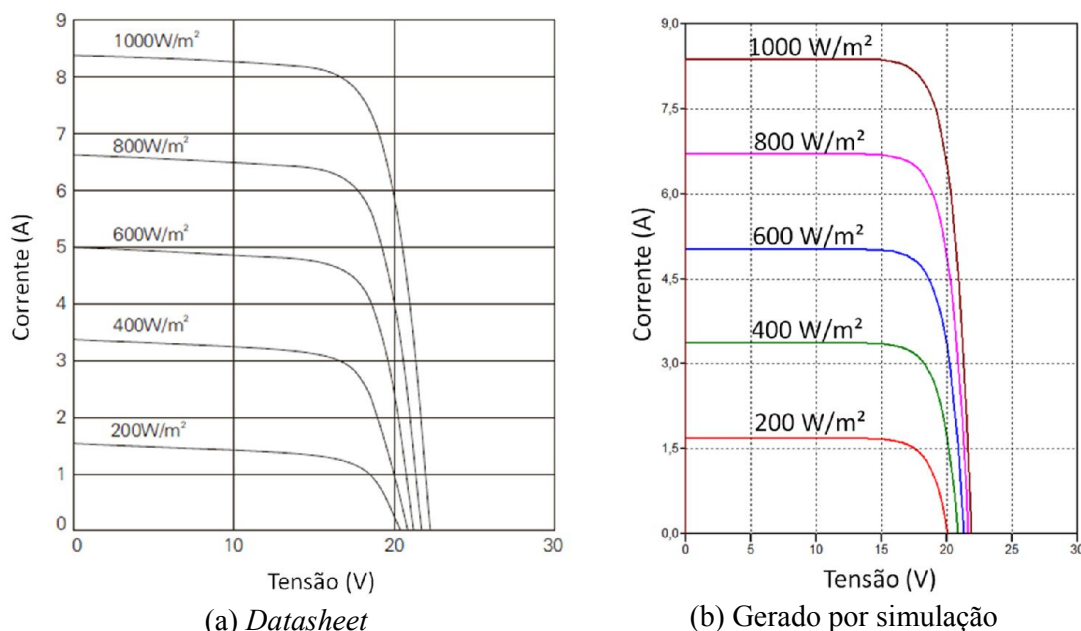


**Figura 4.2 - Características de tensão e corrente dos módulos fotovoltaicos para cinco níveis de irradiância**

Os resultados gráficos originados de simulação computacional, apresentados até este momento, foram gerados a partir de um único módulo fotovoltaico. No entanto, neste trabalho, o arranjo escolhido é composto por oito módulos ligados em série, ou seja, trata-se de apenas uma *string* de oito módulos.

Módulos são colocados em série até que se alcance a tensão desejada e, em paralelo, para que se aumente a potência disponível pelo arranjo.

Ressalta-se que o modelo desenvolvido permite a simulação de um arranjo completo. Bastando, para isso, fornecer a quantidade de *strings* e o número de módulos que serão conectados em cada uma delas.

Na Figura 4.3 está ilustrado a característica de tensão versus corrente de todo o arranjo fotovoltaico, onde foi constatada uma corrente de curto-circuito de 8,38 A e uma tensão de circuito aberto igual a 175,7 V, apenas 0,6% abaixo do valor teórico esperado (176,8 V).

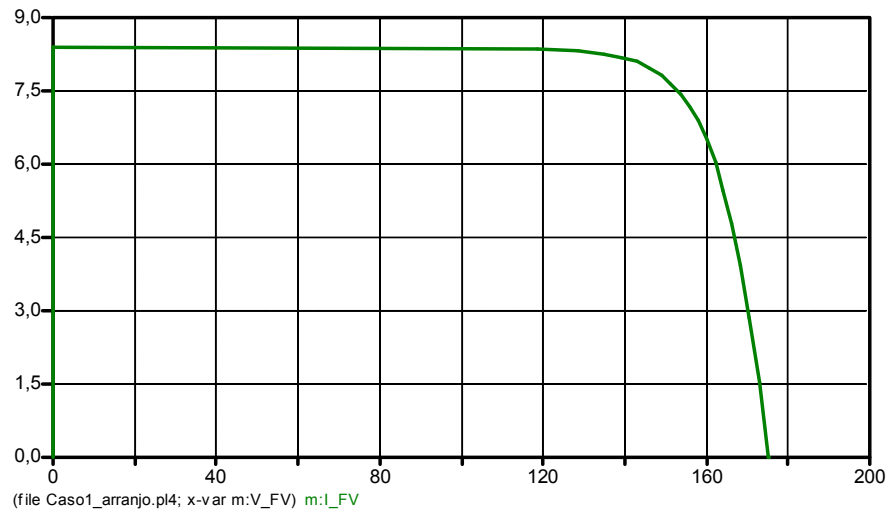


**Figura 4.3 - Características de tensão e corrente do arranjo fotovoltaico**

#### 4.2.2 Caso 2: Conversor Elevador de Tensão e MPPT

Até esta etapa o painel fotovoltaico foi conectado, apenas, ao conversor elevador de tensão e o rastreador do ponto de máxima potência. A tensão de entrada do *boost* assumirá o um valor igual a 141,6 V, já que a irradiância é constante e igual a 1000 W/m<sup>2</sup>. A temperatura ambiente também não varia, e tem valor de 25 °C. Já na sua saída será conectada uma carga resistiva de 148,148 ohms, valor calculado para operação no ponto de máxima potência. A tensão de projeto no barramento CC<sup>56</sup> é de 400 V.

A Figura 4.4 ilustra a tensão de entrada do *boost*, 141,6 V, na cor vermelha, e sua tensão de saída, 400 V, na cor verde.

<sup>56</sup> CC - Corrente Contínua.

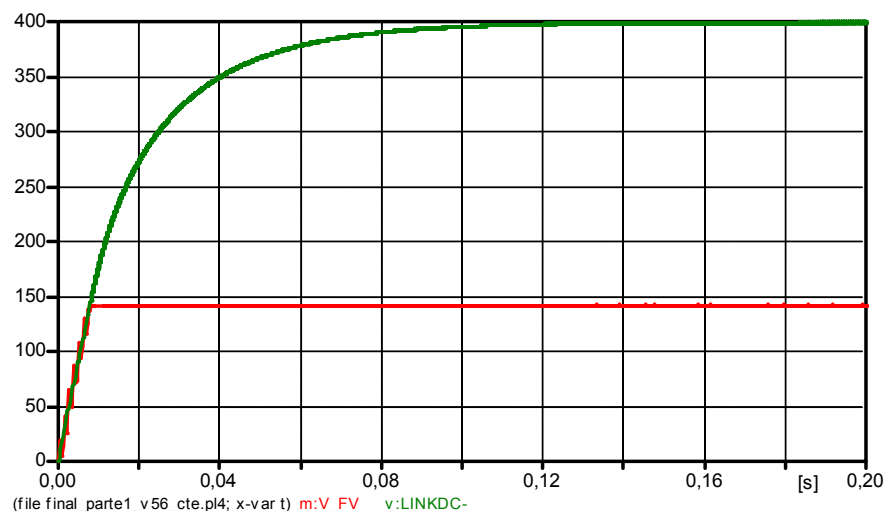


**Figura 4.4 - Tensões na entrada (vermelho) e saída (verde) do *boost***

Já na Figura 4.5 constata-se que a tensão de referência gerada pelo controle ( $141,6 \pm 0,1$  V) foi eficaz mantendo a tensão do painel em aproximadamente 141,6 V, tensão de operação no ponto de máxima potência. Estas mesmas grandezas são mostradas em um *zoom* na Figura 4.6.

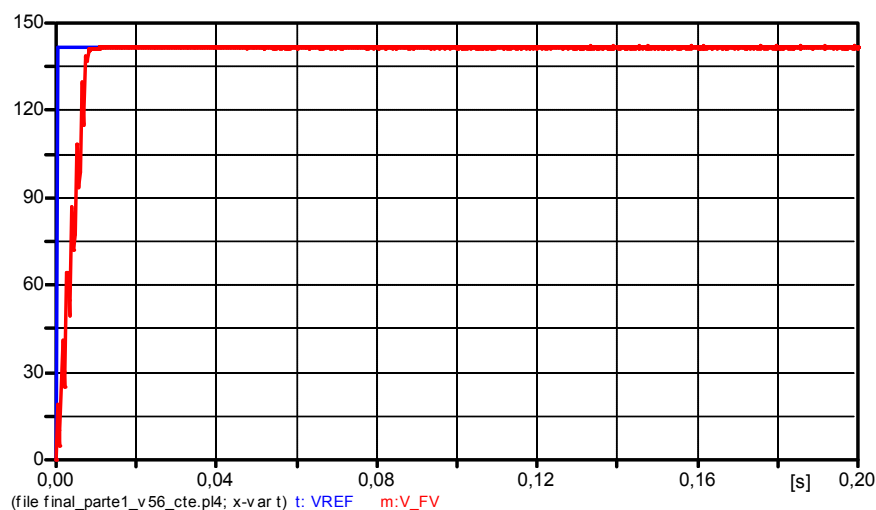


**Figura 4.5 - Tensões na entrada (vermelho) e de referência (azul) gerada pelo MPPT**

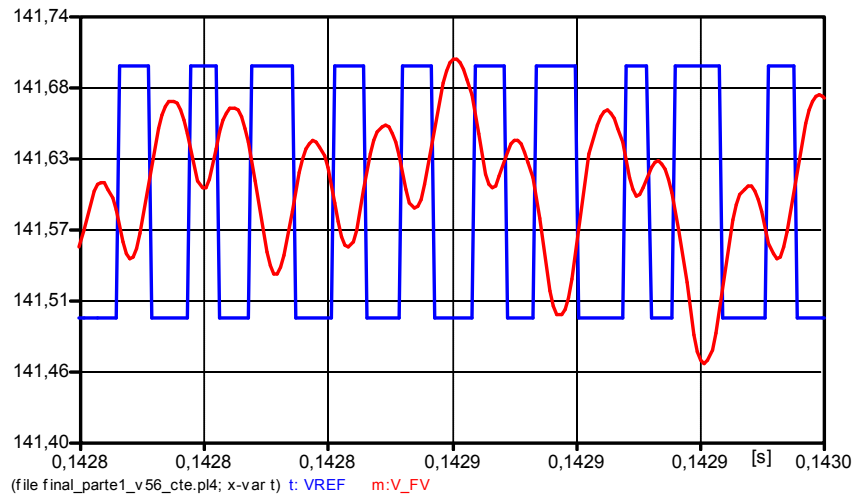


**Figura 4.6 - Zoom das tensões na entrada (vermelho) e de referência (azul) gerada pelo rastreador do ponto máxima potência**

A Figura 4.7 mostra um *zoom* das correntes do conversor elevador de tensão. A corrente de saída do painel fotovoltaico, a mesma de entrada do *boost*, é exibida na cor azul e tem valor eficaz igual a 7,63 A, medido no ATP. A corrente na chave, em vermelho, tem valor eficaz de 4,93 A e a corrente que sai do *boost*, na cor verde, 2,7 A.

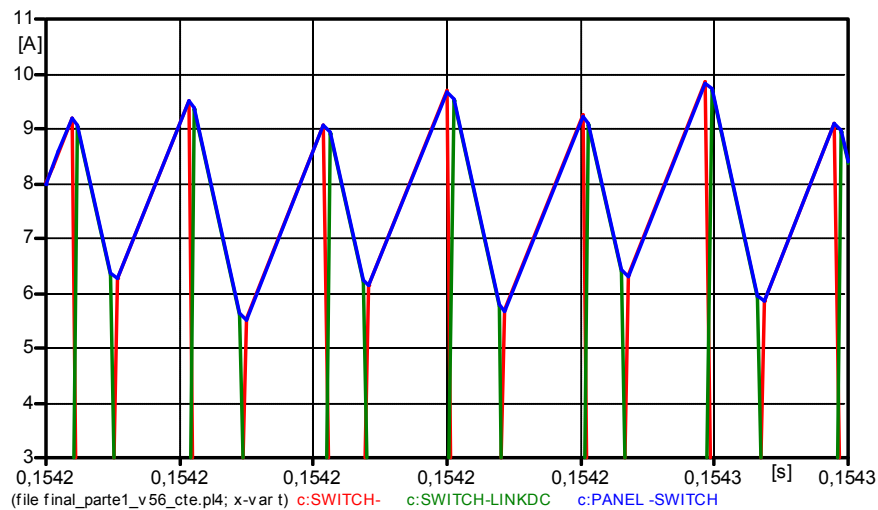


**Figura 4.7 - Zoom nas correntes de entrada (azul), saída (verde) e na chave (vermelho) do conversor elevador de tensão**

### 4.2.3 Caso 3: Malha de Captura de Fase

Para prover variações de teste, como degrau de frequência e saltos de fase, foi implementada uma rede elétrica como fonte de tensão controlada, com entrada para frequência e um somador para aplicação de saltos de fase.

A fim de avaliar o desempenho da malha de captura de fase foram aplicados 4 distúrbios num intervalo de 2 segundos de simulação. O oscilador do PLL parte com mesma frequência e fase que a rede, então são aplicadas as perturbações de frequência e fase:

Em 2,1 s, um degrau ascendente de 377 rad/s (60 Hz) para 408,4 rad/s (65 Hz) é aplicado à rede; Em 2,6 s, um degrau descendente de 408,4 rad/s (65 Hz) para 377 rad/s (60 Hz) é aplicado à rede; Em 3,1 s é aplicado um avanço de fase na rede de 1,57 rad (90°); E em 3,6 s é aplicado um atraso de fase na rede de 1,57 rad (90°);

A Figura 4.8 mostra os resultados de simulação para a frequência angular da rede, em vermelho, e a frequência angular do PLL, em azul. Já a Figura 4.9 ilustra a diferença de fase entre a rede e o oscilador do PLL. Após o transitório gerado em cada perturbação, observa-se o atracamento em frequência e fase da malha de captura de fase com a rede.

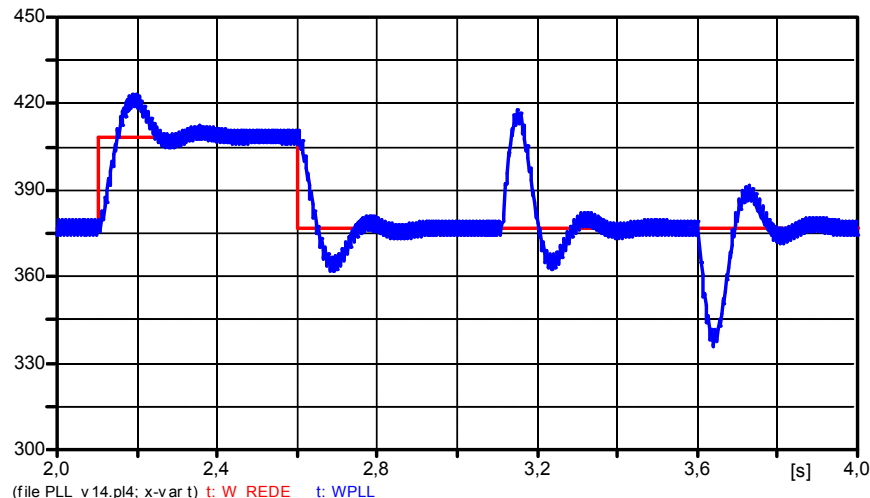


**Figura 4.8 - Frequência angular da malha PLL e da rede**

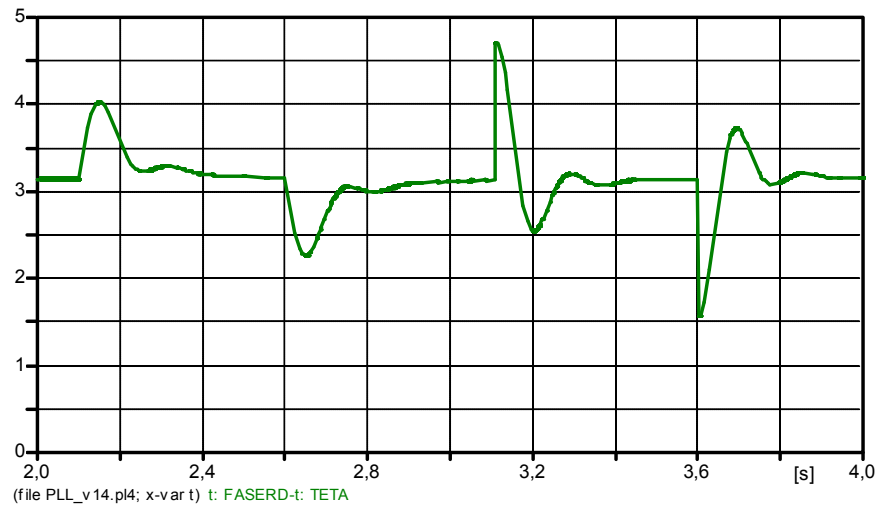


**Figura 4.9 - Diferença de fase entre a rede e o oscilador PLL**

#### 4.2.4 Caso 4: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica

Neste último caso, serão apresentados os resultados das simulações de todo o sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. Devido ao grande tamanho do diagrama, para facilitar a ilustração, o sistema completo foi dividido em duas partes. Na primeira parte tem-se a representação do painel fotovoltaico (FV), do conversor elevador de tensão (*boost*), e do controle de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). A resistência em série com uma chave no link CC é do tipo *normalmente fechada* e só é aberta após um tempo suficiente para sincronização da malha de captura de fase (PLL). Esta, por sua vez, está presente na segunda parte do sistema, juntamente com o inversor, seu controle e o indutor de acoplamento à rede.

Os módulos FV têm a função básica de geração de energia, podendo ser conectados em série ou em paralelo. No presente trabalho foram considerados oito módulos fotovoltaicos conectados em série.

A estrutura do conversor elevador de tensão *boost* é utilizada com o objetivo de elevar a tensão e fazer o rastreamento da máxima potência (MPPT) da associação de painéis fotovoltaicos utilizados.

Para a conexão com a rede elétrica, foi utilizado o inversor para injetar na rede toda a energia gerada pela associação dos painéis em forma de potência ativa. A tensão de projeto de saída do *boost* (400 V) é aquela do barramento CC e também a mesma da entrada do inversor.

Esta tensão foi escolhida como sendo maior que a tensão de pico de saída do inversor (311 V).

As duas figuras a seguir ilustram as partes constituintes de todo o sistema de geração fotovoltaica e os pontos sinalizados com as letras ‘A’ e ‘B’ são comuns.

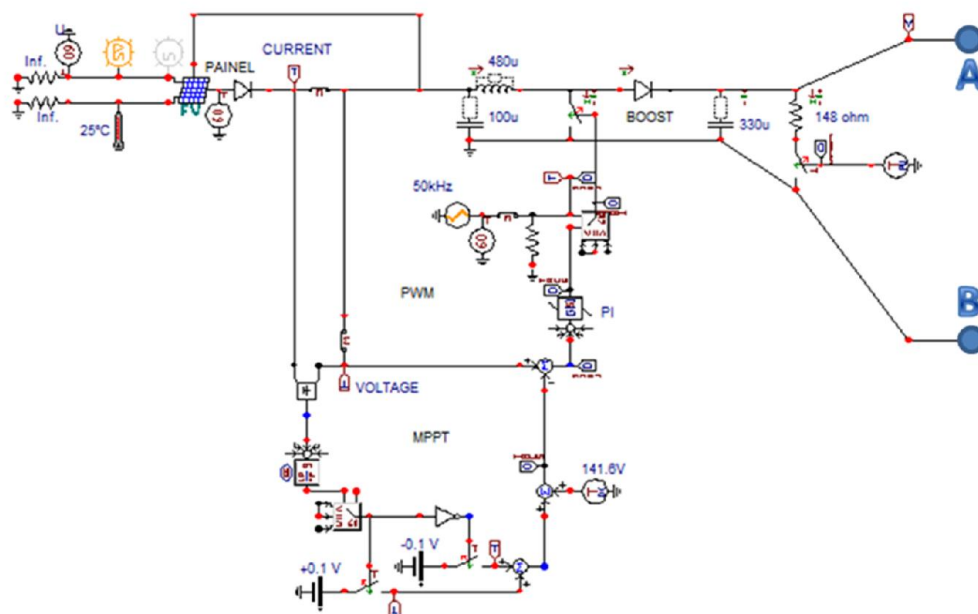


**Figura 4.10 - Parte 1 do Circuito Completo**

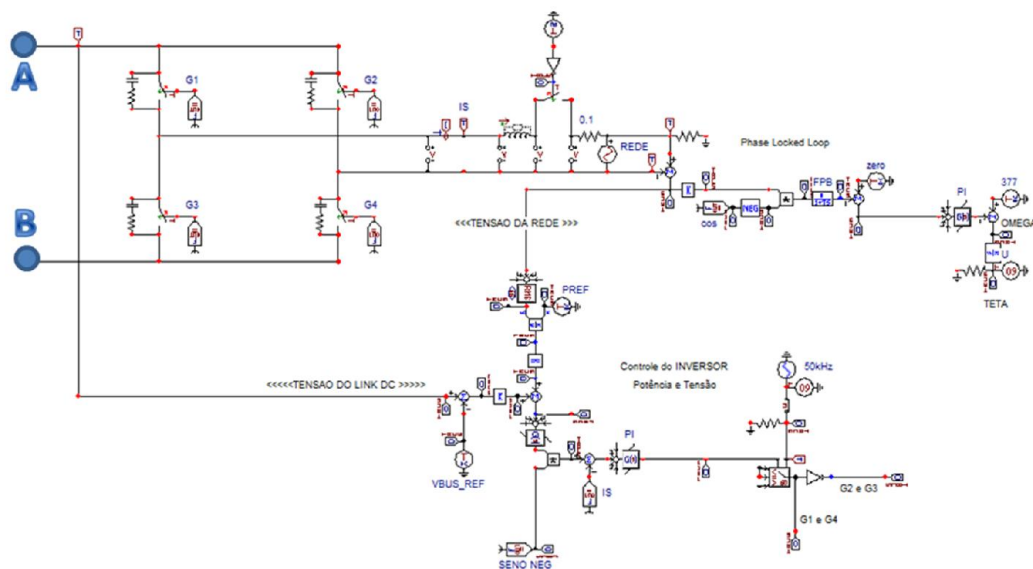


**Figura 4.11 - Parte 2 do Circuito Completo**

Sabe-se que a tensão e principalmente a corrente gerada em uma célula fotovoltaica são extremamente dependentes da irradiância solar, e que esta grandeza apresenta variações intempestivas ao longo do dia, sendo assim o perfil criado para as simulações neste trabalho, ilustrado na Figura 4.12, contempla variações bruscas para as mesmas intensidades padrão existentes na folha de dados do módulo.

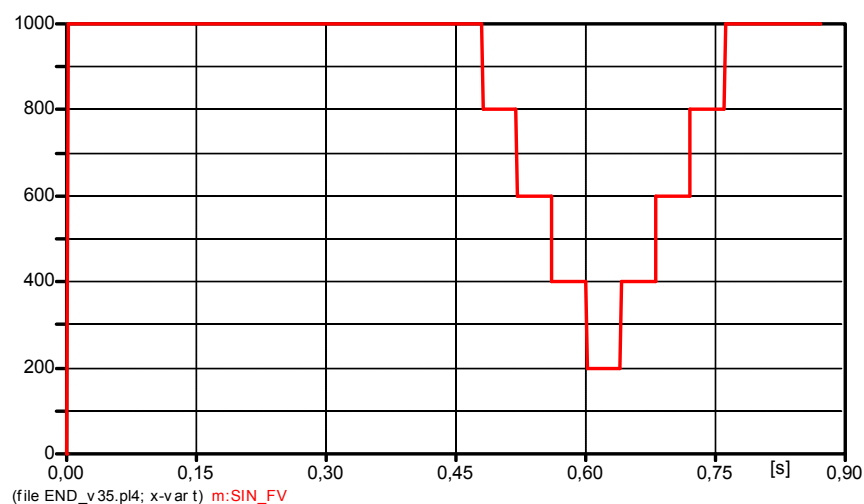


**Figura 4.12 - Perfil de irradiância solar**

Analisando-se o comportamento da corrente elétrica, verifica-se uma relação intensa com a irradiância solar, ou seja, grandes quedas na irradiância provoca grandes quedas na intensidade da corrente e vice-versa.

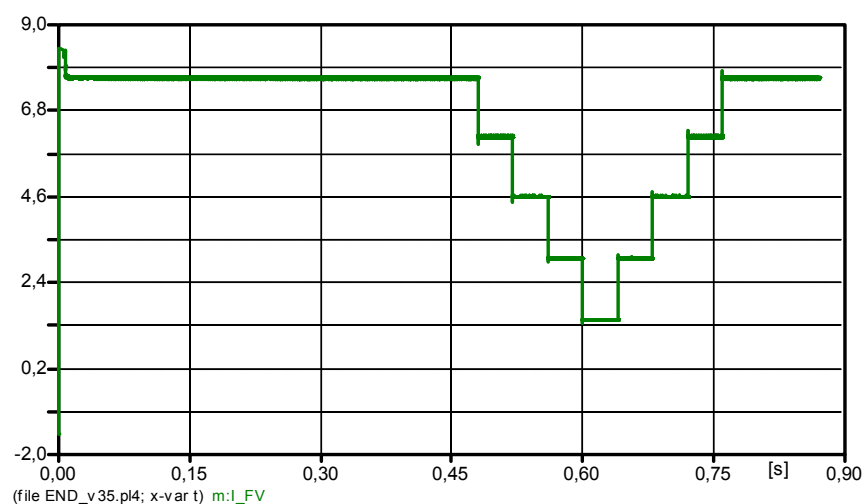


**Figura 4.13 - Corrente elétrica gerada pelo painel fotovoltaico**

A Figura 4.14 foi gerada a partir de um *zoom* no início da Figura 4.13, onde nota-se que a intensidade da corrente elétrica inicia-se em seu valor de curto circuito igual 8,37 A, coincidindo com o valor fornecido no *datasheet*. A seguir, passado o transitório a intensidade de corrente passa a 7,63 A, valor este referente à operação do sistema em condições de teste padrão.

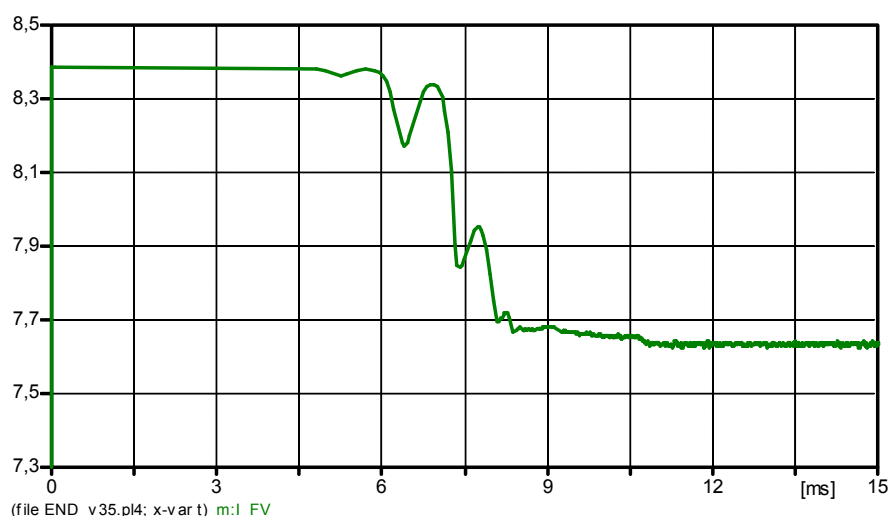


**Figura 4.14 - Corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico**

A tensão no link CC pode ser visualizada na Figura 4.15. Seu valor aumenta até estabilizar pouco abaixo de 400 V, isso enquanto a chave de conexão com a rede estiver aberta. Após o fechamento da chave, e assim, efetiva conexão do sistema fotovoltaico solar à rede elétrica verifica-se que quanto maior for a irradiância maior serão as oscilações de tensão no link CC em torno de um valor pouco abaixo de 400 V. A chave só é manobrada após o efetivo atracamento em frequência e fase do sinal de corrente, gerado pelo PLL, com a tensão da rede. Esta ação permitirá a injeção de corrente elétrica com fator de potência unitário.

A Figura 4.16 ilustra duas ondas defasadas. Aquela na cor azul é a tensão da rede (311 V de pico), que por sua vez é lida pela malha de captura de fase e assim gerado o sinal na cor verde proverá a fase para a corrente a ser injetada na rede. A partir do instante inicial de análise, tempo nulo, o sinal do PLL encontra-se atrasado com relação à tensão da rede. Em seguida o sinal se adianta e o atracamento só se realiza em torno de 0,25 segundos. Ainda sobre a Figura 4.16, o eixo das ordenadas à esquerda corresponde à tensão da rede e aquele à direita ao sinal do PLL.

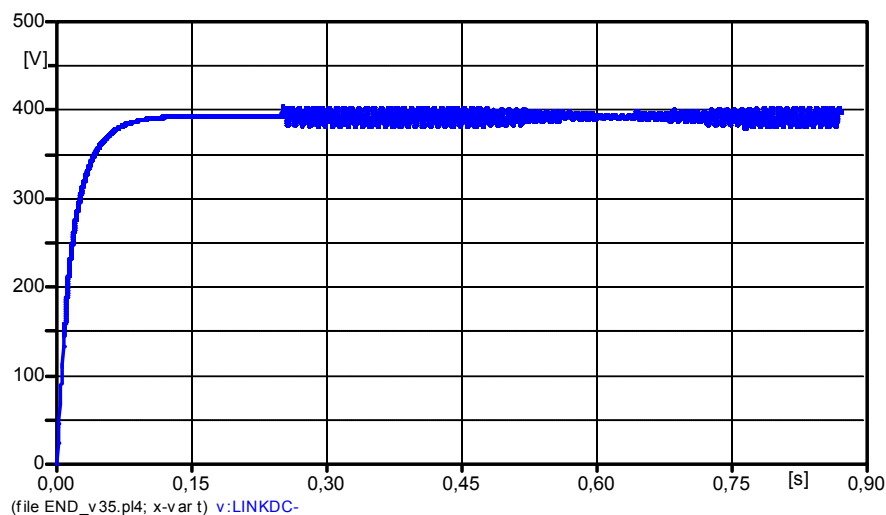


**Figura 4.15 - Tensão no link CC**

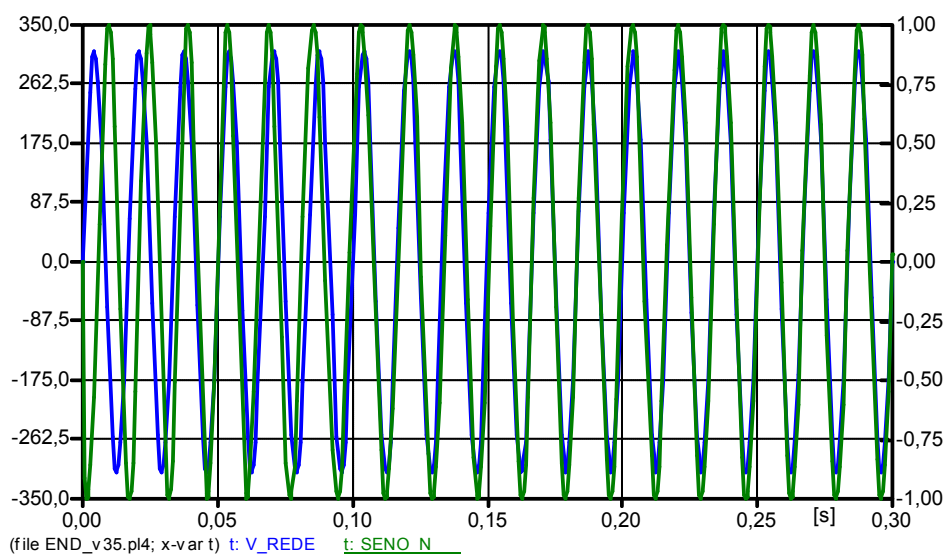


**Figura 4.16 - Atracamento em fase gerado pelo PLL**

A corrente elétrica com fator de potência unitário pode ser visualizada na Figura 4.17. A corrente permanece nula até a conexão do sistema FV à rede. Isto ocorre no tempo 0,25 segundos. Enquanto o sistema permanece em condições STC a corrente assume valor eficaz de 4,73 A com THDi<sup>57</sup> igual a 2,56%. Neste período o sistema injeta na rede uma potência de 1040,6 W, ou seja, o inversor opera com 96% de eficiência.

<sup>57</sup> THDi - Taxa de distorção harmônica de corrente total.

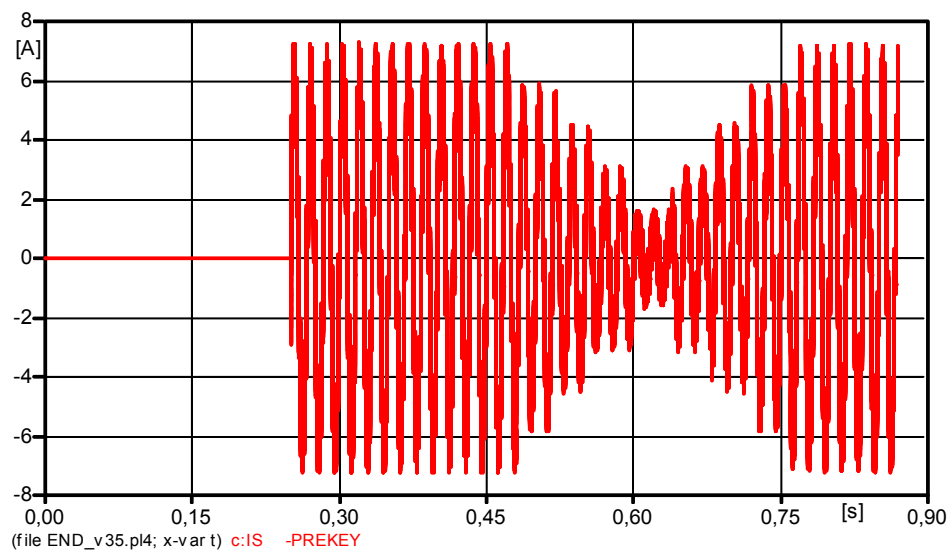


**Figura 4.17 - Corrente elétrica injetada na rede elétrica**

**Tabela 4.2 - Valores referentes à corrente apresentada na Figura 4.17**

| <b>Irradiância</b><br><b>[W/m<sup>2</sup>]</b> | <b>Corrente</b><br><b>[A]</b> | <b>THDi</b><br><b>%</b> | <b>Potência</b><br><b>[W]</b> |
|------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| <b>1000</b>                                    | 4,73                          | 2,56                    | 1040,6                        |
| <b>800</b>                                     | 3,76                          | 2,59                    | 827,2                         |
| <b>600</b>                                     | 2,79                          | 2,60                    | 614,7                         |
| <b>400</b>                                     | 1,80                          | 2,85                    | 396,7                         |
| <b>200</b>                                     | 0,76                          | 4,35                    | 168,1                         |

A Figura 4.18 foi gerada a partir de um *zoom* aplicado em um gráfico onde se tinha a corrente elétrica injetada na rede elétrica e seu sinal de referência criado pelo PLL. Esta figura comprova a adequada operação do controle do inversor. A alteração brusca verificada se refere à mudança de irradiância solar de 600 W/m<sup>2</sup> para 400 W/m<sup>2</sup> no instante 0,56 segundos.

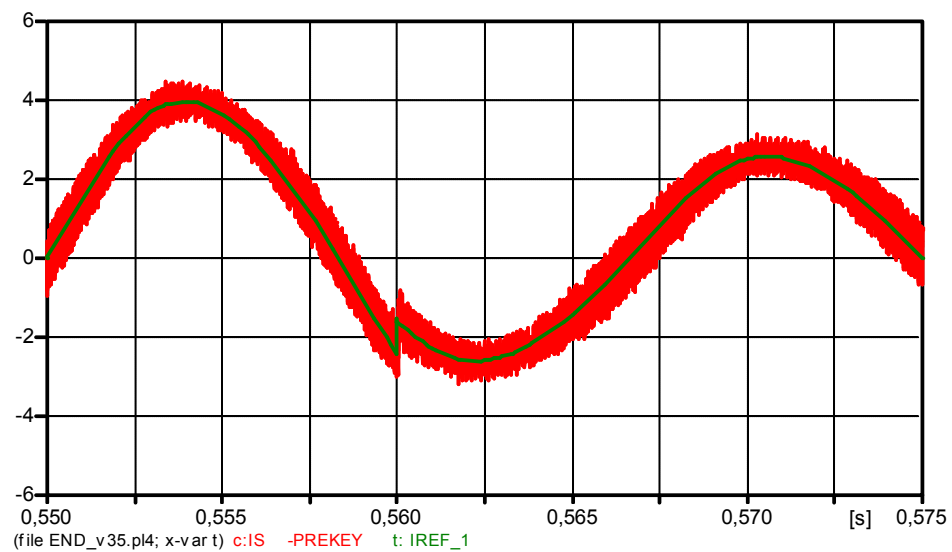


**Figura 4.18 - *Zoom* na corrente e seu sinal de referência gerado no PLL**

## CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação se apresenta como material introdutório para estudo de sistemas solares fotovoltaicos. Em seu início, o tema foi criteriosamente contextualizado por meio de um histórico desde as utilizações mais primitivas da energia solar até que se chegasse aos arranjos fotovoltaicos conectados à rede. Ao longo deste percurso foram contemplados os principais conceitos relacionados não só ao sistema elétrico (painel mais dispositivos de eletrônica de potência), mas também à trajetória do Sol e às características da radiação solar. Em seguida, foram modelados matematicamente os componentes que compõem todo o sistema.

O Brasil se encontra em estágio inicial com relação à utilização de energia fotovoltaica, porém, possui um enorme potencial de exploração. O número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede vem aumentando e seu aproveitamento deverá ter um salto considerável nos próximos anos, principalmente com a recente aprovação da REN 482/2012 pela ANEEL.

Diante das perspectivas para o uso da tecnologia, existe uma demanda crescente por estudos cada vez mais criteriosos objetivando analisar o comportamento dos arranjos fotovoltaicos conectados à rede elétrica sob diversas situações de operação. Neste sentido, o desenvolvimento de ferramentas computacionais adequadas que viabilizem tais investigações se mostra vital para o planejamento da inserção dos sistemas supracitados. Assim, este trabalho encontra seu principal fundamento.

O emprego do *software* ATP, tanto no setor elétrico nacional quanto internacional, com sua interface ATPDRAW, sistema de controle TACS e linguagem MODELS, possibilita oferecer aos usuários um amplo leque de possibilidades para o desenvolvimento de modelos técnicos específicos para o campo da geração distribuída. Além disso, por apresentar um desempenho computacional satisfatório e recursos gráficos bastante amigáveis, bem como outras vantagens já citadas neste trabalho, esta ferramenta se mostra uma alternativa extremamente interessante para implementação, estudo e avaliação de desempenho de sistemas FV.

Foi realizada a modelagem de um sistema de geração solar fotovoltaica conectado à rede de baixa tensão. Suas principais partes constituintes são: painel fotovoltaico, conversor elevador de tensão (*boost*) e seu controle com rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), inversor de tensão com seu controle integrado com a malha de captura de fase (PLL) e, indutor de acoplamento. Para tal, foram utilizados técnicas e equacionamentos no domínio

---

do tempo que levaram à elaboração de blocos elétricos representativos referentes a cada um dos componentes do sistema.

Verificou-se que o *software* escolhido apresenta ótima eficiência atendendo os objetivos pretendidos nesta pesquisa. A validação dos resultados das simulações do painel fotovoltaico ocorreu por meio de comparação com os dados oriundos do *datasheet*. Com relação à etapa de modelagem, a linguagem MODELS possibilitou uma programação via “linhas de código” do principal componente do sistema, o painel fotovoltaico, bloco ainda inexistente na biblioteca própria do ATP. Este recurso foi também usado na criação do perfil de irradiância e das ondas portadoras (triangulares) dos PWM empregados no chaveamento do *boost* e do inversor. Com relação aos sistemas de controle foi utilizado a TACS e para os dispositivos de eletrônica de potência e sistema elétrico, elementos discretos como resistor, indutor, capacitor, diodo, chave e fonte de tensão.

Merece relevância as estratégias de controle utilizadas para controlar as chaves do conversor elevador de tensão e do inversor, assim como o emprego da malha de captura de fase. Estes pontos mostram que se buscou representar neste trabalho um sistema fotovoltaico completo. No entanto, não foram realizadas comparações entre as diversas estratégias e técnicas possíveis de serem aplicadas, foram escolhidas aquelas mais conhecidas e utilizadas na prática.

Para trabalhos futuros, sugere-se contemplar a questão supracitada, ou seja, poderão ser adotados outros modelos para a célula fotovoltaica, diversas estratégias de controle, tanto para o *boost* quanto para o inversor, diferenciados algoritmos para o MPPT e técnicas para o PLL.

O modelo computacional desenvolvido prevê a injeção de corrente elétrica na rede com fator de potência unitário, no entanto, pode-se alterar o controle da fase fornecida pelo PLL de forma que se possa simular um painel fotovoltaico que permita geração ou absorção de potência reativa.

Poderão também ser realizados diversificados tipos de estudos em diferentes áreas da engenharia elétrica como, por exemplo, qualidade de energia e dinâmica de sistemas.

Propõe-se ainda uma montagem prática para validação experimental do sistema apresentado nesta dissertação.

Enfim, constatou-se que os resultados encontrados foram bastante animadores, que o *software* ATP se mostrou eficiente nas simulações e que ainda existe um universo relativamente extenso para trabalhos futuros que tomarão por base esta dissertação ou outras relacionadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005.** *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Brasília, Brasil, 2005. 2ª ed. ISBN: 85-87491-09-1.
- [2] **Lodi, Cristiane. 2011.** *Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada*. Rio de Janeiro, Brasil : Dissertação (Mestrado em PPE-COPPE/UFRJ), 2011.
- [3] **Kalogirou, Soteris A. 2009.** *Solar Energy Engineering - Processes and Systems*. San Diego, California, USA : Elsevier, 2009. ISBN:978-0-12-374501-9.
- [4] **Ragheb, Magdi. 2011.** *Energy Storage and Transport Systems: Bridging the Supply-Demand Gap. Solar Thermal Power and Energy Storage Historical Perspective*. Illinois, USA : Dept. of Nuclear, Plasma and Radiological Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2011.
- [5] *Oil: Never Cry Wolf - Why the Petroleum Age Is Far from over.* **Maugeri, Leonardo. 2004.** 21 de May de 2004, Science Magazine, Vol. 304, pp. 1114-1115. ISSN 0036-8075.
- [6] **Taylor, Margaret R. 2008.** *Beyond Technology-Push and Demand-Pull: Lessons from California's Solar Policy*. California, USA : Energy Economics, Forthcoming., 31 de July de 2008. Vol. 30, pp. 2829-2854.
- [7] **Dutra, Ricardo Marques. 2007.** *Propostas de Políticas Específicas Para Energia Eólica no Brasil Após a Primeira Fase do Proinfa* . Rio de Janeiro : Tese de Doutorado COPPE/UFRJ, 2007.

- 
- [8] **González, Pablo del Río. 2008.** *Ten years of renewable electricity policies in Spain: An analysis of successive feed-in tariff reforms.* [Energy Policy]. August de 2008. Vol. 36, pp. 2917-2929. ISSN 0301-4215.
- [9] **Pereira, Filipe A. de S. e Oliveira, Manuel A. S. 2011.** *Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica.* Porto, Portugal : Publinústria, 2011. ISBN: 978-972-8953-78-2.
- [10] **PROCLIRA. 2012.** Projecto PROCLIRA - Clima e Ambiente. [Online] 2012. [Citado em: 14 de Novembro de 2012.] <http://www.proclira.uevora.pt/modulos/modulo3.pdf>.
- [11] **Site:UFSM. 2012.** Grupo de Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Maria. *UFSM.* [Online] 2012. [Citado em: 15 de Novembro de 2012.] <http://www.ufsm.br/gef/Calor/calor18.pdf>.
- [12] **CRESESB. 2012.** CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito / CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. [Online] 2012. [Citado em: 16 de Novembro de 2012.] [http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_solar.htm/](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar.htm/).
- [13] **Corrêa, Manon Perdomo. 2008.** Monografia. *Influência da Radiação Solar na Regeneração Natural De Mata Atlântica.* Rio de Janeiro : Seropédica, 2008.
- [14] **Site:Wolfram\_Math\_World. 2012.** Wolfram Math World. [Online] 2012. [Citado em: 19 de Novembro de 2012.] <http://mathworld.wolfram.com/StereographicProjection.html>.
- [15] **Site:O\_Lápis\_Verde. 2012.** O Lápis Verde. [Online] 2012. [Citado em: 19 de Novembro de 2012.] <http://olapisverde.blogspot.com.br/2011/02/aprenda-usar-cartas-solares.html>.

- 
- [16] **Site:ANEEL/BIG. 2012.** Bando de Informações de Geração - BIG. *Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL*. [Online] 2012. [Citado em: 22 de Novembro de 2012.]  
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>.
- [17] **Site:Eletrobras. 2012.** Usinas-plataforma: aposta no baixo impacto. *Eletrobras Eletronorte*. [Online] 23 de Novembro de 2012.  
[http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/modulos/noticia/noticia\\_0479.html?url=/modulos/home\\_noticias.html](http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/modulos/noticia/noticia_0479.html?url=/modulos/home_noticias.html).
- [18] **Site:Processo\_Industrial. 2012.** Usina Plataforma e o Complexo do Tapajós. *Processo Industrial*. [Online] 23 de Novembro de 2012. <http://processo-industrial.blogspot.com.br/2010/02/usina-plataforma-e-o-complexo-do.html>.
- [19] **Albuquerque, Fábio Lima de. 2011.** Tese de Doutorado defendida na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). *Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Operando como Gerador de Potência Ativa e Compensador de Potência Reativa*. Uberlândia/MG : Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2011.
- [20] **Setas, Miguel. 2012.** O novo ouro brasileiro. *Económico (Portugal)*. [Online] IBT - Internet Business Technologies, SA, 2012. [Citado em: 23 de Novembro de 2012.] [http://economico.sapo.pt/noticias/o-novo-ouro-brasileiro\\_145504.html](http://economico.sapo.pt/noticias/o-novo-ouro-brasileiro_145504.html).
- [21] **ANEEL/RN482. 2012.** *Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012*.
- [22] **Alves, Lucas Máximo. 1995.** Dissertação apresentada ao Instituto de Física de São Carlos. *Estudo da Solidificação e do Processamento Cerâmico de Ligas de Silício-Germânio para Aplicações Termoeletricas*. São Carlos/SP : Universidade de São Paulo, 1995.

- 
- [23] **Site:Photovoltaic\_effect. 2012.** Photovoltaic effect. *Britannica*. [Online] 03 de Dezembro de 2012.  
<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/458271/photovoltaic-effect>.
- [24] **Antonio Luque, Steven Hegedus. 2003.** *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester, England : Wiley, 2003. ISBN: 0471491969.
- [25] **Site:REN21. 2012.** Renewables Global Status Report (GSR) 2012. *REN21*. [Online] 11 de Junho de 2012. [Citado em: 03 de Dezembro de 2012.]  
<http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012.pdf>.
- [26] **A. Goetzberger, V. U. Hoffmann. 2005.** *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Freiburg, Germany : Springer, 2005. ISBN 3-540-23676-7.
- [27] **Sen, Zekai. 2008.** *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. Istanbul, Turkey : Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-133-6.
- [28] **Quaschnig, Volker. 2011.** *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Simulation*. München : Carl Hanser Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42732-7.
- [29] **NREL. 2012.** Solar Photovoltaic Technology Basics. *National Renewable Energy Laboratory*. [Online] 18 de Maio de 2012. [Citado em: 04 de Dezembro de 2012.] [http://www.nrel.gov/learning/re\\_photovoltaics.html](http://www.nrel.gov/learning/re_photovoltaics.html).
- [30] **BlueSol. 2012.** Energia Solar: Como Funciona? – Tipos de Células Fotovoltaicas. [Online] 27 de Janeiro de 2012. [Citado em: 06 de Dezembro de 2012.] <http://www.blue-sol.com/energia-solar/energia-solar-como-funciona-tipos-de-celulas-fotovoltaicas/>.

- 
- [31] **Muller, Jean-Claude. 2008.** *Électricité photovoltaïque*. France : Institut d'électronique du solide et des systèmes InESS (UMR 7163, CNRS-ULP), 2008.
- [32] **Chiang, Ching-Tsan, et al. 2012.** A RSCMAC Based Forecasting for Solar Irradiance from Local Weather Information. *IEEE World Congress on Computational Intelligence*. 2012.
- [33] **González-Longatt, Francisco M. 2005.** Model of Photovoltaic Module in Matlab™. *CONGRESO IBEROAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN*. 2005, II CIBELEC.
- [34] **Barbi, Ivo. 2001.** *Projeto de Fontes Chaveadas*. s.l. : Editora da UFSC, 2001.
- [35] **Faranda, R., Leva, S. e Maugeri, V. 2008.** IEEE. *MPPT techniques for PV Systems: energetic and cost comparison*. 2008.
- [36] **Gaëtan Masson, Marie Latour, Manoël Rekingier, Ioannis-Thomas Theologitis, Myrto Papoutsis. 2013.** European Photovoltaic Industry Association. *Global Market Outlook: For Photovoltaics 2013-2017*. Maio de 2013.
- [37] *Plataforma Solar de Almería*. [Online] [Citado em: 13 de Novembro de 2012.] <http://www.psa.es/webesp/index.php>.
- [38] **Site:Prof2000. 2012.** Prof2000. [Online] 15 de Novembro de 2012. <http://www.prof2000.pt/users/geologia/testes/quiz.htm>.
- [39] **Site:Ciência\_Viva-Guia\_2. 2012.** Ciência Viva - Guia 2. *Conceitos gerais de heliotecnia*. [Online] 2012. [Citado em: 20 de Novembro de 2012.] <http://www.cienciaviva.pt/rede/himalaya/home/guia2.pdf>.

- 
- [40] **Hobbs, D. e Yergin, D. 2005.** *In Search of Reasonable Certainty – Oil and Gas Reserves Disclosure.* s.l. : CERA Report, 2005.
- [41] **Peña, José Carlos Ugaz. 2011.** Dissertação de Mestrado. *Inversor Buck-Boost integrado para aplicações com microgeradores eólicos.* Ilha Solteira : Universidade Estadual Paulista - UNESP.
- [42] **Chris Trueblood, Steven Coley, Tom Key, Lindsey Rogers, Abraham Ellis, Cliff Hansen, Elizabeth Philpot. 2013.** *PV Measures Up for Fleet Duty* Março/Abril, IEEE Power & Energy Magazine: for electric power professionals, 2013, Vol. 11, Número 2.