

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



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CONEXÃO DE GERAÇÃO
SOLAR FOTOVOLTAICA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE
PALMAS-TO VIA MATLAB/PSAT

ORIENTADO: ANDERSON RODRIGO PICCINI
ORIENTADOR: GERALDO CAIXETA GUIMARÃES

Uberlândia, 20 de fevereiro de 2014.

ANDERSON RODRIGO PICCINI

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CONEXÃO DE GERAÇÃO
SOLAR FOTOVOLTAICA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE
PALMAS-TO VIA MATLAB/PSAT**

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

Banca Examinadora

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

Prof. Adélio José de Moraes – Dr. UFU

Prof. Sérgio Manuel Rivera Sanhueza – Dr. UFT

Uberlândia, 20 de fevereiro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela saúde, força, discernimento, paciência, perseverança, fé e capacidade de realizar este sonho.

A minha esposa Ana Maria Denardi Piccini, pelo amor, pela dedicação, pela ajuda e por entender que várias vezes precisei viajar e me ausentar de casa e do nosso convívio, pois este estudo requeria minha atenção exclusiva.

Ao Prof. Geraldo Caixeta por acreditar em mim, pela paciência, pelo conhecimento e pelo apoio dado.

Aos colegas Marcio Augusto Tamashiro, Daniel Araújo Caixeta, Guilherme Henrique Bernardes Cunha e Larissa Marques Peres do Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos pelo apoio técnico e pela amizade.

Ao professor Ernane Antônio Alves Coelho por disponibilizar seu tempo e conhecimento.

À secretária Cinara Matos da pós-graduação pelos esclarecimentos e ajuda.

A CELTINS e a equipe de Planejamento de Sistemas, em nome de seu coordenador Cristiano Saraiva Barbosa, pelo apoio e disposição em fornecer o dados necessários para essa pesquisa.

Ao IFTO pelo apoio financeiro durante parte do período de viagens a Uberlândia.

Aos demais amigos e colegas que entenderam que minhas ausências foram por um bem maior, o conhecimento.

ANÁLISE DA VIABILIDADE DA CONEXÃO DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE PALMAS-TO VIA MATLAB/PSAT

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar de forma preliminar, por meio de estudos de fluxo de carga, o desempenho da rede de distribuição de uma área residencial da cidade de Palmas, Tocantins, quando da conexão de fontes de Geração Distribuída (GD), mais especificamente, de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR). Nesse sentido, com o auxílio do programa PSAT, uma ferramenta (*toolbox*) do MatLab, desenvolveu-se um modelo dessa rede de distribuição de forma a refletir a situação real da área residencial da Quadra 1106 Sul da cidade de Palmas – TO, considerando as informações e dados fornecidos pela concessionária local e pelos fabricantes.

Assim, foi especificado um modelo de SFCR com capacidade para gerar apenas potência ativa, obedecendo o perfil de radiação e temperatura da cidade para um dia específico eleito para os estudos, isto é, aquele com o maior consumo registrado pela concessionária local no ano de 2012.

Os ensaios realizados com o modelo desenvolvido foram utilizados para avaliar o comportamento dos fluxos de potência ativa e reativa sem/com GD na rede de distribuição, as variações de tensão e o fator de potência da rede que os SFCR estão ligados.

Esta pesquisa permitiu observar que a geração de energia solar fotovoltaica oferece várias vantagens tanto para as concessionárias quanto para os consumidores onde forem instaladas, tais como: ser limpa, renovável e com menor impacto ambiental. No entanto, é importante mencionar que, apesar de apresentar vantagens, somente após a Resolução Normativa (REN) Nº 482 da ANEEL do ano 2012, é que se iniciaram os incentivos para explorar essa fonte alternativa.

Palavras-Chave: Geração Distribuída; Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede; fluxo de potência; variação de tensão; Fator de Potência, MatLab/PSAT.

FEASIBILITY ANALYSIS OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN DISTRIBUTION NETWORK OF PALMAS, TOCANTINS, VIA MATLAB/PSAT

ABSTRACT

The objective of this research is a preliminary assessment, through load flow studies, the performance of low voltage distribution network in a specific region of the city of Palmas, Tocantins, when connecting Distributed Generation (DG) sources, more specifically, grid-connected photovoltaic systems. Accordingly, with the help of PSAT program, a toolbox of MatLab, it was developed a model of this distribution network so as to reflect the real situation of the residential area of 1106 South Block, city of Palmas – TO, taking into account the information and data provided by local power utility and manufacturers.

Thus, a model was specified for a grid-connected photovoltaic system, capable of generating only active power, obeying the radiation and temperature profile of the city for a specific day chosen for the study, ie, one with the greatest consumption recorded by the local power utility in year 2012.

Tests conducted with the developed model were used to evaluate the behavior of active and reactive power flows without/ with DG in the low voltage network, voltage variations and power factors of the network that are connected grid-connected photovoltaic system.

This research has observed that the solar photovoltaic generation offering several advantages both for the concessionaires as well as for consumers where they are installed, as being clean, renewable and with less environmental impact. However, it is important to mention that, despite presenting advantages, only after ANEEL (the National Electrical Energy Agency) published the Normative N° 482, it started incentives to explore such alternative source.

Keywords: Distributed Generation; Grid-Connected Photovoltaic System; load flow; voltage variation; Power Factor, MatLab/PSAT.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
SUMÁRIO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XII
Capítulo I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização do tema	1
1.2 Motivação (Justificativa)	3
1.3 Objetivo Geral	5
1.4 Objetivos específicos	5
1.5 Operacionalização da pesquisa	6
1.6 Estrutura da dissertação	7
Capítulo II	8
CONCEITOS BÁSICOS SOBRE OS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.	8
2 Considerações iniciais	8
2.1 Aspectos gerais sobre a Geração Distribuída de Energia (GD)	8
2.2 Formas de Conexão de Geração Distribuída ao Sistema Elétrico	11
2.3 A Energia Solar Fotovoltaica	12
2.4 Radiação solar	14
2.4.1 Irradiância	18
2.4.2 Insolação	19
2.5 Células, Módulos e Sistemas Fotovoltaicos.	20
2.5.1 Células Fotovoltaicas	20
2.5.2 Módulos fotovoltaicos.	29
2.5.3 Sistema Solar Fotovoltaico	32
2.6 SFCR para Redes de Distribuição Urbana	33
Capítulo III	40
A CIDADE DE PALMAS E SUAS CARACTERÍSTICAS PARA O USO DO SFCR	40

3	Considerações Iniciais.	40
3.1	Palmas: a cidade projetada para ser a capital do estado do Tocantins.....	40
3.2	Normatização para acesso e conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição de energia elétrica do Estado do Tocantins	44
3.3	Estudo de caso: a Quadra Residencial 1106 Sul da cidade de Palmas.	50
3.4	Característica de uma Residência.....	56
3.5	Característica do Sistema Solar Fotovoltaico Conectado a Rede Elétrica para a cidade de Palmas - Tocantins.....	58
3.5.1	Características do SFCR e da rede elétrica do estudo de caso específico--	60
3.6	Características da rede elétrica	62
	Capítulo IV	64
	SIMULAÇÕES DE CASOS E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	64
4	Considerações Iniciais.....	64
4.1	Ferramenta PSAT	64
4.2	Modelo da Rede de Distribuição Primária da Quadra 1106 Sul	67
4.3	Simulações dos Casos	73
4.3.1	Simulação com inserção do SFCR.....	78
4.3.2	Resultado das Simulações	80
	Capítulo V.....	87
	CONCLUSÕES	87
	Referências Bibliográficas.....	91
	Anexo I.....	96
	Anexo II.....	99
	Anexo III	102
	Anexo IV.....	106
	Anexo V.....	108
	Anexo VI.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Espectro de ondas eletromagnéticas	16
Figura 2.2 - Radiação Global e suas componentes.....	16
Figura 2.3 - Efeito fotovoltaico.....	18
Figura 2.4 - Distribuição de irradiância para diferentes dias.....	18
Figura 2.5 - Insolação em Wh/m ²	19
Figura 2.6 - Insolação Diária no Brasil média anual.	20
Figura 2.7 - Circuito equivalente da célula solar fotovoltaica na ausência de irradiação solar.....	23
Figura 2.8 - Diagrama do circuito equivalente de uma célula solar fotovoltaica irradiada.	24
Figura 2.9 - Diagrama completo do circuito equivalente.....	25
Figura 2.10 - Efeitos das resistências R_{sh} (a) e R_s (b) sobre a característica de iluminação da célula solar	26
Figura 2.11 - Característica I-V e sua respectiva curva P-V e os pontos e regiões onde cada parâmetro está situado.	26
Figura 2.12 - Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação	27
Figura 2.13 - Características de I-V sob a influência da temperatura.....	28
Figura 2.14 - Representação do módulo fotovoltaico	29
Figura 2.15 - Esquemas de ligação de módulos fotovoltaicos.....	31
Figura 2.16 - Curvas I – V ligação série e paralelo de módulos fotovoltaicos	32
Figura 2.17 - Ilustração de um SFCR integrado a uma edificação.	35
Figura 2.18 - Visão detalhada do SFCR.....	36
Figura 2.19 - Organização e componentes de um SFCR.....	38
Figura 2.20 - Sistema de tarifação <i>net metering</i> com um medidor bidirecional.	39
Figura 2.21 - Sistema de tarifação <i>net metering</i> com dois medidores.....	39
Figura 3.1 - Palmas: Mosaico de Ortofotocartas da Prefeitura Municipal, 2003.....	42
Figura 3.2 - Conexão de microgeração fotovoltaica através de unidade consumidora do Grupo B com medição no padrão de entrada.....	46
Figura 3.3 - Curva de operação do sistema de geração distribuída em função da frequência da rede para desconexão por sub e sobrefrequência.....	48

Figura 3.4 - Diagrama simplificado do sistema de distribuição da CELTINS.....	49
Figura 3.5 - Mapa da Quadra 1106 Sul	51
Figura 3.6 – Foto aérea da Quadra 1106 Sul.....	52
Figura 3.7 - Dependência da característica potência x tensão com a temperatura...	60
Figura 3.8 - Foto aérea [34], adaptada pela CELTINS, com o traçado da rede de alimentação da Quadra 1106 Sul suprida pelo alimentador 2.	63
Figura 4.1 - Estrutura do PSAT por diagrama de blocos.....	66
Figura 4.2 - Diagrama unifilar modelado no programa PSAT	68

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Participação das Fonte Geradora no cenário nacional, 2013	10
Gráfico 2.2 - Transformações da Energia Solar das ondas não visíveis.	15
Gráfico 3.1 - Tarifas Residenciais Vigentes.....	43
Gráfico 3.2 - Temperatura registrada durante o dia 03/10/2013.....	55
Gráfico 3.3 - Índice de insolação do dia 03/10/2013	55
Gráfico 4.1 - Potências de entrada do sistema.....	75
Gráfico 4.2 - Tensão de entrada do sistema	75
Gráfico 4.3 - Fator de Potência de entrada do sistema	75
Gráfico 4.4 - Fluxo de Potências Ativa e Reativa sem SFCR	77
Gráfico 4.5 - Comparação do Fluxo de Potência Ativa sem e com 60 SFCR.....	81
Gráfico 4.6 - Comparação do Fluxo de Potência Reativa sem e com os 60 SFCR...81	
Gráfico 4.7 - Comparação da Tensão no Secundário do Transformador Ligado na Barra 10, sem e com 10 SFCR.	82
Gráfico 4.8 - Fluxo de Potência Ativa sem SFCR.....	83
Gráfico 4.9 - Comparação do Fluxo de Potência Ativa no Ponto de Alimentação Principal do Sistema.....	84
Gráfico 4.10 - Comportamento do Fluxo de Potência Ativa Sem e Com SFCR na Entrada da Quadra 1106 Sul.....	85
Gráfico 4.11 - Fator de Potência de todo o Sistema.....	86
Gráfico 4.12 - Comparação da Tensão no Secundário do Transformador Ligado a Barra 10 Sem e Com SFCR	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Empreendimentos em operação.	11
Tabela 2.2 - Níveis de tensão considerados para conexão de micro e minicentraís geradoras	11
Tabela 2.3 - USINAS do tipo UFV em Operação	13
Tabela 2.5 - Comparação da eficiência de diferentes células fotovoltaicas.	22
Tabela 3.1 - Formas de conexão na baixa tensão	45
Tabela 3.2 - Classificação e valores de referência para a Tensão de Atendimento para pontos de conexão em redes com tensão nominal de 380/220 V.	46
Tabela 3.3 - Resposta as condições anormais de tensão	47
Tabela 3.4 - Dados de medições realizados pelas estações meteorológicas automática Palmas-A009 INMET.	54
Tabela 3.5 – Resumo do SFCR	57
Tabela 3.6 - Resumo do consumo elétrico anual considerando a geração fotovoltaica	58
Tabela 3.7 - Características elétricas da placa solar	59
Tabela 3.8 - Características elétricas do Inversor	59
Tabela 4.1 - Comparação entre os pacotes de software baseados em plataforma MatLab	66
Tabela 4.2 - Dados dos Transformadores	69
Tabela 4.3 - Numero de UC ligadas aos secundários dos transformadores	69
Tabela 4.4 - Dados de Linhas de Interligação	70
Tabela 4.5 - Potência Ativa em p.u. das cargas de cada um dos transformadores durante 24 horas	71
Tabela 4.6 Potência Reativa em p.u. das cargas de cada um dos transformadores durante 24 horas	72
Tabela 4.7 - Resultados da entrada da rede após simulação	74
Tabela 4.8 - Distribuição dos SFCR na área residencial	79
Tabela 4.9 - Potência Máxima dos SFCR respeitando 50% da potência nominal do transformador	79

LISTA DE ABREVIATURAS

AM – Massa do Ar

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BIG – Banco de Informações de Geração

BT – Baixa Tensão

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CdTe – Telureto de Cádmio

CELTINS – Companhia de Energia Elétrica do Estado do Tocantins

CO₂ – Gás Carbônico

CNPJ – Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica

CPF – Cadastro de Pessoa Física

CuInSe₂ – Disseleneto de Cobre-Índio

fem – força eletromotriz

FP – Fator de Potência

FV – Fotovoltaica

°C – Graus Celsius

GaAs – Arseneto de Gálio

GD – Geração Distribuída

Grid-Tie – sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica de baixa tensão

Hz - Hertz

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

J – Joules

J.s – Joules segundo

Km/s quilômetros segundo

kW – Quilowatts

kWh – Quilowatts-hora

kWp – Quilowatts-pico

Ω – ohms

ONS – Operador Nacional do Sistema

m – metros

m Ω – mili-ohms

MW – Megawatts

NOCT – *Nominal Operating Conditions of Temperature*

NTD – Norma Técnica

P – Potência Ativa [W]

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PRODIST – Procedimentos da Distribuição

PSAT – Power System Analysis Toolbox

PV – Painele Fotovoltaico

pu – por unidade

Q – Potência Reativa [Var]

REN – Resolução Normativa

S – Potência Aparente [VA]

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede elétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional

STC – *Standard Test Conditions*

TWh – Terawatts-hora

UC – Unidade Consumidora

UFV – Unidade Geradora Solar Fotovoltaica

UTC – Tempo Universal Coordenado

V – Volts

W/m² - Watts por metro quadrado

Wh – Watts-hora

Wh/m² Watts-hora por metro quadrado

Capítulo I

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

Nos últimos anos, o mundo vem sofrendo mudanças na indústria e no mercado consumidor. Cresce a disputa por um mercado competitivo, inovador e voltado aos consumidores. A população do planeta, no ano de 2013, é de aproximadamente sete bilhões e duzentos milhões de habitantes e, para o ano de 2025, será de aproximadamente oito bilhões e cem milhões de habitantes com uma previsão de crescimento ainda maior para os anos subsequentes [1]. Perante essa realidade detecta-se que o aumento populacional acarretou o crescimento do consumo de energia elétrica trazendo também a necessidade do aumento da capacidade de geração dessa energia. Diante deste cenário, a busca por fontes alternativas de geração de energia elétrica vem sendo objeto de muitas pesquisas em diversas áreas.

Entende-se por fontes alternativas de geração de energia elétrica a produção de energia designadas por fontes renováveis podendo ser consideradas inesgotáveis ou cujo potencial energético possa se renovar. Para estes casos, a produção poderia ser descentralizada ou distribuída e sua produção poderia ficar por conta e responsabilidade de produtores independentes ou mesmo de consumidores finais. São destacadas como essas tecnologias de produção de energia: a eólica, a geotérmica, a solar, a energia das ondas, a energia das marés e o aproveitamento da biomassa.

Segundo Villalva e Gazoli (2012, p.30). [2]:

A modalidade de geração distribuída inclui parques de geração construídos em áreas abertas e também pequenos geradores conectados ao sistema elétrico e instalados dentro de zonas urbanas densamente povoadas. Esses geradores podem ser instalados em residências e telhados de empresas, escolas e centros comerciais, constituindo microusinas e miniusinas de geração de eletricidade conectados ao sistema elétrico nacional. [...] A instalação em massa

de pequenos sistemas de geração distribuída vai contribuir para o aumento da disponibilidade de eletricidade em nosso País, ajudando a poupar água nos reservatórios das hidrelétricas nos períodos de seca.

Nesse sentido, algumas pesquisas estão se voltando para a geração elétrica em pequena escala inserindo as opções de geração no ponto de consumo final ou próximo deste. Tais opções, quando interligadas à rede de distribuição se apresentariam como um complemento da energia elétrica usada em uma determinada região.

Assim, adentra-se a questão da produção de energia elétrica em Baixa Tensão (BT) utilizando a tecnologia de geração de energia solar fotovoltaica. Nesse sentido, a pesquisa aqui apresentada se propõe a discutir a relação entre consumo de energia elétrica e a produção de energia solar fotovoltaica como forma alternativa de produção de energia elétrica.

Surge neste panorama a figura do consumidor final como um pequeno produtor de energia, sendo aquele que se mobiliza no sentido de encontrar alternativas de conservação e autoprodução que lhe garantam um fornecimento de energia a longo prazo e, além disto, reduza os custos e impactos ambientais.

Esses consumidores passaram a ser chamados de micro ou miniprodutores após a Resolução Normativa (REN) 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [3]. Para ANEEL, tais consumidores poderão interligar o seu sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica à rede de energia elétrica de baixa tensão das concessionárias locais compensando a energia produzida em suas unidades consumidoras. Em outras palavras, eles produzirão energia durante o dia e injetarão na rede de distribuição. À noite, os mesmos usarão energia disponível na rede elétrica de distribuição. Ao final do mês, é feito um cálculo da diferença entre energia produzida e consumida chegando-se ao valor devido pelo consumidor, ou seja, se a energia consumida for maior do que a produzida o consumidor pagará a diferença, caso contrário, o consumidor ficará com crédito podendo ser utilizado para abater os custos consumidos dentro de 36 meses ou por outra unidade consumidora que estiver em seu nome [4].

Diante disso, este trabalho busca apresentar diversos resultados de estudos de fluxo de carga visando verificar como as potências e as tensões da rede elétrica de distribuição se comportarão com a inserção do sistema fotovoltaico conectado a ela.

1.2 Motivação (Justificativa)

No Brasil, apesar da alta incidência de raios solares em todo o território nacional ao longo do ano, a energia elétrica gerada pelo sol é mínima. Conforme observado nos informes gerais da ANEEL de junho de 2013, tal geração não chega a 0,1% da demanda geral de energia do Brasil [5]. Outros países do mundo, mesmo em condições naturais mais desfavoráveis estão mais avançados na exploração dessa fonte renovável, como exemplo: Alemanha, Itália e Espanha, onde em 2011 apresentaram um consumo anual de energia solar de 37,5 Terawatt-hora (TWh), representando 67,4% de todo o consumo mundial [6].

Cumprir registrar que a quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende da taxa de irradiação solar e da temperatura do local onde é instalado. No Brasil, regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte são as que possuem o maior potencial de aproveitamento da energia solar. A região Sul dentre todas as regiões é a menos privilegiada, entretanto ainda possui taxas de irradiação melhores do que aquelas encontradas na Alemanha [7] ou em outros países que empregam largamente a energia solar fotovoltaica, conforme verificado no Atlas Solarimétrico do Brasil do ano 2000 [8].

Em termos de funcionamento, os sistemas de geração de energia fotovoltaica podem ser instalados em qualquer espaço onde o painel possa ser colocado desde que respeitadas as dimensões e as especificações do fabricante. Dessa forma, telhados e fachadas de prédios e de residências podem ser utilizados para a instalação de equipamentos destinados à geração de eletricidade em áreas urbanas. Além disso, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição (SFCR), disseminados na forma de micro e mini unidades geradoras de eletricidade, permitirão ampliar a oferta de energia elétrica e ao mesmo tempo contribuir para a manutenção da característica renovável de matriz energética brasileira [9]. Quando instalado em uma região urbana (casas, prédios, condomínios, comércios ou empresas) e ligado diretamente à rede elétrica de Baixa Tensão ou rede do consumidor final, o sistema produzirá eletricidade a um custo baixo que poderá ser empregada para reduzir a conta de energia do consumidor [10].

Segundo os fabricantes dos equipamentos, qualquer consumidor final que instalar esse sistema em seu telhado garante seu abastecimento de eletricidade por

pelo menos 25 anos, que é o tempo mínimo de vida útil de um sistema solar fotovoltaico. O retorno de seu investimento aconteceria em alguns anos com a energia produzida e compensada em sua conta de energia elétrica.

Com um gigantesco potencial fotovoltaico que o Brasil possui aliado as grandes reservas de quartzo, o país poderá tornar-se um dos principais líderes mundiais no emprego de energias renováveis alternativas e na fabricação de painéis fotovoltaicos. Aliados a isso, a expectativa de aumento na disponibilidade de energia elétrica e dos benefícios ambientais do uso de uma fonte limpa e renovável, o país deverá ser impulsionado por um desenvolvimento tecnológico nesta área, criando empregos e renda para profissionais de diversos setores tais como: serviços de instalação, manutenção, treinamentos e fabricação de painéis ajudando, dessa forma, a mover a economia nacional [11].

A perspectiva de instalação de um grande número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) nos próximos anos é bem ampla, trazendo à tona o seguinte questionamento: como se comportarão as redes de distribuição com a instalação desses novos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, uma vez que, no atual momento o fluxo de carga se dá somente em um sentido, diferente do que acontecerá após instalação desses novos geradores.

Nesse sentido, adentra-se o cenário de Palmas, a jovem capital do Estado do Tocantins, localizada na região Norte do Brasil, (Latitude: 10° 12' 46" S, Longitude: 48° 21' 37" W, Altitude de 230 metros do nível do mar com uma área de 2474,9 km²). Essa cidade apresenta como média anual uma insolação diária de 6 horas e radiação solar global diária de 16 MJ/m² ou 2080 a 2153 kWh/m² [8] [7]. Devido a estas características a cidade se apresenta com um excelente potencial para a utilização desse sistema, conforme será discutido ao longo desta pesquisa.

Porém, apesar de tais características, a capital do Tocantins encontra-se em fase embrionária quanto ao assunto, não apresentando até meados do ano de 2013 nenhuma instalação de sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica em operação, segundo cadastro da concessionária local.

Dessa forma, o trabalho busca uma discussão a respeito do tema realizando uma análise do comportamento da rede de distribuição quando áreas residenciais da cidade estiverem operando com SFCR.

A análise em questão irá projetar uma perspectiva em que se têm várias residências produzindo energia por meio do SFCR durante o dia, cujo consumo de

energia elétrica residencial é relativamente baixo (devido a poucos equipamentos em funcionamento) injetando o excedente na rede. À noite, o fluxo de energia se inverte aumentando o consumo de energia residencial. Vale lembrar que nesse momento não há mais a produção de energia por meio do SFCR devido à ausência do Sol. Para isso serão realizadas várias simulações buscando a estimativa de um futuro cenário real que poderá vir a acontecer com a inserção de SFCR. Para tais simulações será considerado uma determinada região da cidade de Palmas cujas características possibilitem a avaliação do sistema em diferentes momentos.

Sendo assim, para esta pesquisa se elegeu o setor urbano denominado de Região Sul da cidade, considerando em particular a quadra residencial 1106 Sul. Registra-se que tal quadra, até meados de 2012, já se configurava com aproximadamente 1427 unidades consumidoras ligadas à rede de distribuição da concessionária local, segundo registros cadastrais da CELTINS.

1.3 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como principal objetivo analisar a viabilidade da conexão de sistemas fotovoltaicos à rede de distribuição de baixa tensão, de uma área residencial da cidade de Palmas, capital do Tocantins, por meio da solução de fluxo de carga utilizando a ferramenta computacional PSAT no ambiente MATLAB.

1.4 Objetivos específicos

Como objetivos específicos pretendem-se:

- ✓ Contextualizar os conceitos da geração de energia elétrica por meio dos sistemas solares fotovoltaicos abordando sua utilização quando conectados a rede elétrica de distribuição;
- ✓ Efetuar, com o auxílio da ferramenta PSAT no MATLAB, a modelagem dos componentes do sistema elétrico de distribuição de uma área tipicamente residencial pré-definida, na cidade de Palmas–TO, desde um alimentador da subestação (representada como gerador), passando pela distribuição, até o consumo e a geração de energia solar fotovoltaica conectada a rede elétrica buscando o equivalente da rede hoje instalada;

✓ Apresentar análises da influência desse tipo de geração fornecendo bases teóricas aos estudos e análises de comportamento do fluxo de carga, potências ativa e reativa, perfil de tensão das cargas e dos equipamentos que compõem as redes de distribuição da concessionária de energia elétrica de Palmas-TO, auxiliando tais estudos na busca pela efetiva garantia dos padrões de continuidade e qualidade do suprimento energético aos seus consumidores.

1.5 Operacionalização da pesquisa

Para compreender e avaliar melhor esse estudo, o ponto de partida foi o levantamento de dados bibliográficos em livros, teses, dissertações, artigos de periódicos e textos institucionais referentes ao tema. Posteriormente, foi identificada a concessionária de energia elétrica responsável pelo sistema de distribuição de energia elétrica na capital do Tocantins, no qual foram feitos levantamento de dados quantitativos próprios do sistema em funcionamento na cidade.

A segunda fase da pesquisa diz respeito à modelagem computacional do sistema da rede de distribuição da quadra em questão sem o SFCR. Tal modelagem foi realizada por meio do Programa Matlab, utilizando a ferramenta *Power System Analysis Toolbox* (PSAT), considerando a variação de carga durante 24 horas. Nessa etapa, simultaneamente, foram feitas a comparação dos dados obtidos da simulação com os dados reais da rede buscando garantir uma modelagem mais próxima possível da realidade.

A próxima etapa consistiu na inserção do SFCR no sistema modelado utilizando o mesmo programa já citado. Para esse momento, foi considerado o mesmo dia e período associados às variações de insolação e temperatura registradas para a mesma área.

Na etapa final, após obter todos os dados através das simulações, analisou-se o comportamento da rede de distribuição já existente com a inserção dessa nova topologia. Apresentaram-se, então, os resultados computacionais quanto ao fluxo de carga antes e depois da inserção dos painéis fotovoltaicos dos consumidores finais analisando a influência deste tipo de geração na área residencial do recorte escolhido.

1.6 Estrutura da dissertação

A materialização da investigação científica ficou dividida conforme a sequência a seguir.

O primeiro capítulo trata da introdução do trabalho contextualizando o tema e expondo o cenário mundial da atualidade quando se aborda o assunto em questão. Depois é justificada a escolha desse tema apresentando o local da pesquisa, ou seja, a cidade de Palmas – capital do Tocantins. Na sequência apresenta-se o objetivo geral e os objetivos específicos além da forma de operacionalização do trabalho para materialização da pesquisa.

No segundo capítulo é feita uma explanação a respeito dos conceitos da geração de energia elétrica por meio dos sistemas solares fotovoltaicos abordando sua utilização quando conectados a rede elétrica de distribuição. Para isso, a discussão aborda os aspectos gerais sobre a Geração Distribuída (GD) de Energia e suas formas de conexão, apresenta os conceitos referentes a energia solar fotovoltaica tais como: radiação solar, irradiância e insolação e depois insere as questões referentes as células, módulos e sistemas fotovoltaicos.

No próximo capítulo é delineada a questão da geração de energia solar fotovoltaica especificamente na cidade de Palmas, capital do Tocantins. Inicialmente, de forma sucinta, é apresentada a formação da cidade com suas características físicas e urbanísticas para que depois seja discutida a questão da energia solar em si.

No quarto capítulo são feitas as simulações computacionais via MatLab/PSAT, apresentando os resultados e análises. Primeiramente são expostos os dados sem a inserção do sistema solar fotovoltaico conectado a rede elétrica de baixa tensão, e, depois, com a inserção desse sistema possibilitando a verificação do seu comportamento por meio do fluxo de potência.

Por fim, o trabalho apresenta as considerações finais e sugestões para futuros trabalhos nessa linha de pesquisa.

Capítulo II

CONCEITOS BÁSICOS SOBRE OS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

2 Considerações iniciais

Este capítulo trata dos conceitos da geração de energia elétrica por meio dos sistemas solares fotovoltaicos e de sua utilização quando conectados a rede elétrica de distribuição.

Para isso, a discussão se inicia abordando os aspectos gerais sobre a Geração Distribuída de Energia (GD) e suas formas de conexão, em seguida apresenta os conceitos referentes a energia solar fotovoltaicas tais como: radiação solar, irradiância e insolação e depois considera as questões referentes as células, módulos e sistemas fotovoltaicos. Por fim, o capítulo trata mais especificamente dos Sistemas Solares Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica (SFCR), demonstrando suas características quando conectados a rede de distribuição urbana.

2.1 Aspectos gerais sobre a Geração Distribuída de Energia (GD)

Existem diversas definições relacionadas ao conceito de geração distribuída. Segundo o INEE [12], “essa expressão é usada para designar a geração de energia elétrica junto ou próximo do consumidor, independente da potência, tecnologia e fonte de energia”. Para Alckermann, 2001 [13], “a geração distribuída pode ser definida como uma fonte de geração conectada diretamente na rede de distribuição ou ao consumidor”. Assim a geração distribuída pode ser exemplificada como aquela que pode ser produzida pelo consumidor final ou em um local próximo a este independente da fonte de energia ou de combustível, da potência ou do tamanho da unidade geradora e da tecnologia envolvida.

As tecnologias de geração distribuída têm evoluído rapidamente para incluir potências cada vez menores. Nesta evolução, todos os equipamentos envolvidos, tais como: de medição, de controle e de comando (cuja finalidade é articular a operação dos geradores) e o eventual controle de cargas

(ligamento/desligamento) devem, ao mesmo tempo, se adaptar aos sistemas e a oferta de energia.

No cenário contemporâneo nacional 78,4% de toda a energia elétrica produzida é responsabilidade das grandes centrais hidrelétricas [5] que estão distantes dos grandes centros consumidores. Somado a isso, as crises mundiais de petróleo colaboraram para que outros fatores perturbantes forçassem a busca por novas matrizes energéticas. Nesse ponto, a geração em menor escala associada ao consumidor teria um papel importante.

No entanto, Lora e Haddad [14] lembram que na implantação de novas alternativas ou no aumento da geração de eletricidade devem ser observadas diversas características, tais como: distribuição geográfica da produção, confiabilidade e flexibilidade de operação, disponibilidade e preços de combustíveis, prazos de instalação e construção, além das condições de financiamento e licenciamento ambiental.

No Brasil, a entrada da geração distribuída deve se adequar as necessidades do mercado energético nacional, respeitando as características do sistema elétrico instalado, introduzindo ganhos de eficiência, confiabilidade, flexibilidade e reduzindo os impactos ambientais de sua construção [14]. A geração distribuída tem vantagem sobre a geração central uma vez que economiza investimentos em grandes centrais a serem construídas e na instalação de redes de transmissão, além de reduzir perdas. Como consequência, obtém-se uma melhora na estabilidade do serviço de energia elétrica, um menor tempo de instalação e um atendimento mais rápido da demanda. Também se deve lembrar que com tal geração há um baixo custo de manutenção e operação do novo sistema e redução de impactos ambientais [12] [14].

Segundo o Protocolo de Quioto [15], outro fator de influência para a entrada da geração distribuída é a necessidade de redução das emissões de gases que agravam o efeito estufa, como exemplo, o CO₂.

Diante desse cenário, conforme citado na introdução dessa pesquisa, a última ação da ANEEL destinada a facilitar a geração de energia nas unidades consumidoras foi aprovada em abril de 2012 (Resolução Normativa Nº 482 da ANEEL), com regras destinadas a reduzir barreiras na instalação de geração distribuída de pequeno porte. Nessa ação foram incluídas a microgeração (com até 100 quilowatts (kW) de potência) e a minigeração (de 100 kW a 1 Megawatts (MW))

de potência). Com essa nova norma foi criado o Sistema de Compensação de Energia que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local, sendo válida para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia como hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração qualificada.

Vale lembrar que na matriz energética brasileira, as fontes renováveis de energia respondem por 79,3% da geração de energia elétrica. O Gráfico 2.1, atualizado pela ANEEL em junho de 2013, apresenta informações referentes à essa matriz e fornece uma visão sobre a participação das fontes renováveis na produção de energia elétrica no Brasil.

Observam-se no Gráfico em questão que as principais tecnologias de geração de energia que utilizam fontes renováveis são as centrais hidrelétricas, térmicas alimentadas por biomassa e geradores eólicos. Quando se trata do caso da geração por meio de painéis fotovoltaicos, observa-se que essa geração ainda é muito pequena e por isso não aparece ilustrada nesse gráfico.

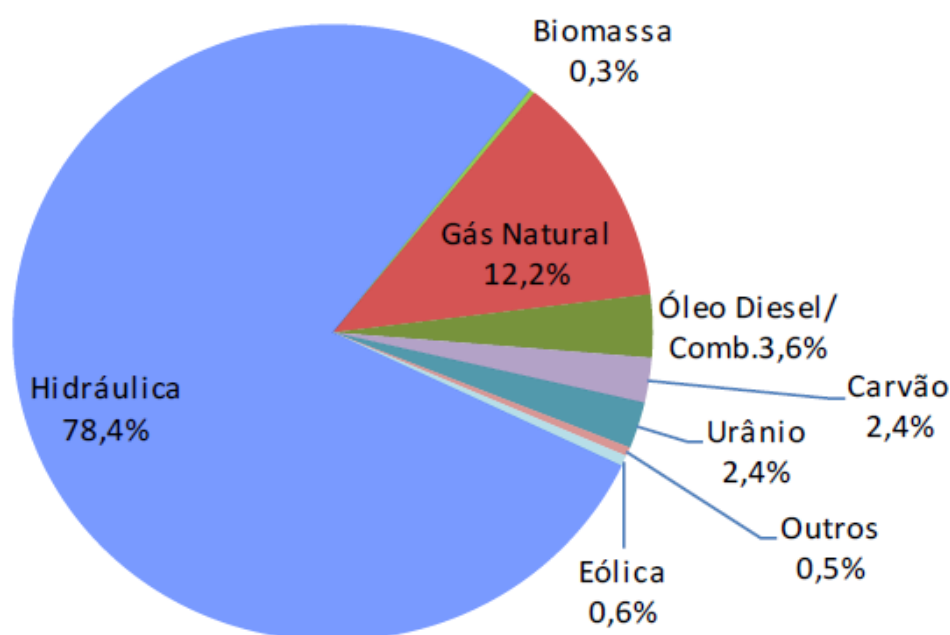


Gráfico 2.1 - Participação das Fontes Geradoras no cenário nacional, 2013
Fonte: ANEEL, Junho/2013 [5]

No Brasil, durante o mês de junho de 2013, registrava-se um total de 2.902 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação gerando 123.850.716 kW de potência [5]. A Tabela 2.1 apresenta essa situação.

Tabela 2.1 - Empreendimentos em operação.

Tipo	Quantidade	% do total	Potência instalada (kW)	% do total
Usina Hidrelétrica de Energia – UHE	191	6,6	80.207.481	64,8
Pequena Central Hidrelétrica – PCH	456	15,7	4.441.066	3,6
Central Geradora Hidrelétrica – CGH	420	14,5	255.596	0,2
Usina Termelétrica de Energia – UTE	1724	59,4	34.861.415	28,1
Usina Termonuclear – UTN	2	0,1	1.990.000	1,6
Central Geradora Eolielétrica – EOL	95	3,3	2.092.541	1,7
Central Geradora Solar Fotovoltaica – UFV	14	0,5	2.617	0,0
Total	2.902	100	123.850.716	100

(Fonte: ANEEL/Junho 2013 [5] p.4. Modificada)

2.2 Formas de Conexão de Geração Distribuída ao Sistema Elétrico

A forma de conexão da unidade de geração distribuída ao sistema elétrico é definida pelas concessionárias de energia elétrica durante a elaboração de seus respectivos pareceres de acesso. Essa definição leva em conta a Resolução Normativa ANEEL N° 56 de abril de 2004, a Resolução Normativa da ANEEL N° 482 de 17 de abril de 2012 e os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST/Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição (que determina a aplicação do critério de menor custo global de investimentos consideradas as instalações de conexão de responsabilidade do acessante).

As distribuidoras não podem restringir a conexão do acessante em linhas de transmissão ou alimentadores já existentes, desde que sejam atendidos critérios e padrões técnicos específicos para a conexão. Tais critérios e padrões são estabelecidos tanto pela legislação brasileira vigente quanto pelas normas das distribuidoras locais.

Observa-se que a Agência Nacional de Energia Elétrica relaciona a rede e a potência de geração distribuída conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Níveis de tensão considerados para conexão de micro e minicentrals geradoras

Potência Instalada	Nível de Tensão de Conexão
< 10 kW	Baixa Tensão (monofásica, bifásica ou trifásica)
10 a 100 kW	Baixa Tensão (trifásica)
101 a 500 kW	Baixa Tensão (trifásica) / Média Tensão
501 kW a 1 MW	Média Tensão

Fonte: PRODIST – Módulo 3, 2012, p. 78 e 79 [3]

2.3 A Energia Solar Fotovoltaica

O Brasil é um dos poucos países do mundo que utiliza como principal fonte de geração de energia elétrica, em sua matriz energética, fontes renováveis como visto no Gráfico 2.1.

Tal fator se apresenta como um dos motivos para os baixos investimentos e subsídios por parte do governo para geração de energia por outras fontes renováveis como, por exemplos, solar.

Ao se tratar especificamente da energia solar fotovoltaica registra-se que, em novembro de 2012, o Brasil contava com apenas 10 Unidades Geradora Solar Fotovoltaica (UFV) em operação, totalizando uma potência instalada de 2.578 kW [9]. Já, em novembro de 2013 esse número deu um salto e passou a ser de 37 UFV em operação, elevando a potência instalada e fiscalizada pela ANEEL em 8,2% e totalizando 2.789,31 kW, como apresentado na Tabela 2.3. Vale lembrar que a capacidade outorgada pela ANEEL ainda não foi efetivamente alcançada, sendo esta uma potência total de 6.789,31 kW. Isso se explica devido ao fato de que a UFV de Tauá no Ceará, que pertence a MPX Tauá Energia Solar Ltda, está funcionando com apenas 20% de sua capacidade concedida.

Tais números, se comparado com o total de energia gerada no Brasil (Tabela 2.1) é um valor praticamente inexpressivo diante das outras formas de produção de energia, algo em torno de 0,0000225%.

No entanto, o país apresenta um grande potencial de exploração quando se trata da utilização do sol como fonte geradora de energia, pois, sua incidência é alta em todo território nacional. Além disso, há no país grandes reservas de quartzo para produção de silício, sendo este o principal elemento utilizado na fabricação de painéis solares fotovoltaicos [17].

Tais características habilitam o Brasil a utilizar a energia solar fotovoltaica em grande escala e não apenas em pequenos sistemas isolados ou autônomos [2].

Diante deste cenário, para compreender melhor a questão da utilização da energia solar para produção de energia elétrica torna-se necessário adentrar a alguns conceitos, conforme discutido na sequência.

Tabela 2.3 - USINAS do tipo UFV em Operação

Usina	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	Município
Araras - RO	20,48	20,48	Nova Mamoré - RO
Tauá	5.000	1.000	Tauá - CE
IEE	12,26	12,26	São Paulo - SP
UFV IEE/Estacionamento	3	3	São Paulo - SP
Embaixada Italiana Brasília	50	50	Brasília - DF
PV Beta Test Site	1,7	1,7	Barueri - SP
Pituaçu Solar	404,8	404,8	Salvador - BA
Aeroporto Campo de Marte	2,12	2,12	São Paulo - SP
Tanquinho	1.082	1.082	Campinas - SP
Silva Neto I	1,7	1,7	Florianópolis - SC
PGM	6,58	6,58	Uberlândia - MG
Solaris	1,04	1,04	Leme - SP
Ilha Grande	30,87	30,87	Humberto de Campos - MA
Volpato	0,46	0,46	Curitiba - PR
Ilto Antonio Martins	2,3	2,3	Campo Grande - MS
Hiran Sebastião Meneguelli Filho	2,3	2,3	Campo Grande - MS
João Eudes Meireles da Silva	2,3	2,3	Campo Grande - MS
Ricardo Marcelino Santana	2,3	2,3	Campo Grande - MS
José Rizkallah Júnior	2,3	2,3	Campo Grande - MS
Lúcio Dodero Reis	11,04	11,04	Campo Grande - MS
Eros Roberto Grau	22,03	22,03	Tiradentes - MG
Pedro Bernardes Neto	29,6	29,6	Uberlândia - MG
João Bosco de Almeida	3,48	3,48	Camaragibe - PE
Helena Guimarães de Rezende	2,12	2,12	Uberlândia - MG
Tecidos Miramontes	3,29	3,29	Uberlândia - MG
Marco Aurélio Soares Martins	26,9	26,9	Nova Lima - MG
Danilo Maximiliano Marcon	3,12	3,12	Andradas - MG
Eduardo Carvalhaes Nobre	3,57	3,57	Brumadinho - MG
Algar Telecom	3,29	3,29	Uberlândia - MG
EOL/UFV Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica da Ilha dos Lençóis	21,06	21,06	Cururupu - MA
Isabelle de Loys	1,6	1,6	Rio de Janeiro - RJ
Ana Portilho	2	2	Rio de Janeiro - RJ
Sandra Nunes	8	8	Rio de Janeiro - RJ
Luíz Otávio Felício Marques	2,5	2,5	Fortaleza - CE
Paulo Bormann Zero	12,6	12,6	Rio de Janeiro - RJ
Francisco Almir Miranda	2,3	2,3	Campo Grande - MS
Eloy Vargas	2,3	2,3	Corumbá - MS
Total: 37 Usina(s)	Potência Total: 2.789,31 kW		

(Fonte: [16]. Modificada)

2.4 Radiação solar

Radiação solar é à energia radiante emitida pelo Sol, ou energia do Sol, enviado ao espaço na forma de radiação eletromagnética. Boa parte desta energia é emitida como luz visível e o restante como infravermelho e radiação ultravioleta. Isso quer dizer que a radiação eletromagnética é formada de ondas eletromagnéticas que têm frequências e comprimentos de onda diferentes que são inversamente proporcionais. Quanto maior a frequência, menor o comprimento de onda e maior a energia transmitida [2].

A radiação solar fornece anualmente para a atmosfera terrestre $1,5 \times 10^{18}$ quilowatts-hora (kWh) de energia solar. Já a energia elétrica mundial gerada no ano de 2012 foi de $22,5 \times 10^{12}$ kWh [18]. Diante desses dados é possível observar que a energia fornecida pelo Sol é superior a toda a energia produzida através de diversas fontes no mundo todo.

Pela equação de Planck (2.1) é possível verificar a relação entre frequência e energia eletromagnética:

$$E = h \cdot f \quad (2.1)$$

Onde:

E - energia da onda [J].

h - constante de Planck $6,636 \times 10^{-34}$ [J.s].

f - Frequência [Hz].

Vale lembrar que as ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio de propagação, ou seja, elas viajam no vácuo a uma velocidade constante de 300.000 km/s, correspondente à velocidade da luz no vácuo (V_{co}). As características da radiação eletromagnética são definidas pelo seu comprimento de onda (λ) e pela sua frequência (f), relacionadas pela expressão (2.2):

$$f = \frac{V_{co}}{\lambda} \quad (2.2)$$

Onde:

v_{co} – Velocidade da luz no vácuo (km/s).

λ – Comprimento da onda em metros (m).

As ondas eletromagnéticas apresentam uma grande variação de energia e são criadas pela natureza. A radiação eletromagnética pode ser distinguida de acordo com sua energia ou frequência intrínseca.

Do conjunto de ondas eletromagnética emitidas pelo Sol somente uma pequena parte das ondas chamada luz visível pode ser interpretada pelos olhos humanos ($0,39 \times 10^{-6}$ a $0,69 \times 10^{-6}$ m), já a parte não visível pode ser captadas na forma de calor (energia térmica) ou energia elétrica conforme Gráfico 2.2 .

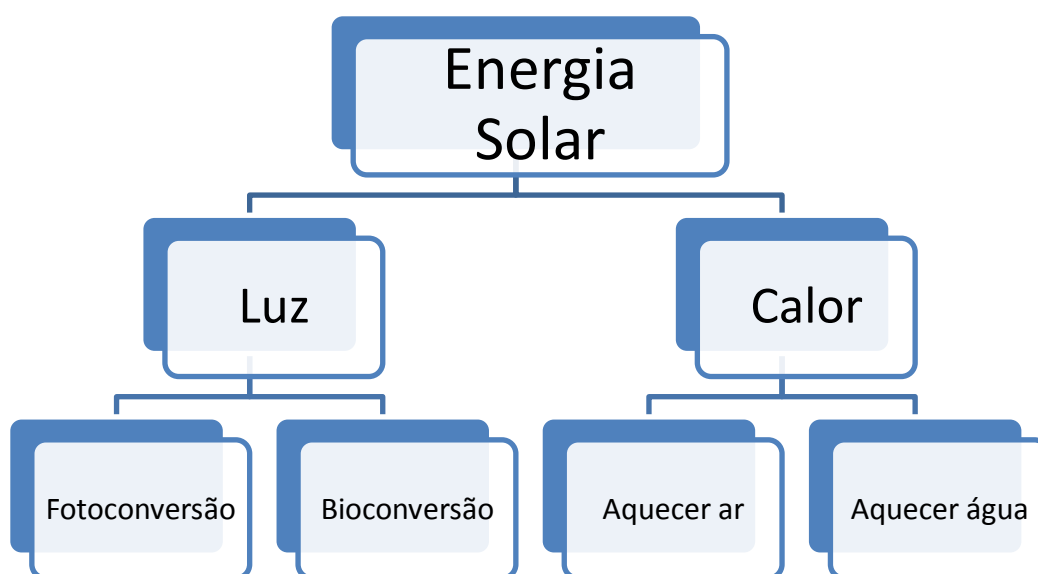


Gráfico 2.2 - Transformações da Energia Solar das ondas não visíveis.
Elaboração: Piccini (2013)

Registra-se que desde o fim do século 19 algumas das ondas eletromagnéticas passaram a ser produzidas pelo homem, sendo os tipos mais conhecidos: ondas hertzianas ou de rádio (e TV), microondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raio X e raio gama. Vale lembrar que alguns tipos de radiação eletromagnética interagem com os seres vivos de forma que não os prejudica, como por exemplo, a luz e as ondas de rádio e de TV [19] com mostrada na Figura 2.1.

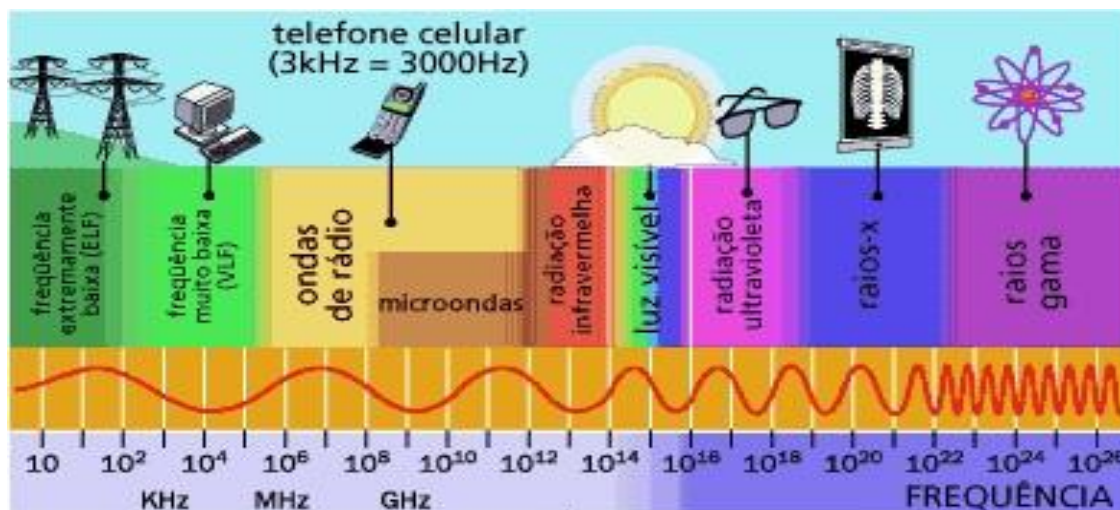


Figura 2.1 - Espectro de ondas eletromagnéticas
Fonte: [19]

Quando as ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol chegam ao nosso planeta são incididas na atmosfera terrestre de diferentes formas conforme mostra a Figura 2.2. Na forma de radiação difusa, parte da energia que entra na atmosfera é refletida, dispersada ou absorvida nas moléculas de ar, nuvens e partículas em suspensão. A radiação que não é refletida, dispersada ou absorvida incidirá diretamente na superfície terrestre sendo chamada de radiação direta. O albedo é a parcela da radiação que atinge a superfície da Terra e é refletida pelo solo, ou seja, dependerá do tipo de cobertura terrestre. A somatória da radiação direta, difusa e do albedo é chamada de radiação global [20].

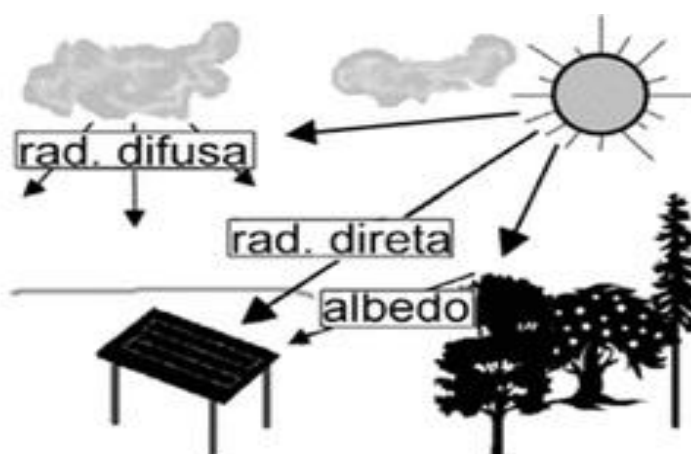


Figura 2.2 - Radiação Global e suas componentes.
Fonte: [21].

Em relação à atmosfera, quanto mais espessa for sua camada maior será o efeito da massa do ar (AM) sobre a luz solar que incidirá na superfície da Terra.

Por exemplo, em um dia de verão sem nuvens, considerando o nível do mar, a radiação solar ao meio dia corresponde a uma massa de ar igual a 1 (AM). Já, em outros horários, a massa de ar é aproximadamente igual à equação demonstrada abaixo (2.3) sendo θ_z o ângulo formado entre o raio direto e a normal formada com a superfície terrestre [2] [20].

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.3)$$

Ainda sobre a transformação de energia eletromagnética em energia térmica (que acontece quando um corpo absorve as ondas eletromagnéticas e essas agitam as moléculas e os átomos desse corpo) quanto maior a agitação, maior é a temperatura e a energia térmica. Essa energia está intimamente ligada à quantidade de radiação absorvida pelo corpo.

Registra-se que, diverso daquilo apresentado acima, as ondas eletromagnéticas ao incidirem sobre determinadas matérias podem se comportarem de maneira diferente. Neste caso, essas ondas ao invés de transmitirem calor, podem produzir alterações nas propriedades elétricas ou então originar tensões e correntes elétricas. Assim, dos diversos efeitos elétricos da radiação eletromagnética adentra-se a questão do efeito fotovoltaico, um dos mais importantes efeitos para a produção de energia elétrica [2].

Segundo estudos específicos dessa área, o efeito fotovoltaico é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade. Seu funcionamento consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial ou uma tensão elétrica sobre uma célula formada por um sanduiche de materiais semicondutores. Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles e se houver um caminho elétrico entre os dois eletrodos, sugira uma corrente elétrica, como pode ser visto na Figura 2.3 [2]

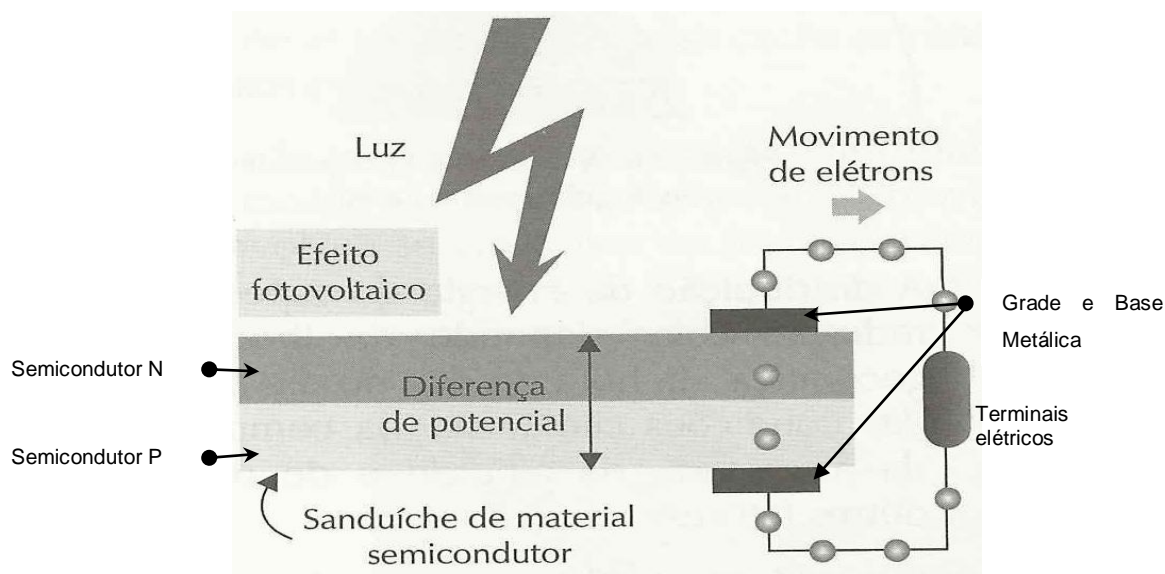


Figura 2.3 - Efeito fotovoltaico.
Fonte: [2] p.41 (Modificada).

2.4.1 Irradiância

A emitância energética incidente ou a quantidade de energia solar incidente em uma superfície é denominada de irradiação, irradiância, ou potência por unidade de área todas dadas em (W/m^2). Na superfície do planeta Terra a potência da luz solar é padronizada em $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$. Esse valor é o padrão no qual a indústria fotovoltaica especifica e avalia as células e módulos fotovoltaicos. A variação dessa potência pode ser vista em três dias distintos conforme Figura 2.4.

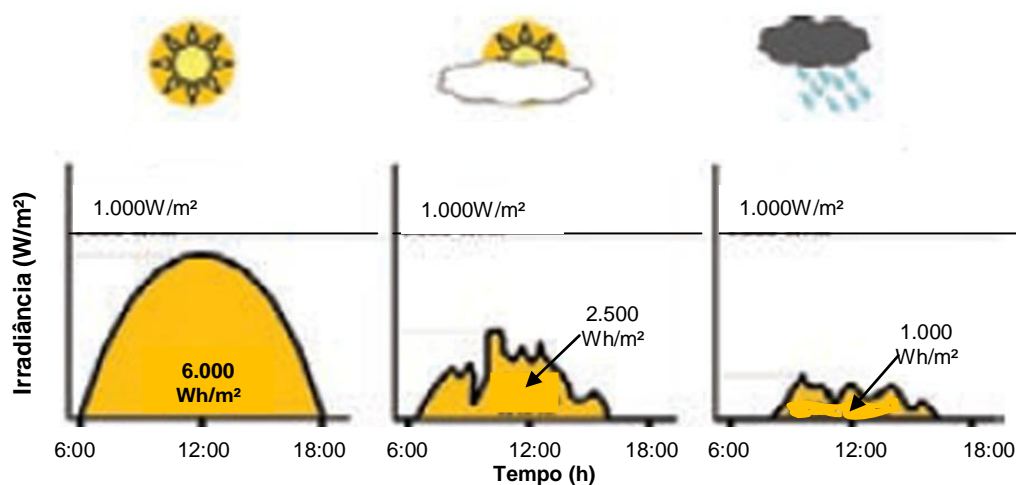


Figura 2.4 - Distribuição de irradiância para diferentes dias.
Fonte: [20] Modificado.

2.4.2 Insolação

A insolação é a grandeza utilizada para expressar a energia solar que incide sobre uma determinada área de superfície plana ao longo de um determinado intervalo de tempo. É dada em Wh/m^2 , isso é útil para dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, [9] Figura 2.5. É importante destacar que a insolação de um determinado local é diferente para cada dia.

Os dados apresentados no mapa da Figura 2.6 referem-se à média anual de insolação de todos os dias do ano. Para um melhor dimensionamento de um sistema fotovoltaico é recomendável utilizar dados de médias mensais [10].

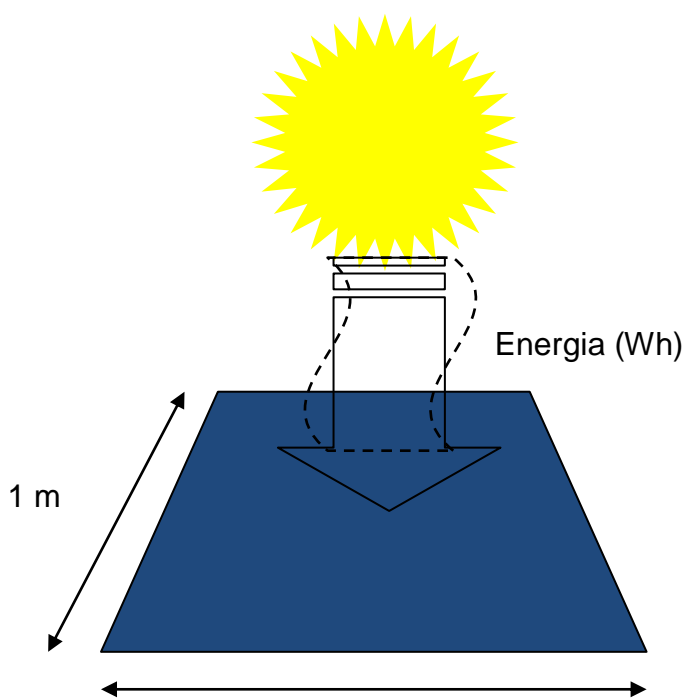


Figura 2.5 - Insolação em Wh/m^2
Elaboração: Piccini (2013)

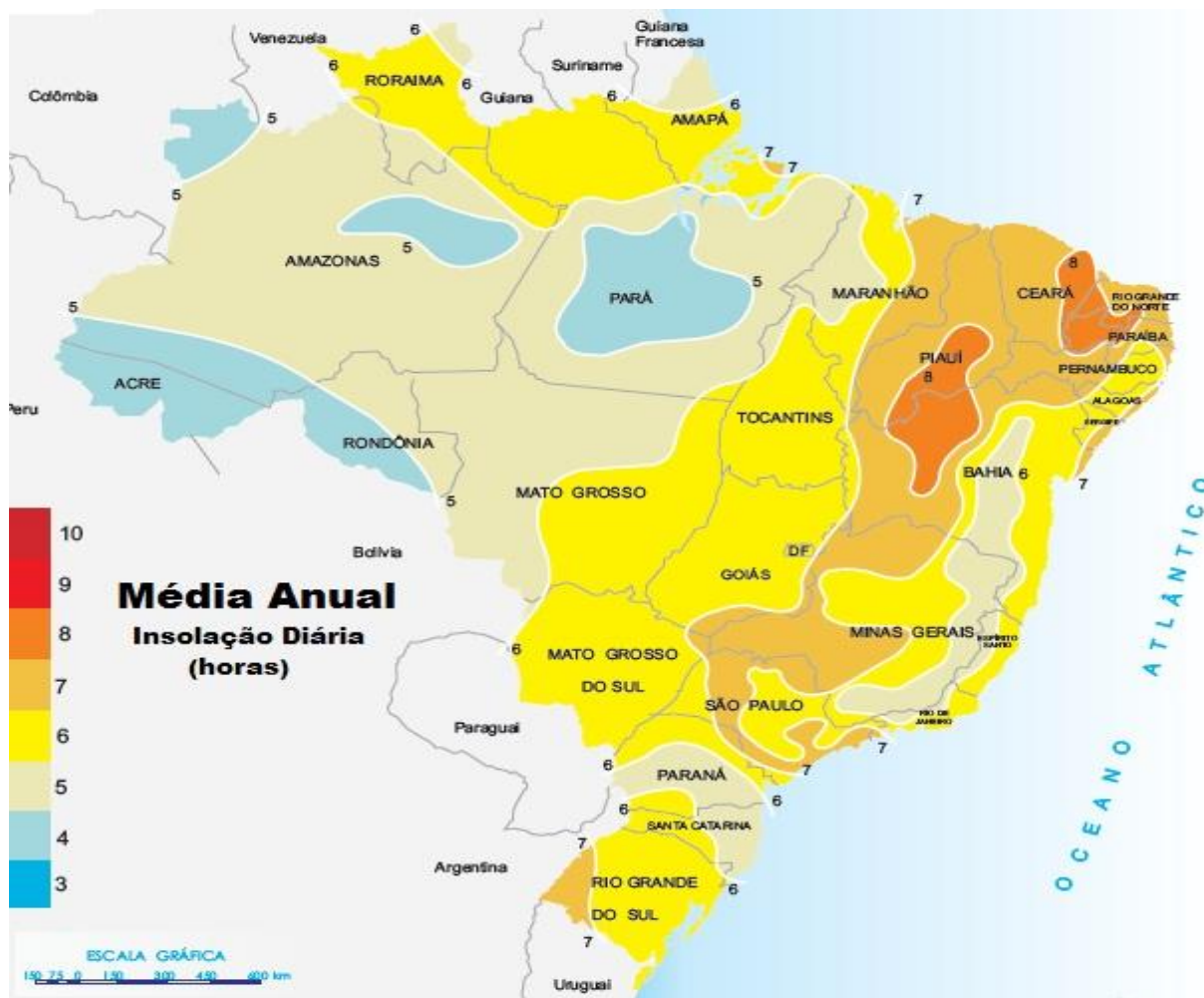


Figura 2.6 - Insolação Diária no Brasil média anual.

Fonte: [8], Modificado.

2.5 Células, Módulos e Sistemas Fotovoltaicos.

A conversão da energia solar pode ser utilizada numa enorme variedade de aplicações. Na sequência será apresentada uma célula solar fotovoltaica, um módulo fotovoltaico típico e seus parâmetros elétricos. Também será demonstrado a ligação de módulos e os tipos de sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica.

2.5.1 Células Fotovoltaicas

Células fotovoltaicas é a denominação dada ao dispositivo que faz a conversão da luz incidente em eletricidade. Sua construção se dá pelo emprego de elementos semicondutores. Quando tratado em escala comercial, detecta-se que a maioria dessas células são fabricadas de silício (cerca de 95%). Essa porcentagem

se deve ao fato de o silício apresentar características favoráveis ao processo, tais como: não toxicidade, é abundante na natureza (o segundo elemento mais abundante perdendo apenas para o oxigênio, que é o primeiro) e tecnologia consolidada devido à sua utilização predominante no ramo da microeletrônica. Registra-se que a maioria dos materiais utilizados na conversão fotovoltaica são cristalinos, caracterizando-se por terem uma estrutura de átomos que se repete. Assim, reforça-se o uso do silício na produção dessas células fotovoltaicas pelo fato de poder ser encontrado nas formas monocristalina, multicristalina ou policristalina e amorfa [20].

Segundo estudo de Pinho et.al. (2008) existem novos materiais sendo estudados sendo que alguns deles já estão em estágio de comercialização. Esses novos materiais baseiam-se na combinação dos semicondutores das famílias da tabela periódica 3A e 5A, como o Arseneto de Gálio (GaAs); e 2A e 6A, o Disseleneto de Cobre-Índio (CuInSe₂) e o Telureto de Cádmio (CdTe). Para o mesmo estudioso, essas tecnologias somadas ao silício amorfo, são denominadas tecnologias de filme fino, devido às suas características construtivas [20].

Segundo categoria apresentada por Pinho et.al. (2008) a tecnologia de produção de eletricidade utilizando o efeito fotovoltaico pode ser separada em dois principais setores de mercado: o silício cristalino (monocristalino e policristalino) e o silício amorfo e podem ser definidas da seguinte forma:

- Células de Silício Monocristalino: são as mais utilizadas atualmente, não apresentam problemas ambientais causados pela combinação de seus elementos constituintes, tem elevada vida útil e sua eficiência atinge valores próximos a 16%. Desvantagens: alto custo do processo construtivo e do consumo de energia nos processos de fabricação [20];
- Células de Silício Poli ou Multicristalino: constituídas de diversos cristais em contato entre si dispostos de maneira não alinhada. Esse procedimento visa reduzir custos de fabricação embora haja uma pequena perda de eficiência [20];
- Células de Silício Amorfo: não apresentam qualquer ordenamento na estrutura dos átomos. Seus custos de material são reduzidos se comparados às células anteriores, porém apresentam eficiência reduzida, valor comercial máximo de 10% [20];
- Células híbridas: é resultado da combinação de célula cristalina convencional com uma célula de filme fino, acrescida posteriormente de uma fina camada de silício sem impurezas chamada camada intrínseca. Tem como vantagem

não apresentar degradação da eficiência devido ao envelhecimento pela exposição à luz. Comparadas com as células solares cristalinas, ela se torna atraente por atingir uma maior produção de energia em elevadas temperaturas. Consome pouca energia e pouca matéria prima tornando seu custo de fabricação mais atraente [2].

A Tabela 2.4 mostra um comparativo entre os diferentes materiais em relação a sua eficiência.

Tabela 2.4 - Comparação da eficiência de diferentes células fotovoltaicas.

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos comerciais
Silício monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício policristalino	19,8%	15%	13%
Silício cristalino de filme fino	19,2%	9,5%	7,9%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
Silício micromorfo	12%	10,7%	9,1%
Célula solar híbrida	20,1%	17,3%	15,2%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,4%	10%	9%

Fonte: [2] p.74 Modificada.

Em termos de composição uma célula solar tem basicamente duas camadas finas de um material semicondutor distinto. Uma camada é a camada positiva, material semicondutor P, e a outra é a camada negativa, material semicondutor N. Também tem uma grade metálica na parte superior da camada N e uma base metálica na parte inferior da camada P as quais servem de coletores para a corrente elétrica produzida pela ação da luz sobre a célula. A Figura 2.3 apresenta a estrutura de uma célula solar típica e o efeito fotovoltaico.

Vale lembrar que apenas uma parte da irradiação solar incidente sobre uma célula solar fotovoltaica é convertida em eletricidade, o restante é absorvido.

2.5.1.1 Características elétricas de uma célula fotovoltaica.

Conforme dito anteriormente, uma célula solar fotovoltaica é construída com camadas de silício do tipo P e do tipo N. Em uma visão genérica tem-se o mesmo princípio de funcionamento que um diodo comum de silício sendo que ambos têm propriedades elétricas semelhantes.

Quando o diodo é ligado a um circuito de modo que o potencial seja positivo no ânodo, camada do tipo P, e negativo no cátodo, camada do tipo N, o diodo estará diretamente polarizado. A partir de uma tensão de condução definida (neste caso cerca de 0,7 V) a corrente passa a fluir.

Se o diodo for polarizado inversamente a corrente é impedida de circular nesta direção. Assim, o diodo apenas se torna condutor e caso se ultrapasse a tensão de bloqueio (neste caso, 150 V) esta condição de aumento de potência dissipada levaria à destruição do diodo [22].

Abaixo é demonstrado o diagrama simplificado de um circuito equivalente de célula solar fotovoltaica quando não há irradiação solar (Figura 2.7).

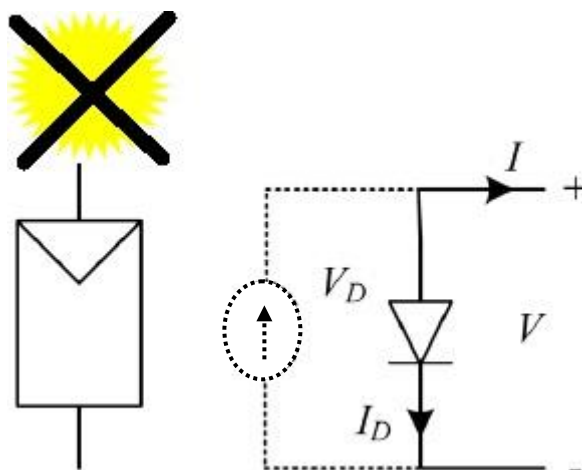


Figura 2.7 - Circuito equivalente da célula solar fotovoltaica na ausência de irradiação solar.
Fonte: [22] p. 7 Modificada.

O modelo da tensão e da corrente aos terminais de uma célula solar fotovoltaica ou um diodo quando este está inversamente polarizado pode ser representado pelas seguintes equações:

$$V = V_D \quad (2.4)$$

$$I = -I_D \cdot \left(\exp^{\frac{qV}{m_D k T}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Onde:

- V - tensão aos terminais da célula solar;
- V_D - tensão no diodo; I_D a corrente do diodo;
- I_D - corrente nos terminais da célula solar;
- Q - carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb;
- k - constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
- T - temperatura da célula em kelvin (K)

m_D - fator de idealidade do diodo ($1 < m < 2$).

Quando há incidência de radiação solar sobre a célula solar fotovoltaica, o seu comportamento elétrico se altera passando a existir uma corrente elétrica. Quando a luz incide na célula solar forma um circuito paralelo entre uma fonte de corrente e um diodo. A fonte de corrente produzirá uma corrente elétrica na célula fotovoltaica I_{PH} . Essa corrente dependerá da irradiância. Na Figura 2.8 pode ser visto esse modelo de forma simplificada.

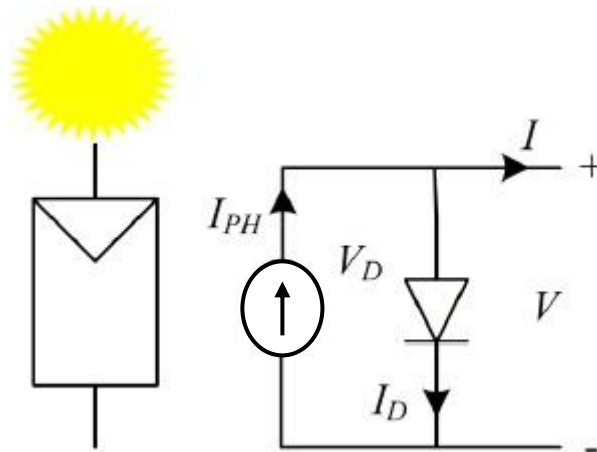


Figura 2.8 - Diagrama do circuito equivalente de uma célula solar fotovoltaica irradiada.
Fonte: [22] p. 8 Modificada.

A amostra da tensão e da corrente nos terminais do diodo quando a célula solar fotovoltaica se encontra com incidência de irradiação solar é descrito pelas seguintes equações:

$$V = V_D \quad (2.4)$$

$$I_{PH} = C_o E \quad (2.6)$$

$$I = I_{PH} - I_D \quad (2.7)$$

Onde:

I - corrente nos terminais da célula solar fotovoltaica;

I_{PH} - corrente elétricas da célula;

C_o - coeficiente da corrente elétrica da célula.

O diagrama completo do circuito elétrico equivalente para a célula solar fotovoltaica (Figura 2.9) é designado pelo modelo de um diodo e mais duas resistências sendo este o modelo padrão. Nesse caso quando ocorre uma queda de tensão, que é descrita pela resistência em série R_s , esta resistência é de poucos

miliohms ($m\Omega$). Já, a outra resistência, que é em paralelo ($R_{sh} \gg 10 \Omega$), descreve a corrente inversa de fugas. Com essas resistências é possível calcular as curvas características de corrente e de tensão da célula solar fotovoltaica para diferentes irradiações e temperaturas.

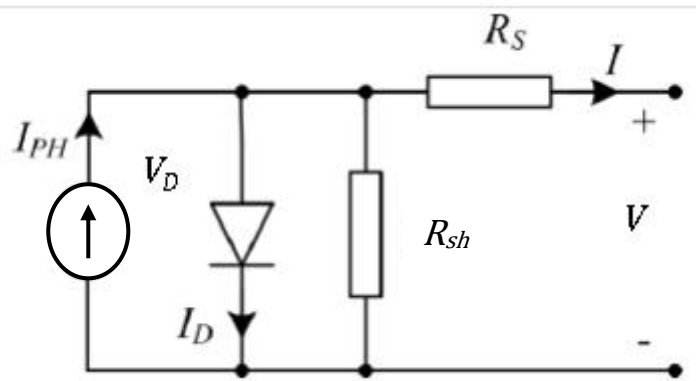


Figura 2.9 - Diagrama completo do circuito equivalente.
Fonte: [22] p.9. Modificada

Observa-se que a resistência em paralelo (R_{sh}) tem maior influência nas baixas tensões, onde a corrente que passa pelo diodo do circuito equivalente completo é muito pequena. A origem dessa resistência deve-se às fugas de corrente pela superfície da borda da célula. Já, a resistência série (R_s) tem sua procedência da resistência dos contatos metálicos com as camadas dos semicondutores, a base e a grade da célula. Assim, utilizando R_{sh} e R_s , têm-se a Equação 2.8 a qual pode ser obtida pela análise dos nós do circuito equivalente da Figura 2.9 [23] [10].

$$I = I_{PH} - I_0 \left[\exp \frac{q(V + IR_s)}{m_D K T} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

Onde:

I_0 - Corrente de saturação inversa.

Os efeitos de R_{sh} e R_s sobre o comportamento externo da célula estão ilustrados na Figura 2.10. Analisando essa figura pode-se afirmar que a influência da resistência em paralelo R_{sh} , (Figura 2.10 (a)), quando suficientemente pequena, reduz a tensão de circuito aberto e não afeta a corrente de curto circuito. Já, uma alta resistência série R_s (Figura 2.10(b)) reduz a corrente de curto circuito sem afetar a tensão de circuito aberto [23] [10]. Na Figura 2.11 verifica-se a curva de I-V onde atua essas resistências.

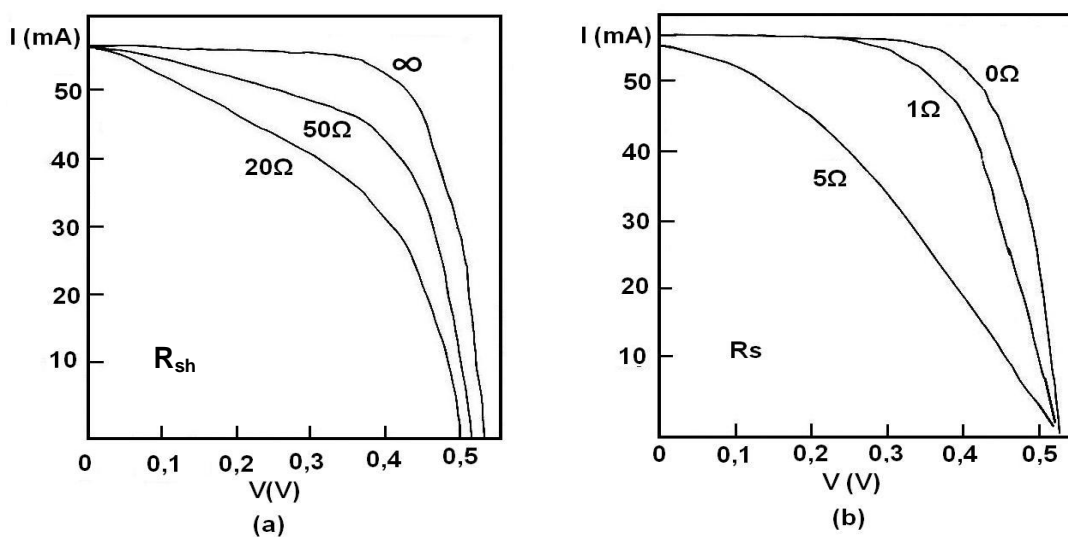


Figura 2.10 - Efeitos das resistências R_{sh} (a) e R_s (b) sobre a característica de iluminação da célula solar
Fonte: [10] p.45.

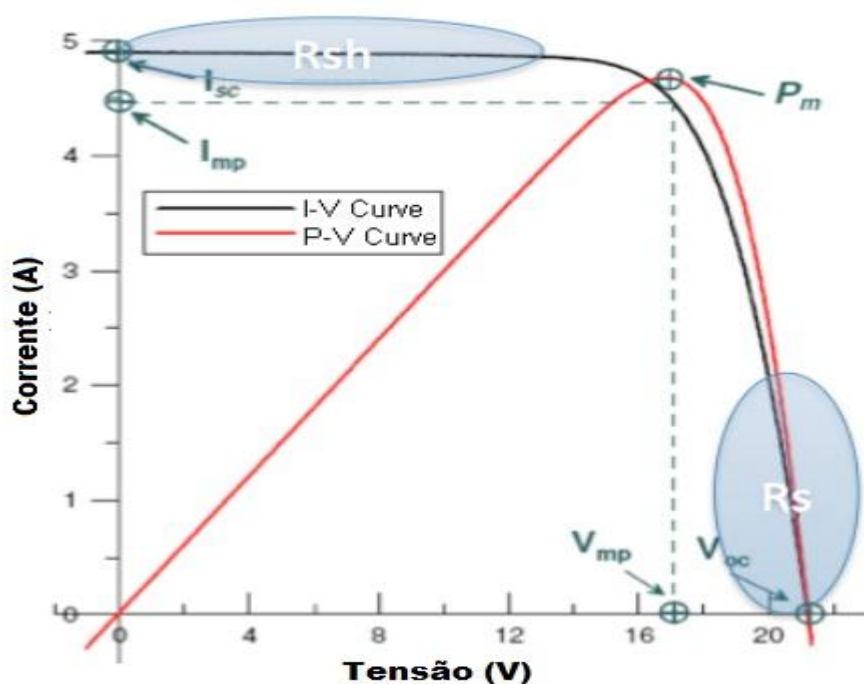


Figura 2.11 - Característica I-V e sua respectiva curva P-V e os pontos e regiões onde cada parâmetro está situado.

Fonte: [24] [25].p.4. Modificada.

2.5.1.2 A ação da radiação solar na célula solar fotovoltaica.

A corrente elétrica que a célula solar pode fornecer depende diretamente da intensidade da radiação solar incidente. Essa afirmação permite concluir que, se a corrente elétrica da célula varia proporcionalmente à irradiância e se estiver em um

nível de iluminação definida como I_{PH1} (1 Sol AM1 = 100 mW/cm²), a corrente elétrica da célula, a um nível de iluminação X (fator de concentração: X sóis), é X vezes superior, como mostra a Equação 2.9 [23].

$$I_{PH} = XI_{PH1} \quad (2.9)$$

Sendo V_{OC1} a tensão de circuito aberto a 1 Sol, a tensão a X sóis se obtêm aplicando a Equação 2.10 considerando-se que m e I_0 se alteram sensivelmente ao aumentar o nível de iluminação ou irradiância [23].

$$V_{OC} = m_D \frac{kT}{Q} \ln \left[\frac{I_{PH}}{I_0} + 1 \right] \therefore V_{OC} = V_{OC1} + m_D \frac{kT}{Q} \ln X \quad (2.10)$$

Onde:

V_{OC} – Tensão de circuito aberto da célula solar.

Portanto, com pouca luz a capacidade de gerar energia e a corrente elétrica produzida pela célula é muito pequena. Como contraponto, se uma grande quantidade de luz incidir sobre a célula, uma grande corrente será produzida obtendo-se uma alta geração de energia, Figura 2.12.

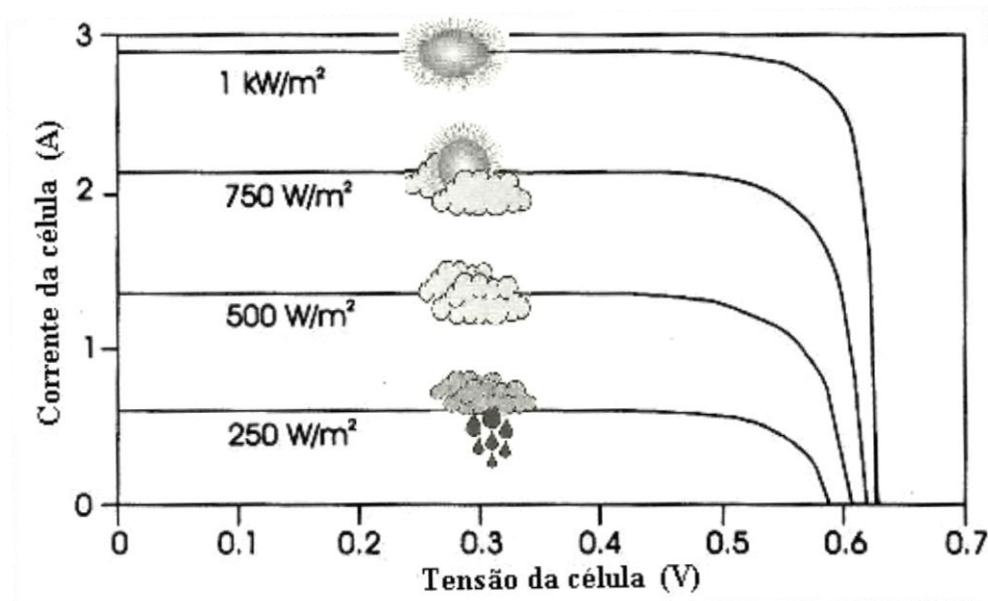


Figura 2.12 - Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação
Fonte: [26] p.43. Modificada.

2.5.1.3 A ação da temperatura na célula solar fotovoltaica.

A ação da temperatura sobre uma célula solar fotovoltaica pode ser expressa pela Equação 2.11. A corrente elétrica da célula I_{PH} aumenta rapidamente com a temperatura [23].

$$I = I_{PH} - I_0(T) \left[\exp \frac{q(V+IR_S)}{m_D kT} - 1 \right] \quad (2.11)$$

A Equação 2.12 fornece a tensão de circuito aberto sob a ação da temperatura.

$$V_{OC}(T) = \frac{E_{GO}}{q} - \frac{kT}{q} \ln \frac{KT^3}{I_{PH}} \quad (2.12)$$

Onde:

E_{GO} - largura da banda proibida a 0 K;

K – características dos semicondutores.

Essa equação mostra uma diminuição de V_{OC} com o aumento da temperatura. Tal variação se situa em um valor de aproximadamente 2,3 mV/°C para células de silício em temperatura ambiente.

Assim, o desempenho de uma célula solar fotovoltaica é apresentado na Figura 2.13. Nela observa-se que a temperatura influencia a tensão: em temperaturas mais baixas as tensões são maiores e em temperaturas mais altas há uma considerável diminuição na tensão de circuito aberto [10].

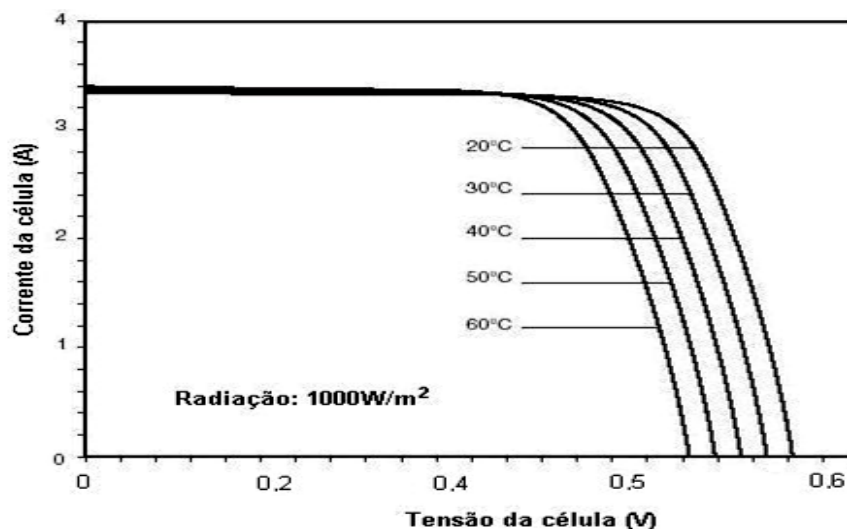


Figura 2.13 - Características de I-V sob a influência da temperatura
Fonte: [10] p.40

2.5.2 Módulos fotovoltaicos.

As células fotovoltaicas cuja tensão e corrente são muito pequenas para a grande maioria das aplicações e cargas, devem ser agrupadas para obter uma tensão de saída adequada. Esse agrupamento é chamado de módulo fotovoltaico. Com a formação desses módulos, a tensão e a corrente nos seus terminais podem ser diretamente utilizadas para alimentar pequenas cargas ou aplicações. Porém, para assim serem utilizadas, torna-se necessária uma alimentação em corrente contínua (CC), como, por exemplo, sistemas de iluminação e motores CC. Ainda, tais módulos podem ser associados em arranjos fotovoltaicos e podem ser aplicados onde a carga necessite de uma fonte de alimentação em corrente alternada (CA). Para isso, são necessários conversores eletrônicos adequando a corrente e a tensão da carga e controlando o fluxo de potência em sistemas conectados a rede [27] (Figura 2.14).

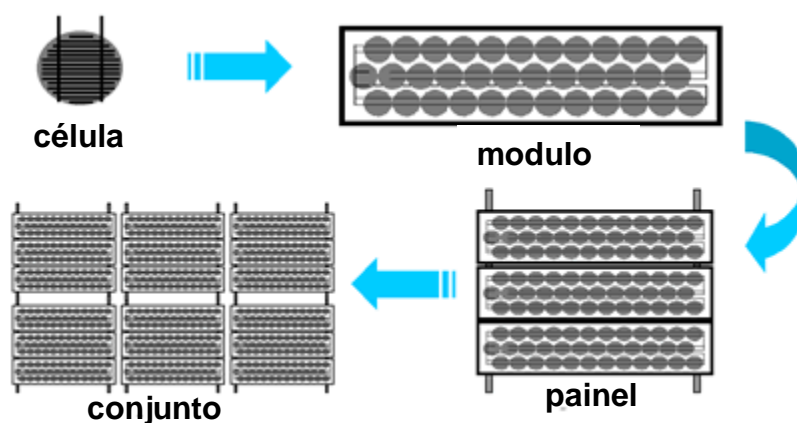


Figura 2.14 - Representação do módulo fotovoltaico
Fonte: [9] Modificada

Os parâmetros elétricos dos módulos ou painéis fotovoltaicos são determinados pelos fabricantes nas condições de referência *Standard Test Conditions* (STC). Além disso, também são especificados para os painéis fotovoltaicos a corrente de curto-circuito I_{sc} , a tensão de circuito aberto V_{oc} e o valor máximo da potência P_{MAX} , possibilitando, dessa forma, determinar a eficiência η .

Cabe registrar que a temperatura nominal de funcionamento da célula do painel, é especificada pelo *Nominal Operating Conditions of Temperature* (NOCT). Essa temperatura da célula é determinada pelo nível de irradiância, a temperatura ambiente e a velocidade do vento. No entanto, mesmo quando o sol brilhar com a

intensidade especificada, a temperatura da célula fotovoltaica será sempre superior a 25 °C [22].

Em termos de conceituação, corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico I_{SC} ($SC = Short\ Circuit$) é a corrente elétrica que o módulo consegue fornecer quando seus terminais estão em curto-circuito. Esta corrente é útil para auxiliar no dimensionamento e na especificação de equipamentos e acessórios ligados ao módulo fotovoltaico [2].

Já, tensão de circuito aberto V_{OC} ($OC = Open\ Circuit$) é o valor de tensão elétrica que um módulo fornece em seus terminais quando estão abertos, ou seja, quando não tem nenhuma carga ligada a ele e nenhuma corrente circulando. Este valor é importante para o dimensionamento do sistema, pois com ele é possível especificar as máximas tensões do inversor, do controlador e de outros componentes que serão ligados ao módulo fotovoltaico [2].

A máxima potência P_{MAX} é um valor determinado quando se tem, pré-estabelecidos, a corrente e a tensão do módulo fotovoltaico. Esta máxima potência é fornecida por um módulo no ponto de máxima potência conforme apresentado nas curvas da Figura 2.11. Ela pode ser vista pelas curvas de I-V e P-V, buscando o valor máximo ou o melhor ponto entre essas curvas.

A eficiência de conversão η de um módulo no Brasil é avaliada e certificada pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Após realizações de teste o órgão emite um selo do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), que atesta a eficiência do módulo. Caso esta informação não estiver explícita no equipamento, ela pode ser calculada através da equação 2.13, utilizando a área do módulo (m^2) A_P [2].

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{A_P \times 1000} \quad (2.13)$$

Com o exposto, é possível formar arranjos ou conjuntos de módulos fotovoltaicos buscando garantir e alcançar maiores níveis de potência, corrente e/ou tensão. Os módulos podem ser associados em série e/ou paralelo dependendo dos valores desejados. A associação de módulos dá origem a um arranjo ou gerador fotovoltaico.

Quando a ligação é feita em série, a tensão final do arranjo (V) é igual à soma das tensões dos módulos e a corrente final do arranjo (I) é igual à corrente de um único módulo. A equação 2.14 ilustra esse comportamento e a Figura 2.15(a) apresenta um esquema de ligação de n módulos em série.

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (2.14)$$

Se a ligação é feita em paralelo, o processo é inverso ao anterior. A corrente final do arranjo é igual à soma das correntes e a tensão final é igual à tensão de um único módulo. A equação 2.15 ilustra esse comportamento e a Figura 2.15(b) apresenta um esquema de ligação de n módulos em paralelo.

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \quad (2.15)$$

Já, o modo mais comum de encontrar arranjos é a junção de módulos em série e em paralelo garantindo, assim, maiores níveis de tensão, correntes e potência. A Figura 2.15(c) apresenta um esquema de ligação e a Figura 2.16 apresenta o comportamento das curvas de corrente e tensão na conexão série e paralelo.

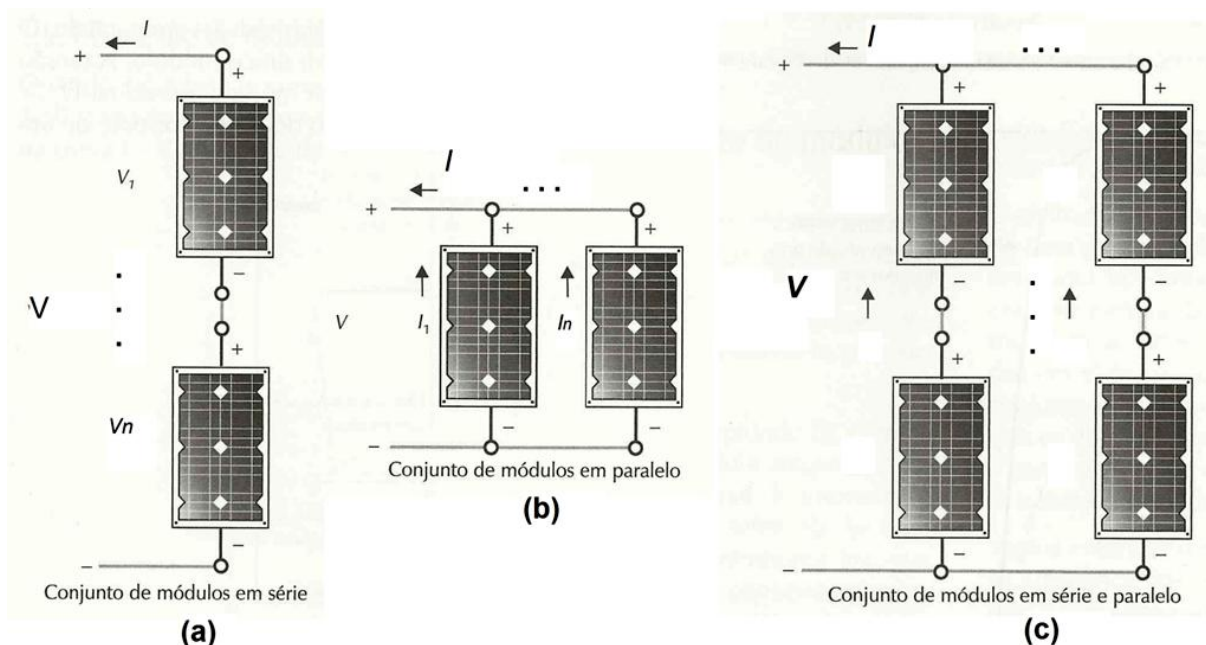


Figura 2.15 - Esquemas de ligação de módulos fotovoltaicos
Fonte: [2] p.89 Modificada.

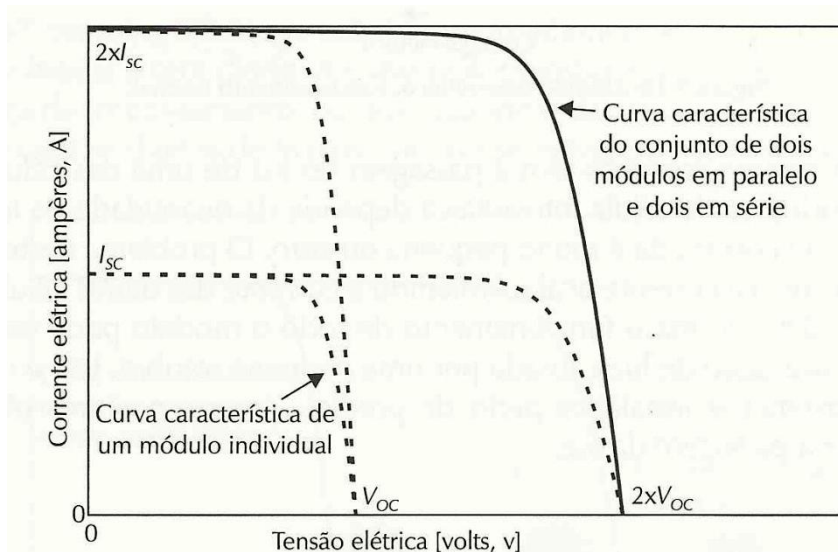


Figura 2.16 - Curvas I – V ligação série e paralelo de módulos fotovoltaicos
Fonte: [2] p. 91 Modificada.

2.5.3 Sistema Solar Fotovoltaico

Para sistemas solares fotovoltaicos existem duas categorias principais: os sistemas isolados ou não conectados à rede elétrica (que possuem um sistema acumulador de energia, ou seja, baterias) e os sistemas conectados à rede elétrica (que não possuem acumuladores de energia). A integração dos componentes e acessórios que complementam os módulos dependerá em qual categoria os sistemas são enquadrados [28].

2.5.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados ou Autônomos

Os sistemas fotovoltaicos isolados, também chamados de sistemas autônomos, são aqueles sistemas que fornecem eletricidade às residências que não estão conectados à rede de distribuição de eletricidade da concessionária local. Tem sua aplicação principal em uso doméstico nas zonas rurais, na praia, no camping ou em ilhas. Atendem às comunidades isoladas fornecendo eletricidade para iluminação, refrigeração e outras cargas com baixo consumo de energia [28].

Os sistemas fotovoltaicos autônomos podem ser empregados para substituir geradores movidos a diesel ou a gás em locais onde não tem ou não pode ter o atendimento de energia elétrica fornecida pela rede da concessionária local. Esse sistema tem a vantagem de exigir pouca manutenção, não geram ruídos, não poluem devido à combustão, não precisam ser abastecidos com combustível e são

considerados ecológicos, pois não agredem o meio ambiente e utilizam uma fonte renovável de energia.

2.5.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR)

Esses sistemas podem ser divididos em dois tipos: distribuídos ou centralizados.

Os centralizados, quando conectado à rede, executam a função de estações centralizadas de energia, ou seja, funcionam como uma usina de geração de energia fotovoltaica. Essa geração não é associada com um cliente particular ou uma única unidade consumidora. Pelo contrário, tal geração tem capacidade de atender um número maior de clientes. Os sistemas são tipicamente instalados em terrenos ou campos e funcionam normalmente distantes do ponto de consumo [28].

Os sistemas fotovoltaicos distribuídos conectados à rede são instalados para fornecer energia ao consumidor final que poderá usar a energia da rede elétrica convencional para complementar a quantidade de energia demandada (caso haja algum aumento do consumo de energia em sua residência ou estabelecimento comercial). O consumidor pode também compensar a energia gerada pelo seu próprio sistema junto à concessionária local (caso use menos energia do que foi gerado pelo seu sistema) [28].

O SFCR pode ser classificado segundo a ANEEL, de acordo com seu tamanho, em três categorias:

Microgeração: potência instalada até 100 kW;

Minigeração: entre 100 kW a 1 MW;

Usinas de eletricidade: potências acima de 1 MW [2].

Para este trabalho, apenas os sistemas solar fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição urbana de baixa tensão, ou seja, microgeração (potência instalada até 100 kW) será objeto de consideração.

2.6 SFCR para Redes de Distribuição Urbana

Um SFCR depende de um conjunto de equipamentos que permitem transformar energia solar em energia elétrica e realizar a conexão entre a energia

produzida pelo sistema com a rede elétrica de baixa tensão, operando em paralelo com a rede de eletricidade.

Esse sistema tem por objetivo gerar eletricidade para o consumo local.

Os sistemas integrados a prédios urbanos são incorporados à fachada ou ao telhado do imóvel não precisando de áreas destinadas somente para este fim, sendo o único pré-requisito uma orientação solar favorável.

Esses sistemas são constituídos basicamente por:

- Módulo(s) fotovoltaico(s): responsáveis pela captação e transformação de energia solar em energia elétrica CC;
- Inversor ou conjunto completo do sistema de condicionamento de potência: equipamento responsável pela transferência da energia CC produzida pelo(s) módulo(s) à rede elétrica CA, e pela operação adequada do sistema com a rede elétrica. Pode reduzir ou eliminar o consumo da rede da concessionária ou mesmo ainda gerar excedente de energia que poderá ser compensada [29] [2].
- Rede elétrica: responsável pelo transporte da energia disponível pela concessionária, da energia produzida pelo SFCR e por outras fontes aos consumidores. Funciona como uma espécie de sistema de armazenamento com capacidade infinita [29];
- Consumidor: utiliza a energia elétrica disponível na rede e produzida por outros geradores podendo também afetar o funcionamento do SFCR [29].

A Figura 2.17 mostra o fluxo de energia do SFCR para a rede e da rede para o consumidor.

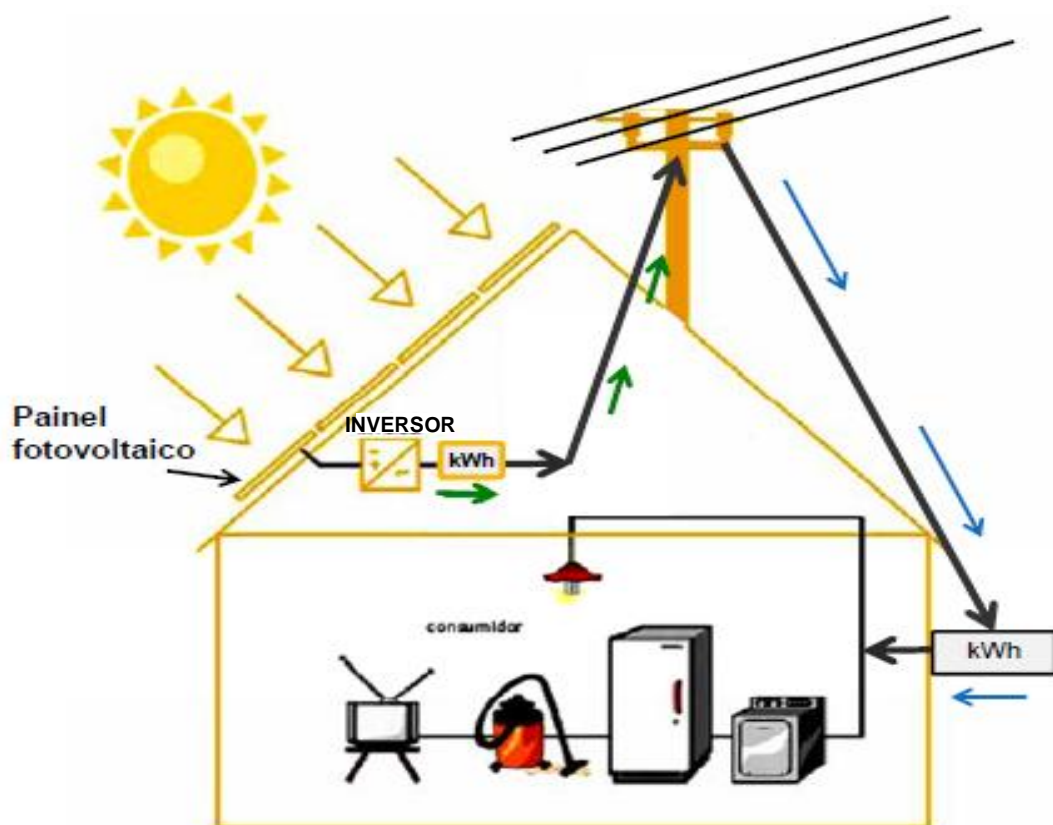


Figura 2.17 - Ilustração de um SFCR integrado a uma edificação.
Fonte: [30]

Os SFCR em edificações são basicamente constituídos por um gerador fotovoltaico, um conversor CC/CA (inversor), a rede elétrica de distribuição e as cargas CA locais. Essa configuração diminui a demanda da rede durante o dia e permite uma troca de energia entre o SFCR e a rede elétrica devido ao fluxo que irá proporcionar um atendimento continuado de energia para o consumidor sem a necessidade de baterias [29].

O gerador fotovoltaico fornece potência, tensão e corrente CC em função da radiação solar e da temperatura da célula. O inversor é responsável pela conversão da tensão e corrente CC em potência CA com Fator de Potência (FP) o mais próximo de um [29]. A Figura 2.18 mostra uma visão detalhada do sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica.

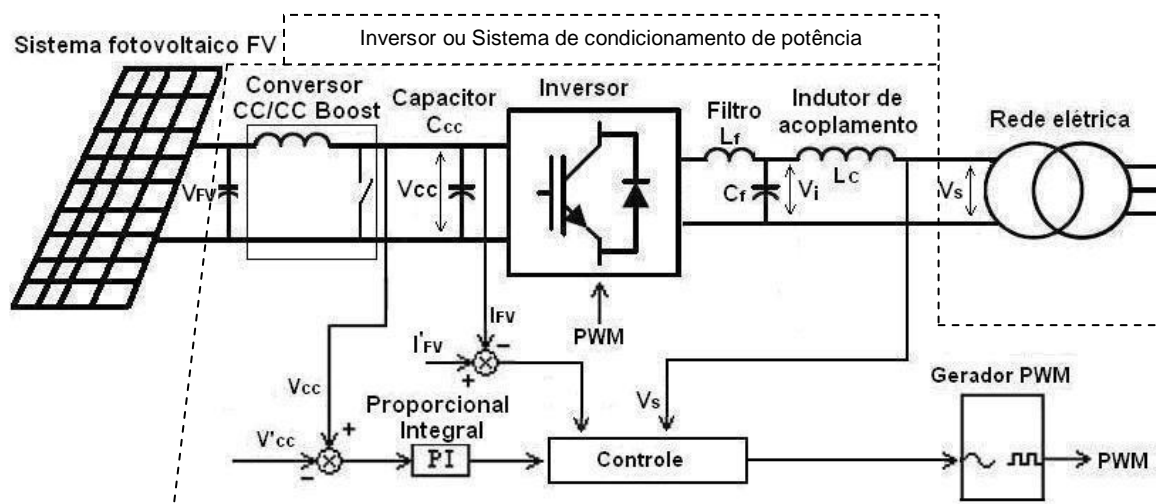


Figura 2.18 - Visão detalhada do SFCR.
Fonte: [10] p.74 Modificada.

Nos SFCR, o equipamento ou o sistema que condiciona a potência fotovoltaica para sua injeção na rede elétrica é o inversor. O inversor utilizado para essas aplicações só funciona quando ligado à rede elétrica. Os funcionamentos dos SFCR estão associados à potência, à tensão, ao modo de ligação e ao tipo de inversor empregado. O inversor irá atuar no controle do sistema e, também, como meio pelo qual a potência elétrica gerada flui para a rede elétrica da concessionária de distribuição. Ele geralmente utiliza a tensão e a frequência da rede elétrica como parâmetros de controle, assegurando que a saída do SFCR esteja totalmente sincronizada com a concessionária [29].

A variação de tensão tem limites estabelecidos pelo Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) Módulo 8.

Registra-se que a utilização de muitos SFCR instalados em um mesmo alimentador pode ocasionar um problema, ou então, se apresentarem como uma solução para o sistema de distribuição de energia, pois, essa geração deve elevar a tensão aproximando os valores desejados ou pode superar o limite admissível pela ANEEL [3].

Dependendo da potência gerada pelo SFCR e da demanda flutuante exigida pela carga da edificação, a potência CA poderá fluir para a carga, para a rede ou para ambas. Contudo, para garantir a segurança frente aos eventuais serviços de operação e manutenção, as concessionárias requerem que o SFCR desconecte-se imediatamente da rede elétrica sempre que ela falhe ou falte.

O uso dos sistemas fotovoltaicos é influenciado pelas topologias dos inversores utilizados e pelas regras ou padrões de conexão exigidos pelas concessionárias locais.

No mundo, a disseminação e a maior utilização dessa fonte geradora fizeram com que em alguns lugares fossem criadas políticas de incentivos para desenvolvimento e aplicações desse sistema, aumentando suas possibilidades de configurações e implicando em várias formas de controle e conexão com a rede. Em consequência, surgiram vários modos de se mensurar os fluxos para efeito de faturamento ou não dessa energia produzida pelo consumidor.

Como visto anteriormente, alguns componentes são importantes para a primeira ideia de um projeto de SFCR. Na sequência, será detalhada a configuração desses sistemas utilizando os elementos que são instalados para fins de análise de fluxo de potência, como pode ser visto nas figuras a seguir.

Esses elementos são:

- Módulos ou Painéis fotovoltaicos: responsável pela transformação da energia do Sol em energia elétrica CC;
- Quadros de proteção CC do sistema fotovoltaico: podem conter ou não alarme, além de disjuntores, fusíveis e outras proteções;
- Inversor para conexão com a rede elétrica: transforma a corrente contínua CC produzida pelo gerador fotovoltaico em corrente alternada CA;
- Quadros de proteção CA do sistema fotovoltaico: podem conter ou não alarme, disjuntores, fusíveis e outras proteções, além de ponte de acoplamento com a rede elétrica;
- Quadro geral de entrada do consumidor: liga o consumidor e suas cargas (instalação elétrica da residência) a rede elétrica de energia;
- Medidores de energia: pode ser um único para medir a energia produzida e consumida ou então podem ser dois medidores um para cada função;
- Rede elétrica: meio físico pelo qual a energia elétrica flui.

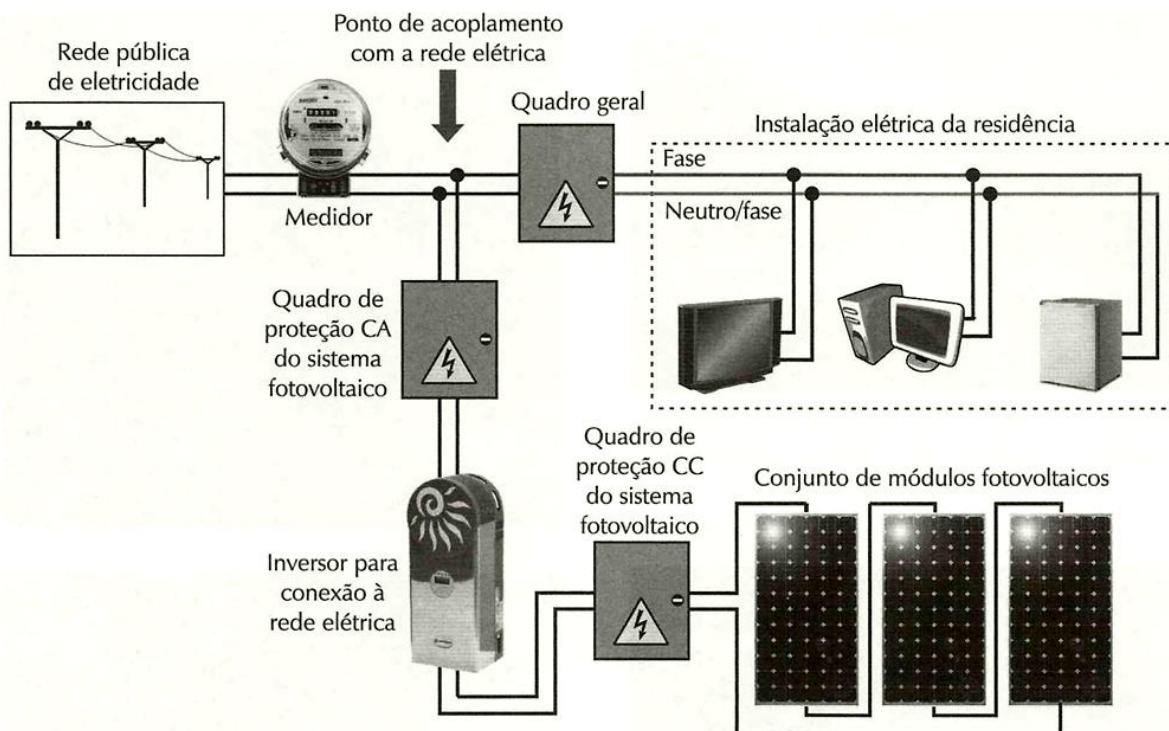


Figura 2.19 - Organização e componentes de um SFCR.

Fonte: [2] p.153

Com base nesses elementos, várias são as possibilidades ou configurações que podem ser adotadas para que uma instalação de um SFCR seja efetivamente conectada à rede elétrica de baixa tensão. Após a resolução normativa N° 482/2012 da ANEEL, PRODIST Módulo 3, todas as configurações estão definidas de acordo com essa regulamentação e com as normas de cada concessionária local.

Também, devido a essa regulamentação um sistema de tarifação foi adotado no Brasil chamado de *net metering* ou medição da energia líquida.

Nesse sistema *net metering* o fluxo de potência e a energia podem ser registrados por um medidor que tenha a capacidade de perceber o fluxo em ambos os sentidos no ponto de conexão ou então, por dois medidores (como dito anteriormente) um medindo o consumo e outro a geração. Pelo cálculo da diferença entre consumo e geração o consumidor, no final do mês, só pagará pela quantidade excedida gasta em relação à energia gerada. Ainda de acordo com a resolução normativa da ANEEL N° 482/2012, a forma de tarifação permite ao consumidor compensar seu consumo de eletricidade com a sua geração própria num período determinado (36 meses), utilizando os créditos, se existirem, em qualquer unidade consumidora registrada em seu Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou jurídica

(CNPJ). Caso ao final desse período houver ainda créditos, eles serão perdidos sem nenhuma remuneração. As Figuras 2.20 e 2.21 ilustram esses esquemas de medição.

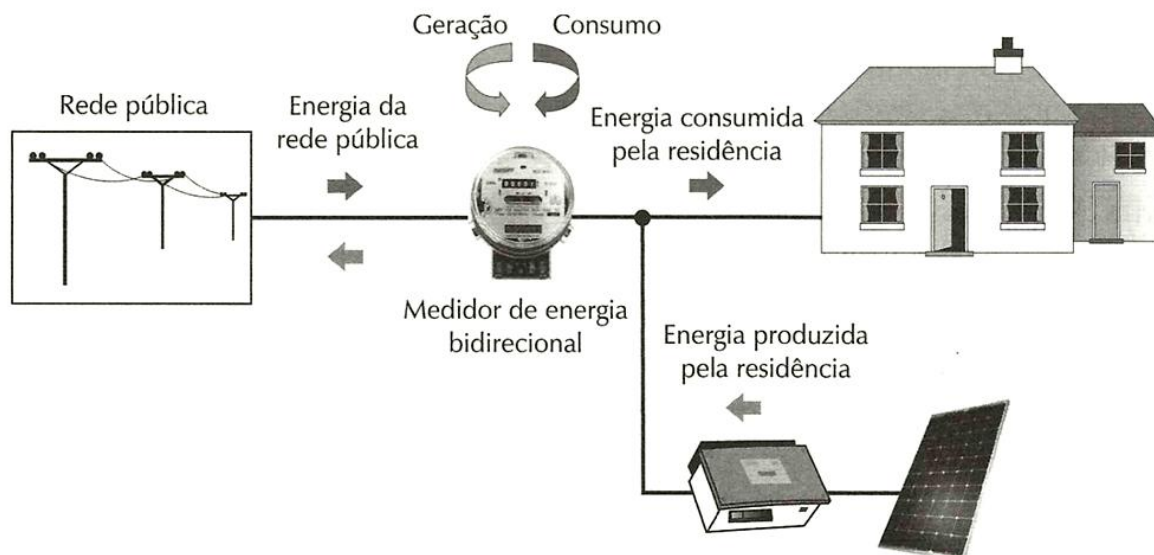


Figura 2.20 - Sistema de tarifação *net metering* com um medidor bidirecional.
Fonte: [2] p. 157

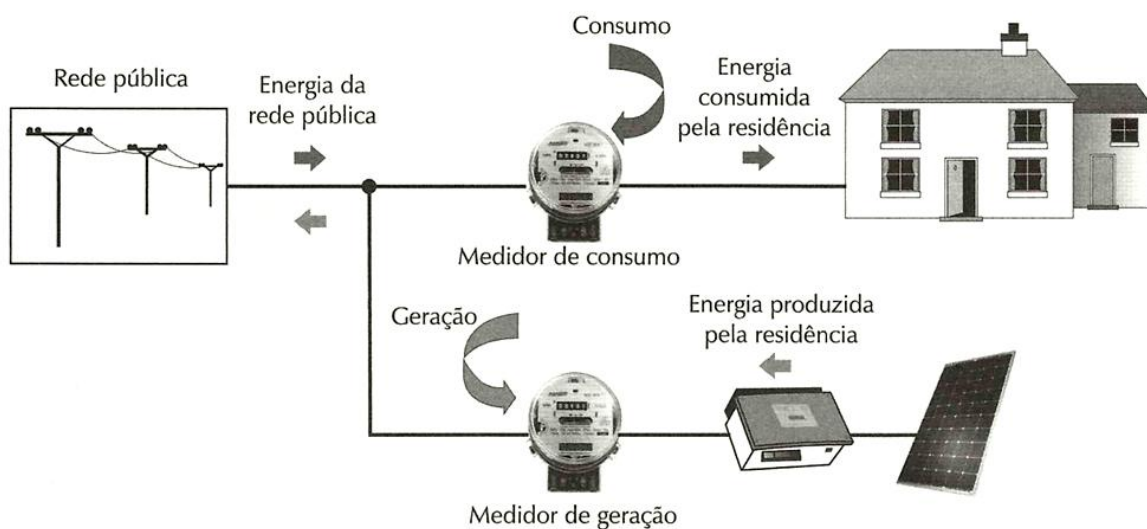


Figura 2.21 - Sistema de tarifação *net metering* com dois medidores.
Fonte: [2] p. 157

Tendo como base os conceitos vistos neste capítulo, a discussão a seguir adentrará a questão da geração de energia elétrica com a utilização de sistemas fotovoltaicos tratando especificamente da cidade de Palmas, capital do Tocantins.

Capítulo III

A CIDADE DE PALMAS E SUAS CARACTERÍSTICAS PARA O USO DO SFCR

3 Considerações Iniciais.

O Estado do Tocantins representa cerca de 2,38% de toda a energia elétrica gerada no país (no ano de 2013). Dessa porcentagem, a grande parte vem de fontes renováveis de energia como hidrelétricas e biomassa. No entanto, segundo o Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL em 21/11/2013, não se tem registrado nenhuma fonte de geração solar fotovoltaica no estado mesmo contando com características favoráveis a esse tipo de geração. Conforme mostrado na Figura 2.6 o Estado tem uma média de insolação diária boa (maior que 6 horas o ano todo). Tal média se mostra favorável para que empreendimentos na área de geração solar fotovoltaicas sejam instalados.

O capítulo a seguir discute a questão da geração de energia solar fotovoltaica especificamente na cidade de Palmas, capital do Tocantins. Inicialmente, de forma sucinta, é apresentada a formação da cidade com suas características físicas e urbanísticas para que depois seja discutida a questão da energia solar em si.

3.1 Palmas: a cidade projetada para ser a capital do estado do Tocantins

A cidade de Palmas, diferente da grande maioria das capitais brasileiras (que surgiram de forma espontânea), foi criada exclusivamente com o objetivo de ser a capital do mais novo estado brasileiro o Tocantins. A capital foi implantada a partir de 1989, no sítio inserido entre a encosta da serra do Lajeado e a margem direita do rio Tocantins, hoje margem do reservatório artificial da UHE Luiz Eduardo Magalhães (Lajeado) [31].

Para a configuração da cidade foi adotado um modelo fragmentado na forma de tabuleiro de xadrez subdividido em quadras internas. Essas quadras foram divididas por setores tais como: indústria, comércio, moradia e equipamentos urbanos, além das áreas de lazer, preservação ambiental e expansão futura [31].

Para a implantação da cidade, segundo os projetistas responsáveis pela criação da nova capital, os seguintes pressupostos (entre outros) deveriam estar presentes: os custos de implantação da infraestrutura urbana deveriam ser viáveis e compatíveis com as condições econômicas do recém-criado estado federativo, a flexibilidade impressa ao projeto deveria garantir expansão ordenada da superfície e a cidade deveria ser conhecida como a capital ecológica. A ideia da capital ecológica deveria fazer com que a cidade unisse no mesmo lugar condições para seus residentes habitar, trabalhar e divertir-se sempre em consonância com os paradigmas ecológicos, ou seja, buscando condições favoráveis para integrar parâmetros de qualidade ambiental evitando os processos de degradação ambiental observados na maioria das cidades brasileiras [31].

Assim, a cidade foi dividida em grandes áreas, sendo elas: a área administrativa central (AA), quatro áreas residenciais (ARNE, ARSE, ARNO e ARSO), uma área de expansão norte e outra de expansão sul, conforme mostra a Figura 3.1.

No entanto, mesmo contando com uma estrutura formal organizada no projeto urbanístico a ocupação e a expansão da cidade não aconteceu conforme o previsto. A cidade implantou-se de maneira espalhada provocando um alto custo de manutenção, dificultando a implantação de infraestrutura básica e onerando o custo de vida para seus habitantes [31].

Somado a essa realidade, o processo de migração que ocorreu para a região central do Estado devido à implantação da nova capital ajudou a piorar as condições ambientais da capital do Tocantins. A cidade recebia mais moradores e não tinha estrutura suficiente para acomodá-los. Segundo dados apresentados pelo IBGE (1991, 2000, 2010) evidencia-se que, entre 1991 e 2000, enquanto o Estado do Tocantins teve acréscimo de sua população de 25,9%, Palmas (a sua capital) aumentou 464,5%. Já, entre 2000 e 2010, enquanto o Estado crescia 19,5%, Palmas apresentou um crescimento de 65,5% [31]. Registra-se que no ano de 2013, após 24 anos de sua criação, a população estimada para a cidade girava em torno de 257.904 habitantes.

Como consequência a chegada desses diversos moradores colaborou para a desordenação do crescimento da cidade e sobrecarregou a infraestrutura urbana, trazendo consigo a questão dos altos custos referente à iluminação pública e residencial.



Figura 3.1 - Palmas: Mosaico de Ortofotocartas da Prefeitura Municipal, 2003
Fonte: [31] Modificada.

Em termos de energia elétrica, observa-se que em Palmas a tarifação dessa energia está entre as mais caras praticadas no Brasil. Segundo a classificação dada pela ANEEL referente ao valor da tarifa de consumo residencial das Concessionárias brasileiras praticadas no ano de 2013, o estado do Tocantins se apresenta como o segundo mais caro (Gráfico 3.1). Registra-se que para a ANEEL, os valores dessa classificação se referem às tarifas homologadas no órgão, expressas na unidade R\$/kWh (reais por quilowatt-hora) e não contemplam tributos e outros elementos que fazem parte da conta de luz, tais como: ICMS, encargo de capacidade emergencial entre outras taxas e tributos [32].

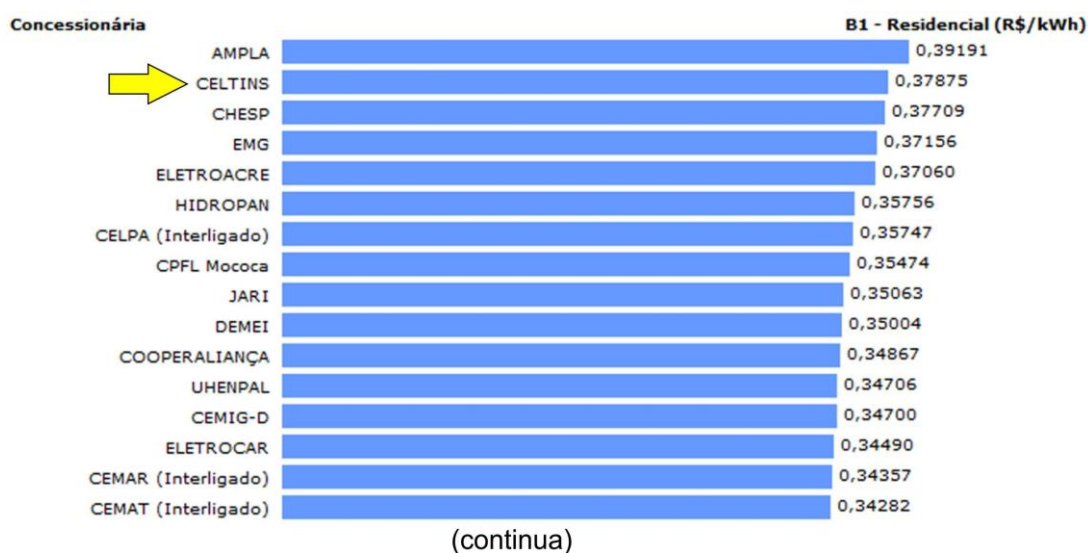


Gráfico 3.1 - Tarifas Residenciais Vigentes
Fonte: [32] Modificada.

Dessa forma, considerando os dados acima aliados às características de insolação de Palmas apresentados no início deste trabalho (média anual de insolação diária de 6 horas e radiação solar global diária de 16 MJ/m² ou 2080 a 2153 kWh/m² [8] [7]), justifica-se a busca por uma intensificação no uso de painéis fotovoltaicos para a geração de energia elétrica, pois tais características fazem com que a cidade se apresente com um excelente potencial para a utilização desse sistema.

3.2 Normatização para acesso e conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição de energia elétrica do Estado do Tocantins

Conforme dito no capítulo anterior, a forma de conexão da unidade de geração distribuída ao sistema elétrico é definida pelas concessionárias de energia elétrica durante a elaboração de seus respectivos pareceres de acesso. Ou seja, nenhuma distribuidora pode restringir a conexão do acessante em linhas de transmissão ou alimentadores já existentes, desde que sejam atendidos critérios e padrões técnicos previamente estabelecidos para a conexão.

Na cidade de Palmas, a concessionária local responsável pela distribuição de energia elétrica é a Companhia de Energia Elétrica do Estado do Tocantins (CELTINS).

Seguindo o determinado pela ANEEL, a concessionária CELTINS criou uma norma técnica NTD-18 que trata dos Requisitos para acesso e conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição da CELTINS - Rede de distribuição aérea – Conexão de microgeração na rede de baixa tensão.

Tal norma foi criada com o objetivo de adequar o que foi determinado pela ANEEL para ser aplicada a realidade do estado do Tocantins e suas cidades. Ela apresenta os requisitos que devem ser atendidos, pela nova unidade geradora de energia elétrica, para o acesso e conexão em baixa tensão. Também tal norma lembra que essa nova conexão deve ser ligada à rede de distribuição da CELTINS por meio de instalações de unidades consumidoras, em edificações individuais, que façam adesão ao sistema de compensação de energia elétrica. A NTD em questão aplica-se apenas para os casos em que irá injetar potência ativa na rede da concessionária [33].

Para a CELTINS (2012) a geração distribuída está descrita como:

Centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente ao sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo ONS.

Também, a CELTINS (2012) define microgeração distribuída da seguinte maneira:

Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Por fim, a CELTINS (2012) esclarece e define o que é sistema de compensação de energia elétrica da seguinte forma:

Sistema no qual a energia ativa gerada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda.

Também nessa NTD encontram-se outras definições para padronizar a linguagem entre engenheiros, técnicos, projetistas e pessoas leigas no assunto.

Especificamente, em termos de microgeração baseada em energia solar, tal norma estabelece que os inversores que são usados por esse sistema devem respeitar o que consta no Projeto de Norma 03:082.01-001 da ABNT/CB-03 [33].

Para a forma de conexão ao sistema elétrico de distribuição de baixa tensão deve ser respeitada a faixa de potência indicada na Tabela 3.1 e a conexão dos geradores com inversores mostrados na Figura 3.2.

Tabela 3.1 - Formas de conexão na baixa tensão

Potencia de Geração instalada (kW)	Tensão nominal (v)	
	380/220	440/220
Ate 3	Monofásico	Monofásico
De 3,1 a 4	Monofásico	Monofásico
De 4,1 a 7,5	Monofásico	
De 7,6 a 9,9	Bifásico	
De 10 a 75	Trifásico	

Fonte: [33] p.27

Já, em termos de valores de referência quanto à tensão de atendimento em regime permanente no ponto de conexão do sistema fotovoltaico, devem ser respeitados os valores apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Classificação e valores de referência para a Tensão de Atendimento para pontos de conexão em redes com tensão nominal de 380/220 V.

Tensão de Atendimento - TA (V)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura- TL- (V)
Adequada	$(348 \leq TL \leq 396) / (201 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(327 \leq TL < 348 \text{ ou } 396 < TL \leq 403) / (189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 327 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: [33] p. 29

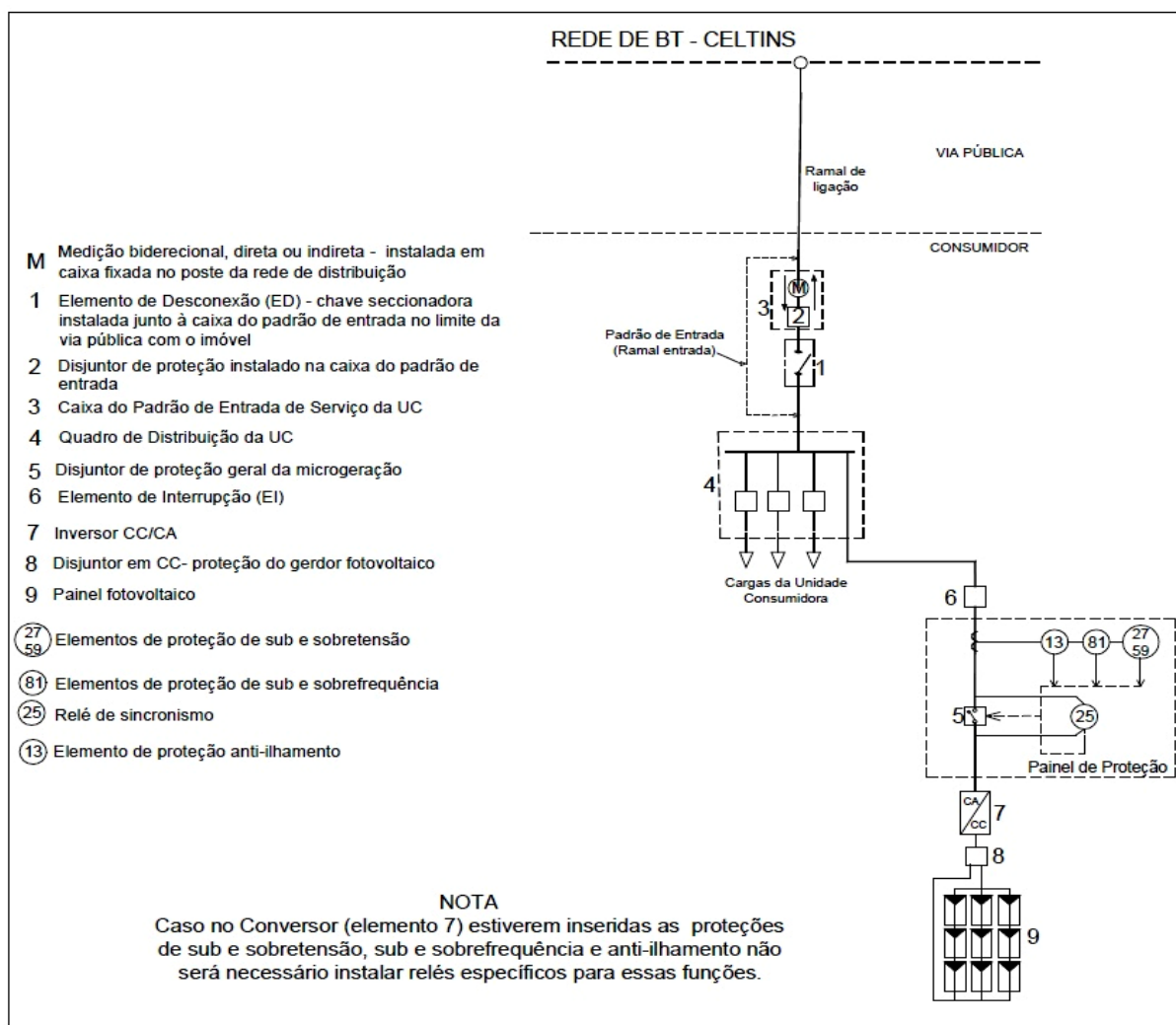


Figura 3.2 - Conexão de microgeração fotovoltaica através de unidade consumidora do Grupo B com medição no padrão de entrada.

Fonte: [33] p.35

Ao tratar dos requisitos de qualidade da energia fornecida à rede de distribuição e as cargas locais, a CELTINS lembra que deve se respeitar as normas e práticas referentes à tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e Fator de Potência (FP). Se houver valores diferentes dos padrões já especificados se

caracterizará uma condição anormal de operação sendo imprescindível que o sistema identifique esta falha e cesse o fornecimento de energia até as condições serem reestabelecidas [33].

Segundo a CELTINS (2012), para o sistema de geração distribuída a distorção harmônica total de corrente não deve ser superior a 5% na potência nominal do sistema. As harmônicas individuais devem respeitar os limites estabelecidos pela NTD.

Para os casos onde a potência ativa injetada na rede, pelo sistema de geração distribuída, for maior que 20% da potência nominal de geração, o sistema deve ser capaz de operar dentro das faixas estabelecidas. Para o caso onde esta potência for menor ou igual a 3 kW, o fator de potência deve ser preferencialmente unitário, porém, admite-se uma variação entre 0,98 indutivo e 0,98 capacitivo. Para faixas entre 3 kW até 6 kW, o FP deve se ajustar entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo e para potências acima de 6 kW, o FP deve se manter dentro do intervalo 0,92 indutivo e 0,92 capacitivo. Se houver qualquer mudança na potência ativa, o sistema de geração distribuída deve ser capaz de automaticamente ajustar a potência reativa de saída para se adequar dentro da faixa predefinida do FP, isso tudo em um tempo máximo de 10 s [33].

A tensão em regime permanente deve respeitar a faixa de operação estabelecidas na Tabela 3.3 e se a tensão da rede sair desta faixa o sistema de geração distribuída deve cessar o fornecimento de energia à rede respeitando o que esta sendo definido pela NTD.

Tabela 3.3 - Resposta as condições anormais de tensão

Tensão no ponto de conexão comum (% em relação a V_{nominal})	Tempo Máximo de desligamento¹
$V < 80\%$	0,4 s
$80\% \leq V \leq 110\%$	Regime normal de operação
$110\% < V$	0,2 s

Fonte: [33] p.30

Se a frequência da rede se alterar para valores menores de 57,5 Hz, ou maiores de 62 Hz, em 0,2 s o sistema de geração distribuída deve parar de injetar energia na rede elétrica da concessionária e só deve voltar a fornecer energia

¹ O tempo máximo de desligamento refere-se ao tempo entre o evento anormal de tensão e a atuação do sistema de geração distribuída (cessar o fornecimento de energia para a rede). O sistema de geração distribuída deve permanecer conectado à rede a fim de monitorar seus parâmetros e permitir a "reconexão" do sistema quando as condições normais forem restabelecidas [33].

novamente à rede quando a frequência estiver entre 59,9 Hz à 60,1 Hz e permanecer nesses valores ou no valor nominal de frequência (60 Hz) e tensão conforme tabela anterior, por mais de 180 s para então realizar a reconexão [33].

Quando a frequência da rede ultrapassar 60,5 Hz e estiver abaixo de 62 Hz, o sistema de geração deve diminuir a injeção de potência ativa à rede respeitando a Equação 3.1. A Figura 3.3 apresenta a curva de operação do sistema fotovoltaico em função da frequência da rede possibilitando a visualização dessas definições de desconexão por sub ou sobrefrequência [33].

$$\Delta P = [f_{rede} - (f_{nominal} + 0,5)] \times R \quad (3.1)$$

Sendo:

ΔP - variação da potência ativa injetada (%);

f_{rede} – frequência da rede;

$f_{nominal}$ – frequência nominal da rede;

R - taxa de redução desejada da potência ativa injetada (em %/Hz), ajustada em – 40 %/Hz. A resolução da medição de frequência deve ser $\leq 0,01$ Hz.

Outras especificidades referentes a variação de frequências estão detalhadas na NTD-18.

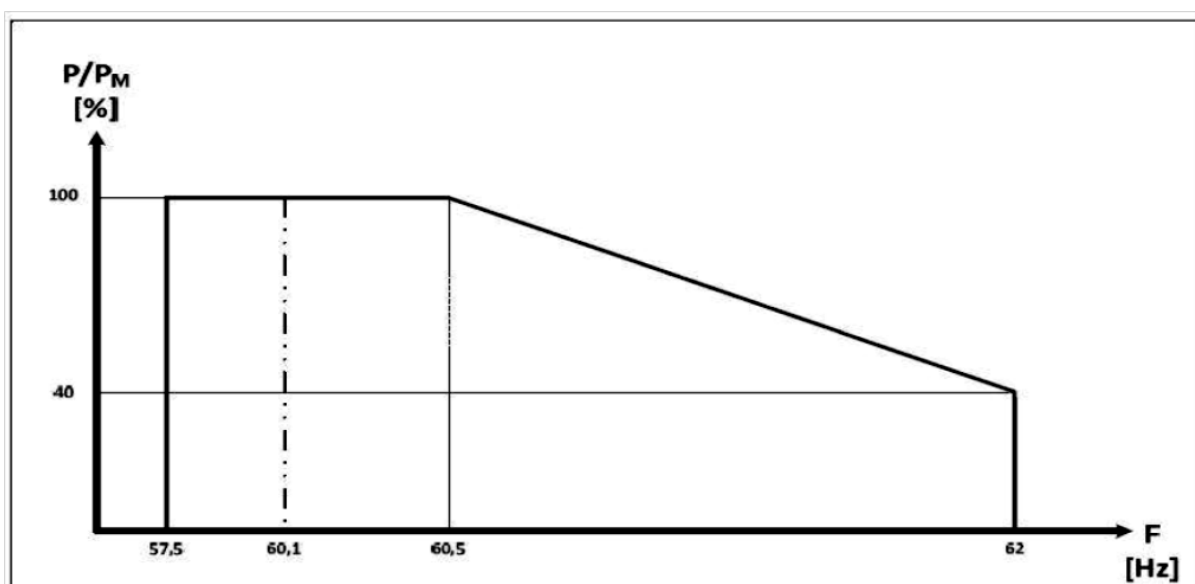


Figura 3.3 - Curva de operação do sistema de geração distribuída em função da frequência da rede para desconexão por sub e sobrefrequência.

Fonte: [33] p.38

Vale destacar, quanto a potência total máxima de geração distribuída ou a soma das máximas potências dos sistemas fotovoltaicos conectados ao circuito da rede de distribuição de baixa tensão da concessionária, fica estabelecido que estas não poderão ultrapassar a metade da capacidade da potência do transformador que supre a rede acessada.

As características do sistema de distribuição de baixa tensão da CELTINS esta sendo apresentado no diagrama unifilar simplificado da Figura 3.4 [33].

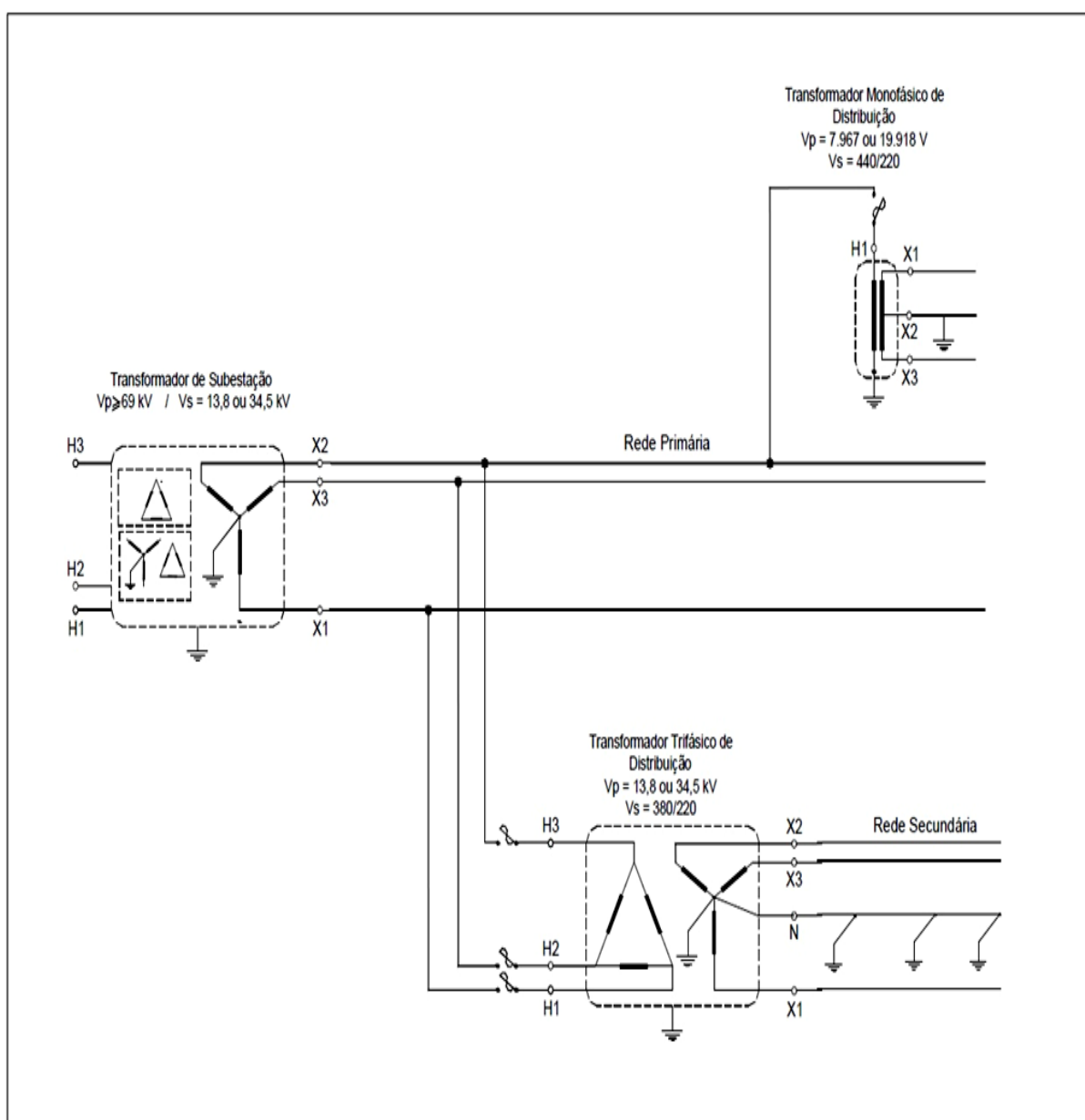


Figura 3.4 - Diagrama simplificado do sistema de distribuição da CELTINS
Fonte: [33] p.42

Por fim, na Norma Técnica em questão é informado como devem ser preenchidos e quais são os documentos e formulários necessários para que o consumidor possa se tornar um gerador de energia elétrica interligado ao sistema de distribuição de baixa tensão da concessionária local a CELTINS.

3.3 Estudo de caso: a Quadra Residencial 1106 Sul da cidade de Palmas.

Para abordar e discutir a temática da geração elétrica por meio dos sistemas solares fotovoltaicos na cidade de Palmas a pesquisa definiu como área recorte para estudo de caso a área tipicamente residencial da cidade identificada como quadra 1106 Sul localizada entre as avenidas LO-25, NS-10, LO-27 e NS-4. Tal quadra contém em sua área uma grande concentração de residências, uma escola pública, uma área de feira livre municipal e alguns comércios totalizando, segundo cadastro da CELTINS (2013), um número de 1427 unidades consumidoras ligadas. A Figura 3.5, retirado do Mapa Oficial da Prefeitura Municipal de Palmas, mostra o desenho da quadra com todos os lotes, ocupados ou não. Já a Figura 3.6, retirada do Google Earth - atualizada em 2013, apresenta uma imagem aérea com todas as construções existentes na quadra.

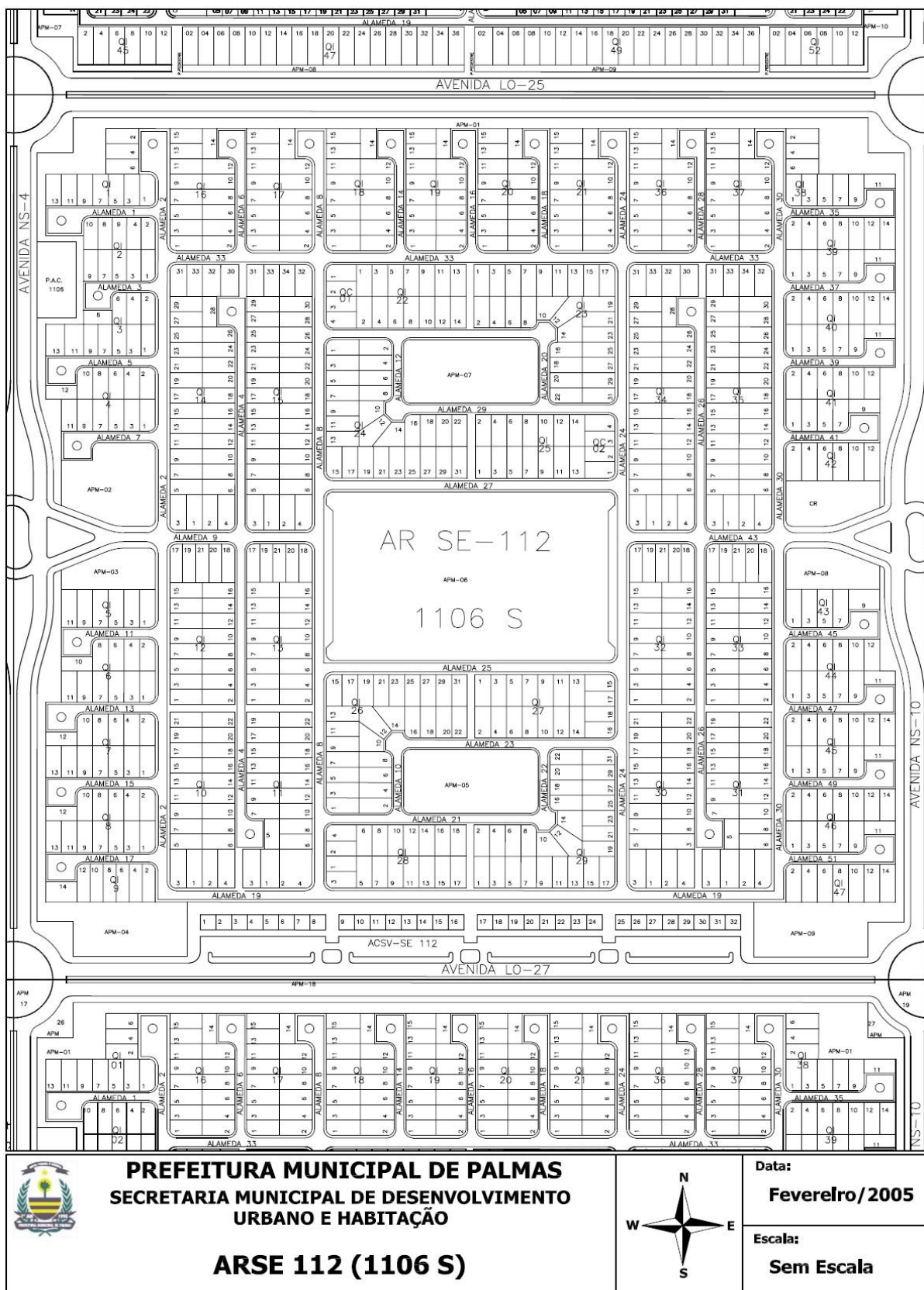


Figura 3.5 - Mapa da Quadra 1106 Sul
Fonte: [34]



Figura 3.6 – Foto aérea da Quadra 1106 Sul.
Fonte: Google Earth

Ao se tratar especificamente da questão de dados solares característicos para a região, esta pesquisa tomou como referência os valores de irradiância realizados pela estação meteorológica automática PALMAS-A009 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada na quadra 112 Sul, distante 7 km da quadra de estudo em questão. Tais dados foram medidos no dia 03 de outubro de 2013 e são apresentados na Tabela 3.4. Os mesmos dados se encontram

disponíveis na página virtual do INMET por um período de 90 dias contados a partir da medição [35].

Vale lembrar que na Tabela 3.4, as horas são registradas com Tempo Universal Coordenado (UTC) cujo fuso horário se encontra de acordo com o horário do Meridiano de Greenwich (Observatório Real - nos arredores de Londres - Reino Unido) [36]. Dessa forma, ressalta-se que para estudos no Brasil adota-se o horário de Brasília, ou seja, atrasa-se em três horas o valor dos períodos medidos caso esses não estejam no horário de verão oficial [36].

Também, na tabela em questão, é mostrado os valores de irradiação solar em kJ/m^2 . Assim, como os cálculos de produção de energia para os sistemas solares fotovoltaicos são realizados em W/m^2 torna-se necessário fazer a conversão das unidades, multiplicando o valor dado em kJ/m^2 pela constante de valor 0,2778. Por fim, depois de realizada essa alterações é gerada a coluna Irradiância em W/m^2 como mostrado na Tabela 3.4 [10].

Registra-se que por meio desses dados observam-se as variações da irradiância e temperatura, em uma época do ano específica, levando em consideração à inclinação da Terra em relação ao Sol e possíveis interferência de nuvens.

Com os dados da Tabela 3.4 é possível gerar um gráfico da temperatura em $^{\circ}\text{C}$ durante as 24 horas do dia e um gráfico da irradiância em W/m^2 conforme mostra nos Gráficos 3.2 e 3.3. Cabe notar que esses dados foram obtidos durante o período de estiagem (céu totalmente limpo sem nuvens). Diante disso, observa-se que tais dados praticamente não sofreram alterações no índice de radiação solar, pois, nesse período não houve nebulosidade na região.

Informa-se que para o intervalo de um dia, a distância Terra-Sol e a declinação solar são praticamente constantes [10]. Sabe-se que, em diferentes inclinações anuais Terra-Sol, o valor de pico de irradiação é diferente para outros dias ou meses do ano, sendo esses influenciados pela presença de mais nuvens ou chuvas. Também, essas medições podem se alterar devido a Terra estar em uma posição mais favorável em relação aos raios solares.

Tabela 3.4 - Dados de medições realizados pelas estações meteorológicas automática Palmas-A009 INMET.

Data	Hora (UTC)	Hora Palmas - To	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Vento (m/s)	Radiação (kJ/m²)	Irradiância (W/m²)
03/10/2013	0		30,0	33	0,9	0	0
03/10/2013	1		28,9	43	0,4	0	0
03/10/2013	2		29,6	46	1,2	0	0
03/10/2013	3	0	28,5	50	0,8	0	0
03/10/2013	4	1	27,7	54	0,2	0	0
03/10/2013	5	2	26,1	61	0,2	0	0
03/10/2013	6	3	25,1	64	0,2	0	0
03/10/2013	7	4	25,3	61	0,4	0	0
03/10/2013	8	5	25,6	62	0,4	0	0
03/10/2013	9	6	26,0	63	0,7	0	0
03/10/2013	10	7	27,2	66	1,2	134,4	37,33363
03/10/2013	11	8	30,5	51	1,8	369,2	102,5564
03/10/2013	12	9	31,0	50	2,6	1607	446,3925
03/10/2013	13	10	32,2	45	1,8	2265	629,1717
03/10/2013	14	11	34,4	39	2,3	2831	786,3952
03/10/2013	15	12	36,3	31	3,0	3093	859,1735
03/10/2013	16	13	36,5	29	3,4	3267	907,5073
03/10/2013	17	14	36,4	30	3,1	2968	824,451
03/10/2013	18	15	37,6	27	2,4	2539	705,2834
03/10/2013	19	16	36,0	30	1,7	1306	362,7807
03/10/2013	20	17	35,5	32	2,4	893,3	248,1409
03/10/2013	21	18	34,4	37	2,2	144,5	40,13921
03/10/2013	22	19	32,9	43	1,5	0	0
03/10/2013	23	20	31,9	48	1,3	0	0
04/10/2013	0	21	30,3	53	0,7	0	0
04/10/2013	1	22	29,6	56	0,7	0	0
04/10/2013	2	23	29,1	57	0,6	0	0
04/10/2013	3	0	29,2	56	1,0	0	0

Fonte: [35]. Modificada

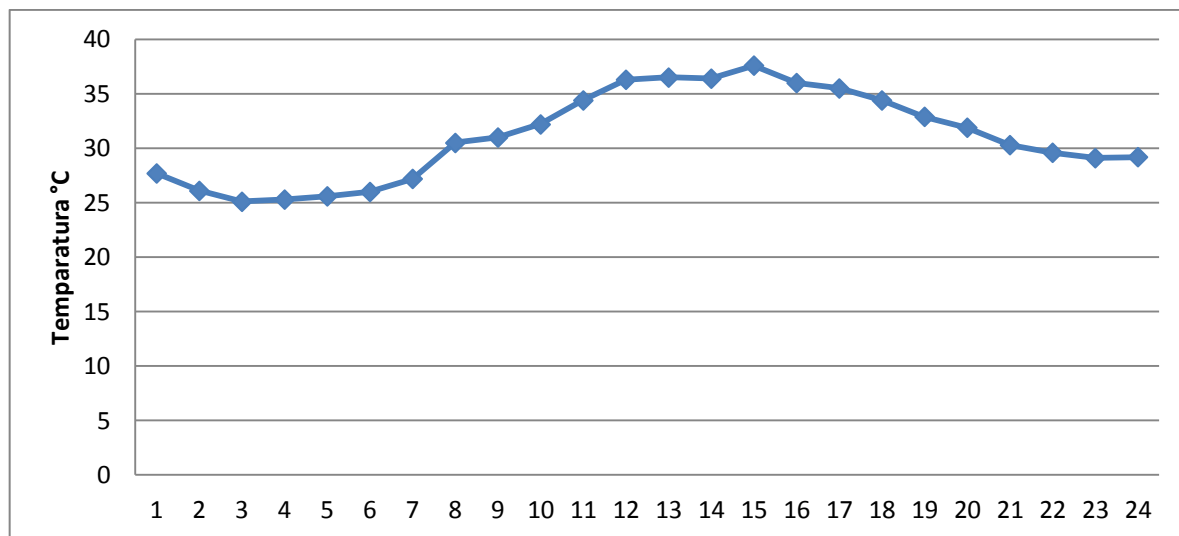


Gráfico 3.2 - Temperatura registrada durante o dia 03/10/2013.
Elaboração: Piccini (2013).

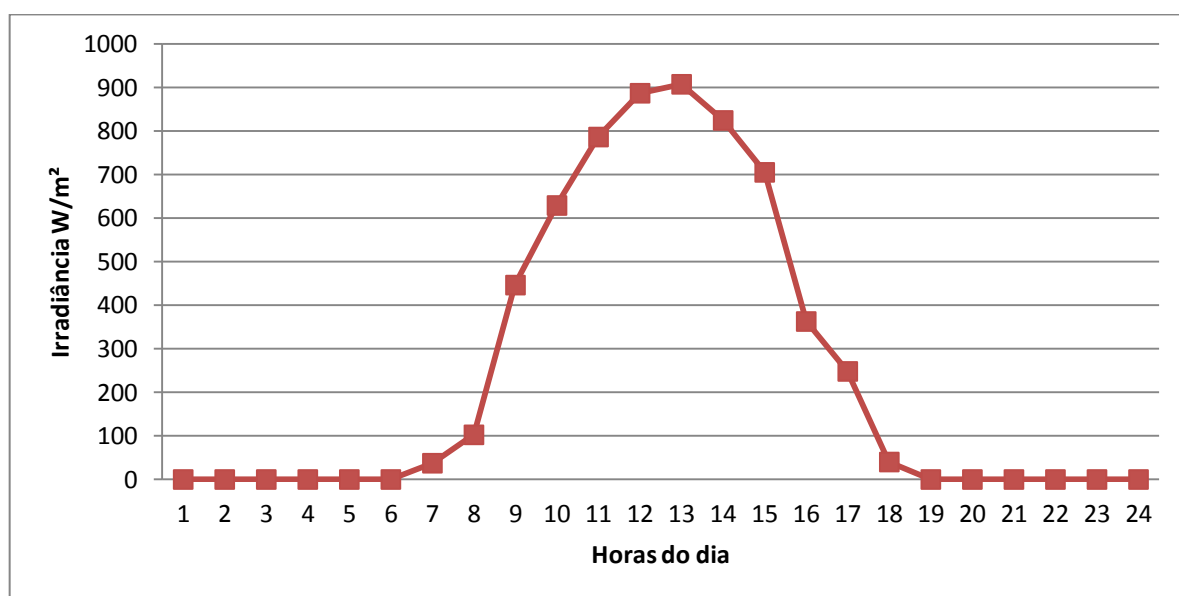


Gráfico 3.3 - Índice de insolação do dia 03/10/2013
Elaboração: Piccini (2013).

Por meio desses valores de medição se estima a quantidade de energia elétrica produzida em um sistema solar fotovoltaico para determinada localidade sempre levando em consideração os valores de temperatura (que influenciam diretamente o rendimento de tal sistema).

3.4 Característica de uma Residência

Para essa pesquisa, tomando como referência a localidade em questão, foi caracterizada uma residência que serviu de base para se estipular a potência instalada e consumida, e para a qual seria simulado o sistema solar fotovoltaico conectado a rede elétrica. A mesma característica pré-definida foi usada para as simulações das demais residências da quadra em questão, uma vez que essas apresentam com padrões homogêneos.

Para as unidades consumidoras (UC) residenciais foi adotado como consumo médio o valor de 230 kWh mês com conexão a rede monofásica cujo valor pago de conta da energia (incluindo todos os impostos) é de aproximadamente R\$140,30. Esse padrão é o encontrado no maior número de residências dessa quadra segundo dados cadastrados na CELTINS.

Com esses dados foram alimentados à ferramenta chamada Simulador Solar desenvolvido através de parceria entre o Instituto Ideal e a Cooperação Alemã, por meio da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)* [37] [38]. O Simulador Solar está programado para simular geradores, dentro do limite estabelecido pela resolução normativa 482/2012 da ANEEL, para que possam ser conectados à rede de distribuição e participar do sistema de compensação de energia. Também, está programado para simular geradores para consumidores do Grupo B (Baixa Tensão) que, segundo a resolução 482/2012 da ANEEL, devem pagar, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade [38].

Com base nos dados de consumo elétrico da unidade consumidora (residência), durante o período de doze meses e com os dados de radiação solar (que estão na base de dados do simulador) obteve-se para o local selecionado um sistema fotovoltaico (gerador de eletricidade solar) com cerca de 1,5 kWp (quilowatts pico) de potência instalada², sendo esse o valor que atenderia a necessidade energética residencial.

O sistema proposto geraria em média 2.024 kWh por ano. Essa geração, segundo o Protocolo de Quioto, evitaria a emissão de 592 kg de dióxido de carbono (CO₂) por ano [38] [15]. Sendo esse um valor aproximado, ele foi calculado para abastecer 100% da demanda elétrica de uma unidade consumidora descontando um

² Valor sugerido pelo programa para o perfil de uma unidade consumidora acima mencionada.

consumo mínimo da rede elétrica que corresponde ao custo de disponibilidade. Vale lembrar que, dependendo do tipo de conexão a rede, tal custo varia. No caso em questão, como a conexão à rede é monofásica, o custo de disponibilidade é um valor em reais que equivale a 30 kWh, ou seja, mesmo que não seja utilizada energia da rede, a concessionária cumpriu com a obrigação de oferecer a infraestrutura necessária para disponibilizar energia elétrica para a unidade consumidora sendo assim justificada a cobrança [38].

Para a simulação em questão considerou-se que os módulos fotovoltaicos instalados estarão voltados para o Norte e com uma inclinação ótima, que equivale neste caso a 11° e a qual corresponde à latitude da localização escolhida, determinado pelo simulador solar. Para calcular a inclinação deve-se saber qual a latitude da cidade, com essa informação é possível determinar a inclinação, sendo que $\text{Inclinação} = \text{latitude} + (\text{latitude}/3)$.

Contudo, deve-se lembrar que tal simulação não considera as condições da vizinhança do local tais como edificações ou árvores próximas (que pode provocar sombreamentos nos módulos) [38].

As Tabelas 3.5 e 3.6 apresenta-se um resumo dos valores gerados pelo Simulador Solar.

Tabela 3.5 – Resumo do SFCR

Sistema Fotovoltaico	
Capacidade do seu sistema (Potência)	1,5 kWp
Área ocupada pelo seu sistema*	de 10 a 13 m ²
Inclinação aproximada dos módulos	11°
Radiação sobre os módulos	21.383 kWh
Rendimento anual	1.350 kWh/kWp
Emissões de CO ₂ evitadas	592 kg/a
<i>*Considerando a utilização de módulos de silício policristalino</i>	

Fonte: [38]

Tabela 3.6 - Resumo do consumo elétrico anual considerando a geração fotovoltaica

Consumo elétrico anual	
Consumo Total	2.760 kWh
Seu consumo da rede elétrica	736 kWh
Sua geração fotovoltaica	2.024 kWh

Fonte: [38]

Diante de tais informações foi possível calcular a tarifa de energia elétrica da residência em questão (incluindo impostos e observando o Convênio ICMS 6/2013 no qual estabelece que a CELTINS ainda não irá cobrar ICMS pela energia elétrica gerada por SFCR). Assim, considerando o consumo elétrico anual da residência, o consumo total de energia elétrica geraria um valor aproximado de R\$ 1.650,00. Já, sua geração de energia por meio do SFCR traria uma economia anual de aproximadamente R\$ 1.200,00 no total de sua fatura de energia elétrica, sobrando apenas a diferença de R\$ 450,00 a ser paga para a concessionária local, sem computar o pagamento da taxa de disponibilidade de utilização da rede.

3.5 Característica do Sistema Solar Fotovoltaico Conectado a Rede Elétrica para a cidade de Palmas - Tocantins

Após a caracterização de uma residência que serviu como base para a simulação dos dados foi possível passar para a etapa de especificação do SFCR. Nessa simulação foi identificada a potência do SFCR necessária para atender a demanda da residência em questão.

Para essa pesquisa, primeiro estipulou-se que a escolha dos equipamentos deveria apresentar características mais próximas daquelas encontradas no Simulador Solar, além da disponibilidade no mercado e com recurso tecnológico atual mais usual.

Assim, foram definidas as características nominais do sistema fotovoltaico conectado a rede elétrica de baixa tensão (*Grid-Tie*), sendo elas: sete placas solares conectadas em série, de potência de 235 W e tensão de 30,5 Vcc por placa, totalizando 1.645 W e 213,5 Vcc, para a condição de máxima potência, tendo 1.000 W/m² de nível de insolação e a 25 °C de temperatura.

Tal sistema é conectado ao secundário de uma rede de distribuição. As placas solares utilizadas são do tipo JT235PCe de silício policristalino, de fabricação da empresa Jetion Solar cujas características elétricas são mostradas na Tabela 3.7 [39].

O inversor é do tipo *Grid-Tie SMA Sunny Boy 1700*, de fabricação da empresa SMA cujas características elétricas são mostradas na Tabela 3.8 [40].

Tabela 3.7 - Características elétricas da placa solar

Desempenho elétrico nas condições padrões de irradiância de 1.000 W/m², AM=1,5 e temperatura da célula de 25 °C (STC)	
Potência Máxima: $P_{\text{máx}}$ (W)	235 W (0/+5%)
Tensão de Potência Máxima: V_{mpp} (V)	30,5 V
Corrente de Potência Máxima: I_{mpp} (A)	7,71 A
Tensão de Circuito Aberto: V_{OC} (V)	37 V
Corrente de Curto Circuito: I_{CC} (A)	8,4 A
Tensão Máxima (V)	1000 V
Coeficiente de Temperatura de V_{OC}	- 0,4049 %/°C
Coeficiente de Temperatura de I_{CC}	0,0825 %/°C
Desempenho elétrico a 800 W/m², NOCT 20 °C, AM=1,5, Velocidade do Vento 1 m/s	
Potência Máxima: $P_{\text{máx}}$ (W)	172 W
Tensão de Potência Máxima: V_{mpp} (V)	27,7 V
Corrente de Potência Máxima: I_{mpp} (A)	6,2 A
Tensão de Circuito Aberto: V_{OC} (V)	33,9 V
Corrente de Curto Circuito: I_{CC} (A)	6,8 A

Fonte: [39]

Tabela 3.8 - Características elétricas do Inversor

Condições Elétricas para Entrada	
Potência Máxima: $P_{\text{máx}}$ (W)	1850 W
Tensão Máxima: $V_{\text{máx}}$ (V)	400 V_{CC}
Faixa de Voltagem do MPP: V_{mpp} (V)	147 V_{CC} a 320 V_{CC}
Tensão mínima: V_{min} (V)	139 V
Tensão para inicialização: (V)	180 V
Corrente máxima: $I_{\text{máx}}$ (A)	12,6 A
Condições Elétricas de Saída	
Potência Nominal: P (W)	1550 W(*)
Tensão de saída (faixa): V (V_{ac})	180 V_{ca} a 265 V_{ca}
Corrente Máxima: $I_{\text{máx}}$ (A)	8,6 A
Frequência: (Hz)	60 Hz
Eficiência Máxima:	93,5%
Consumo interno (noite):	<0,1W

(*) especificação comercial mais próxima do sugerido pelo simulador

Fonte: [40]

3.5.1 Características do SFCR e da rede elétrica do estudo de caso específico

Inicialmente, para as simulações foram utilizados alguns conceitos teóricos já apresentados anteriormente, tais como: desempenho e produção de energia dos módulos solares fotovoltaicos, condições de temperatura e índice de irradiância diária da região onde será utilizado o sistema. Outros fatores necessários a essa simulação foram formalizados e apresentados na sequência, sendo esses: temperatura da célula solar, potência máxima do SFCR considerando temperatura ambiente, temperatura da célula solar, irradiância para o dia em análise, número de painéis e o rendimento do inversor.

3.5.1.1 Características do SFCR utilizado

Conforme apresentado anteriormente, mesmo quando o sol brilhar com a intensidade especificada, a temperatura da célula fotovoltaica será sempre superior a 25 °C. Essa temperatura da célula é determinada pelo nível de irradiância, a temperatura ambiente e a velocidade do vento [22]. Observando a Figura 3.7 é possível identificar que, com o aumento da temperatura, a potência máxima da célula sofre um decréscimo considerável.

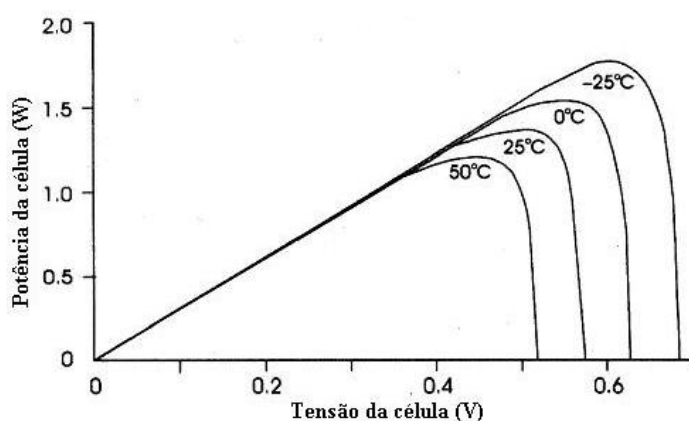


Figura 3.7 - Dependência da característica potência x tensão com a temperatura
Fonte: [26], p. 46, Modificada

Deve-se registrar que a célula solar fotovoltaica quando sofre a incidência de radiação solar, apenas uma pequena parcela é convertida em energia elétrica, ou

seja, menos que 20% [26]. A outra parte é convertida em calor resultando no aquecimento da célula solar fotovoltaica. Isso resulta em uma temperatura de operação acima da temperatura ambiente.

A temperatura da célula solar fotovoltaica é calculada através da Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT). O NOCT é a temperatura que a célula irá alcançar quando estiver funcionando em circuito aberto e em temperatura ambiente de 20°C, AM 1,5, com condições de radiação com 0,8 kW/m² e com uma velocidade do vento menor que 1 m/s (Tabela 3.7). A Equação 3.2 estima com boa precisão a aproximação linear da temperatura da célula (°C) [26].

$$T_c = T_A + \left(\frac{NOCT-20}{0,8} \right) \times G \quad (3.2)$$

Onde:

T_c = Temperatura da célula em graus Celsius;

T_A = Temperatura ambiente em graus Celsius;

G = Irradiância em Watts/m².

Devido a essa característica, a potência máxima de saída do SFCR pode ser determinada pela Equação (3.3) [10].

$$P_{m\acute{a}x} = N \times \left(\frac{G_a}{1000} \right) \times [P_{m\acute{a}x0} + \mu_{P_{m\acute{a}x0}} \times (T_c - 25)] \times \eta \quad (3.3)$$

Em que:

- N = Número de módulos fotovoltaicos;
- G_a = Radiância (W/m²);
- $P_{M\acute{a}x,0}$ = Potência máxima do módulos sob condições padronizadas;
- $\mu_{P_{m\acute{a}x}}$ = Coeficiente de variação da potência do módulo com a temperatura (W/°C);
- T_c = Temperatura da Célula (°C).
- η = máxima eficiência do inversor.

Com essas equações e os dados apresentados anteriormente é possível determinar, com uma boa aproximação, qual será a real potência injetada pelo sistema na rede de distribuição da concessionária.

Assim, observa-se na Tabela 3.4 que em nenhum horário do dia chegou-se a máxima potência de radiação. Observa-se também, que a temperatura ambiente estava bem alta. Deste modo a potência máxima do SFCR não chega a capacidade máxima de fornecimento do sistema como apresentado na Tabela 3.8.

3.6 Características da rede elétrica

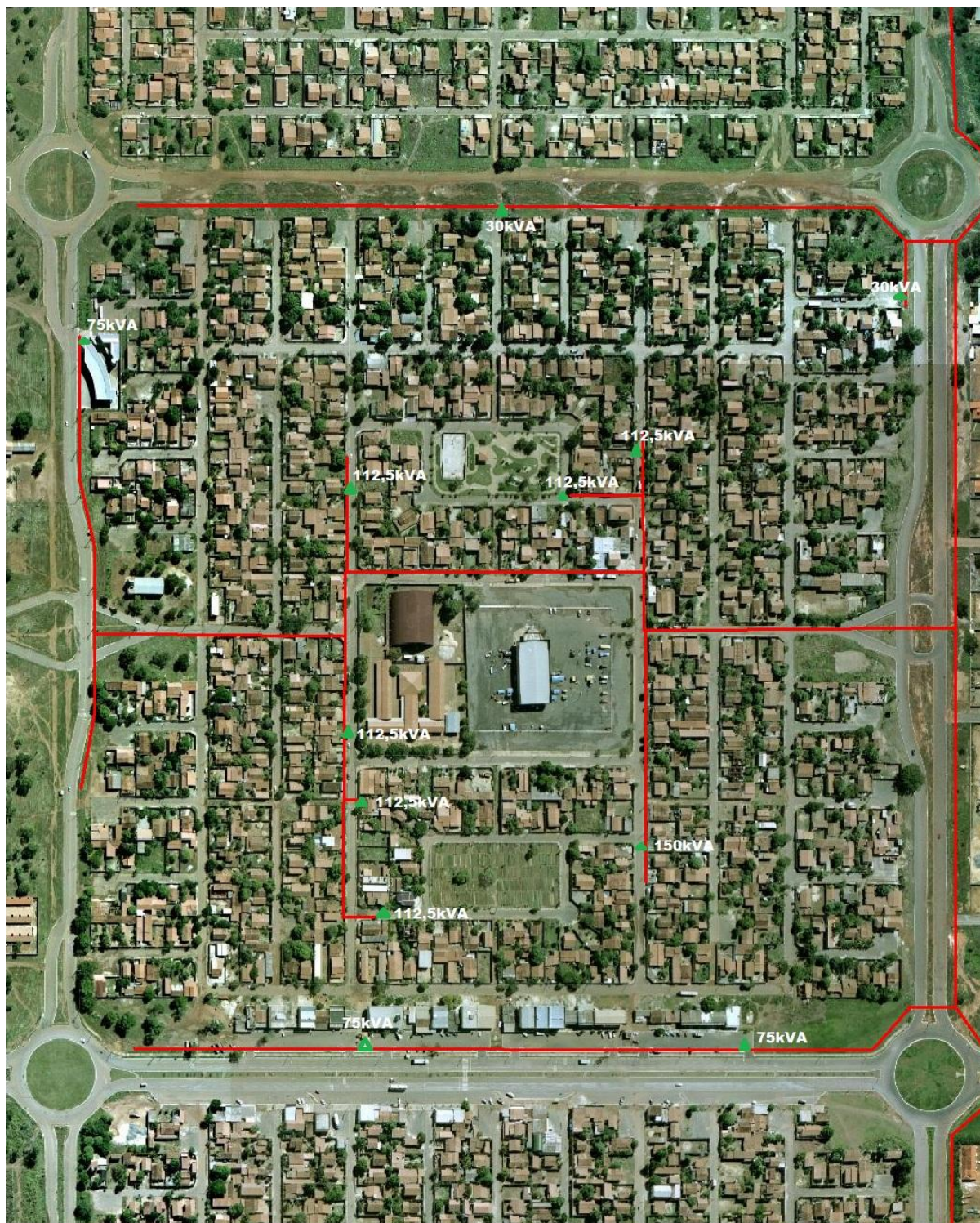
Os sistemas fotovoltaicos foram inseridos na área residencial em questão (quadra 1106 Sul) como mostra a foto aérea retirada do *Google Earth* (Figura 3.8).

Essas residências são alimentadas por transformador de distribuição trifásico delta-estrela com potências de 75 kVA, 112,5 kVA e 150 kVA, 13.800V/380-220V como mostra o mapa fornecido pela equipe de planejamento de sistemas da concessionária de energia local (Figura 3.8).

Na figura citada acima é apresentada apenas a rede de distribuição primária de 13.800 V que alimenta os transformadores sendo omitida a rede de distribuição secundária de 380/220 V que alimenta as residências. Esses transformadores fazem parte de um conjunto de transformadores conectados ao alimentador 2 da quadra 1106 Sul, o qual é interligado à subestação local Palmas III. O diagrama unifilar referente ao local em questão será apresentado junto com a discussão que seguirá no próximo capítulo.

Os dados da rede e medições, os quais estão sendo utilizados para modelagem e simulações, foram fornecidos pela concessionária de energia elétrica local, extraídas dos *softwares Eletricalc* e *UE Viewer da Elucid Solutions S/A* sendo esses *softwares* propriedades da CELTINS.

Por fim, com base nos dados apresentados nos capítulos anteriores, a próxima discussão mostrará as análises das simulações e os resultados obtidos no estudo de caso específico eleito para esta pesquisa.



Prefeitura Municipal de Palmas
Secretaria Municipal de Desenvolvimento
Urbano e Habitação

ARSE 112 (1106S)



Data:
 Fevereiro/2005

Escala:
 Sem Escala

Figura 3.8 - Foto aérea [34], adaptada pela CELTINS, com o traçado da rede de alimentação da Quadra 1106 Sul suprida pelo alimentador 2.
 Fonte: [34]. Modificada

Capítulo IV

SIMULAÇÕES DE CASOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas com o MatLab/PSAT acompanhada de comentários acerca do comportamento do sistema elétrico.

Inicialmente comenta-se sobre o programa utilizado - PSAT, depois modela-se o sistema e roda-se o fluxo de potência até constatar que os resultados obtidos estão em conformidade com os dados fornecidos da rede. Após isto, prossegue-se para as análises de cada um dos casos apresentados.

4.1 Ferramenta PSAT

O *Power System Analysis Toolbox* - PSAT é uma ferramenta computacional do MATLAB para a análise (estática e dinâmica) e controle de sistemas elétricos de potência. Possibilita ao usuário o estudo de fluxo de potência, fluxo de potência continuado, fluxo de potência ótimo, análise de estabilidade de pequenos sinais e simulação no domínio do tempo de sistemas elétricos. Todas essas operações podem ser avaliadas por meio de interfaces gráficas (GUIs – *Graphical User Interfaces*) sendo que uma biblioteca do Simulink fornece ao usuário uma ferramenta para desenvolvimento de projetos [41] [42]. O núcleo do PSAT é a rotina de fluxo de potência, o qual também cuida da inicialização de variáveis de estado.

Para realização de análises com precisão, nos casos de solução de fluxo de potência, o PSAT fornece uma variedade de modelos de componentes elétricos, tanto estáticos como dinâmicos, como se segue:

- ✓ Dados de Fluxo de Potência: barramentos, linhas de transmissão e transformadores, barras de folga, geradores PV e PQ, cargas de potência constante e admitâncias em paralelo (*shunt*).

- ✓ Dados de CPF e OPF: Limites e ofertas de suprimento de potência, reservas de potência de gerador, dados de rampa de gerador, limites e ofertas de demanda de potência.
- ✓ Operações de chaveamentos: Faltas e disjuntores em linhas de transmissão.
- ✓ Medições: Frequência de barramento e unidades de medição de fasor.
- ✓ Cargas: Cargas dependentes de tensão, cargas dependentes de frequência, cargas ZIP (impedância (Z), corrente (I) e potência (P) constantes), cargas de recuperação exponencial, cargas controladas termostaticamente e cargas mistas ou compostas.

Além das rotinas e modelos matemáticos, o PSAT inclui as ferramentas:

- ✓ Editor de diagrama de rede unifilar (Biblioteca do Simulink);
- ✓ GUIs para ajustes de sistema e parâmetros de rotina;
- ✓ Construção e instalação de modelo definido pelo usuário;
- ✓ GUI para plotagem de resultados;
- ✓ Filtros para conversão de dados para/de outros formatos;
- ✓ Registros de comando.

Finalmente, o PSAT inclui caminhos para programas GAMS e UWPFLOW, os quais aumentam a habilidade do PSAT em executar análises de fluxo de potência otimizado e continuado. A Figura 4.1 descreve sua estrutura.

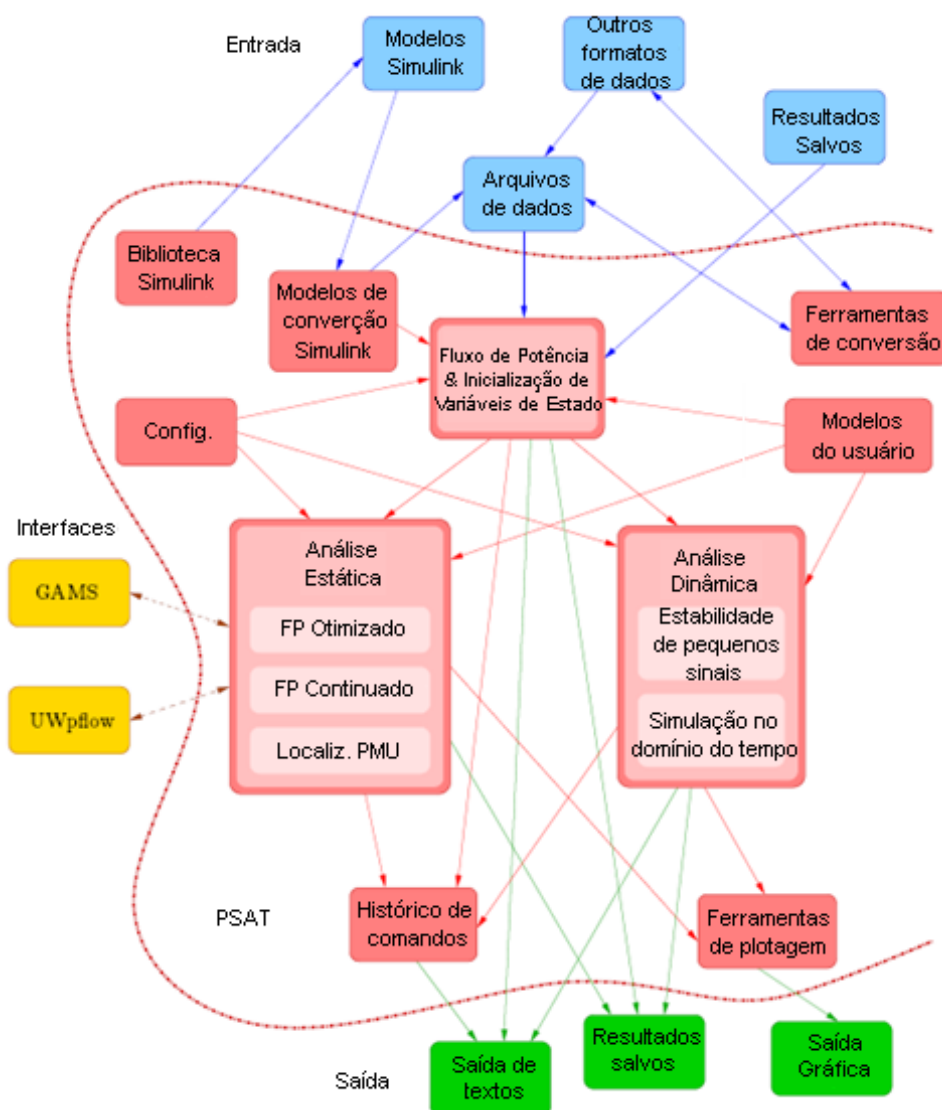


Figura 4.1 - Estrutura do PSAT por diagrama de blocos
Fonte: [42] p 4.

A Tabela 4.1 descreve uma comparação entre outros pacotes de *software* baseados em plataforma MatLab atualmente disponíveis para análise de sistemas elétricos [41] [42]. Esses são: *Education Simulation Tool (EST)*, *MATPOWER*, *Power Analysis Toolbox (PAT)*, *Power System Analysis Toolbox (PSAT)*, *Power System Toolbox (PST)* e *Voltage Stability Toolbox (VST)*.

Tabela 4.1 - Comparação entre os pacotes de software baseados em plataforma MatLab

Pacote	PF	CPF	OPF	SSSA	TDS	GUI	CAD
EST	✓			✓	✓		✓
Matpower	✓		✓				
PAT	✓			✓	✓		✓
PSAT	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PST	✓	✓		✓	✓		
VST	✓	✓		✓	✓	✓	

Fonte: [42] p 5. Modificada

As características apresentadas na tabela anterior fazem referências ao fluxo de potência padrão (*PF*), fluxo de potência continuado (*CPF*), fluxo de potência otimizado (*OPF*), análise de estabilidade de pequenos sinais (*SSSA*) e simulação no domínio do tempo (*TDS*), interface gráfica de usuário (*Graphical User Interface – GUI*) e construção gráfica de rede (*Computer-Aided Design – CAD*) [42].

4.2 Modelo da Rede de Distribuição Primária da Quadra 1106 Sul

O modelo da rede de distribuição primária foi inserido no programa conforme o que se encontra instalado no local de estudo e mostrado na Figura 3.8. Neste modelo apresenta-se uma topologia radial, ou seja, uma rede que a partir de um ponto de alimentação é constituída por linhas que vão se ramificando sem se encontrarem num ponto comum. Essa solução é tipicamente utilizada na rede de distribuição e se não existir produção a elas ligada, o sentido do fluxo de energia é do ponto de alimentação para a carga.

O modelo da rede simulada foi baseado nas características da rede elétrica da cidade de Palmas - Tocantins, Subestação Palmas III, alimentador II, da quadra 1106 Sul e de seus postos de alimentação aos consumidores (Figura 4.2). Os dados da rede aérea de distribuição, interligações, transformadores e cargas foram fornecidos pela CELTINS e estão detalhados em tabelas a seguir. A base do sistema para os cálculos é de 10MVA para potência aparente e de 13,8kV para tensão.

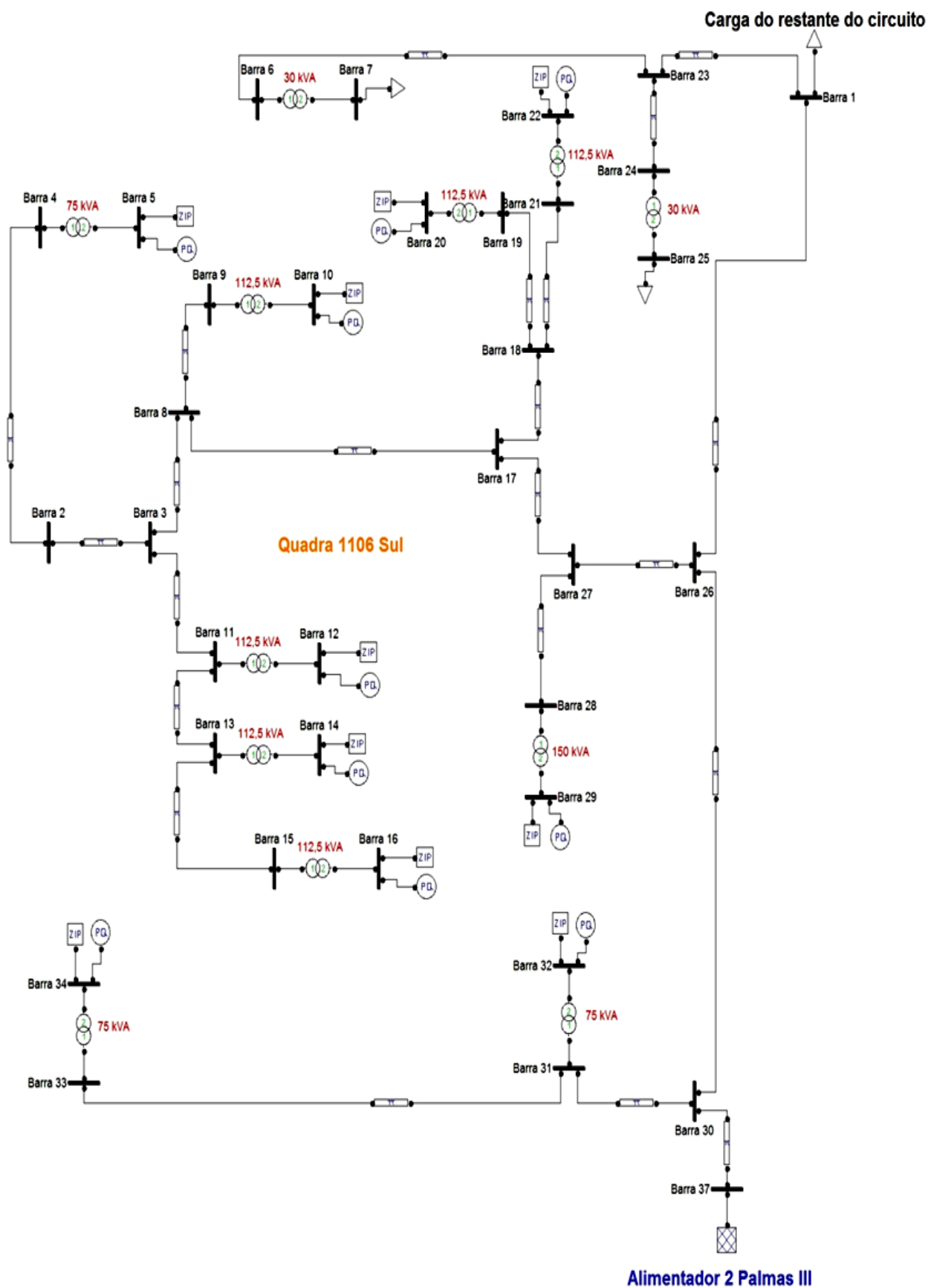


Figura 4.2 - Diagrama unifilar modelado no programa PSAT
Elaboração: Piccini (2013)

A Tabela 4.2 apresenta os dados dos transformadores, a potência, as tensões de entrada e saída, sendo, todos esses dados informados pela CELTINS. As resistência e reatância internas de cada equipamento estão apresentadas em p.u. e foram calculadas utilizando os conceitos de Mamede [43].

Tabela 4.2 - Dados dos Transformadores

Barra	Barra	Potência kVA	Relação tensão Prim./Secun. kV	Resistência p.u.	Reatância p.u.
4	5	75	13,8/0,38	0,0160	0,0311
6	7	30	13,8/0,38	0,0190	0,0294
9	10	112,5	13,8/0,38	0,0147	0,0318
11	12	112,5	13,8/0,38	0,0147	0,0318
13	14	112,5	13,8/0,38	0,0147	0,0318
15	16	112,5	13,8/0,38	0,0147	0,0318
19	20	112,5	13,8/0,38	0,0147	0,0318
21	22	112,5	13,8/0,38	0,0147	0,0318
24	25	30	13,8/0,38	0,0190	0,0294
28	29	150	13,8/0,38	0,0137	0,0322
31	32	75	13,8/0,38	0,0160	0,0311
33	34	75	13,8/0,38	0,0160	0,0311

Fonte: CELTINS

A Tabela 4.3 apresenta o número de unidades consumidoras ligadas ao secundário de cada um dos transformadores e informações fornecidas pelo cadastro de consumidores ligados a rede da CELTINS, as quais serão somadas suas cargas e representaram uma potência dissipada, ou seja, consumida da rede naqueles pontos. A carga total de cada um dos transformadores será apresentada mais a frente trazendo as informações de hora em hora durante um dia inteiro.

Tabela 4.3 - Numero de UC ligadas aos secundários dos transformadores

Barra conectada	Tensão kV	Numero de consumidores ligados ao sistema
5	0,38	13
7	0,38	0
10	0,38	280
12	0,38	1
14	0,38	251
16	0,38	122
20	0,38	171
22	0,38	309
25	0,38	0
29	0,38	265
32	0,38	4
34	0,38	11
Total		1427

Fonte: CELTINS

A Tabela 4.4 traz as informações dos modelos dos cabos que estão sendo utilizados na rede para interligação entre o primário dos transformadores e a subestação (modelo de ligação de topologia radial), além do comprimento das linhas, que foram fornecidos pela CELTINS. Os dados de resistência e reatância em p.u. foram calculados observando as características construtivas do fabricante [44] [43].

Tabela 4.4 - Dados de Linhas de Interligação

Modelo do Cabo AWG/ MCM	Barra Saída	Barra Chegada	Comprimento km	Resistência pu	Reatância pu
2	2	3	0,201	0,010166	0,003610
2/0	2	4	0,237	0,005962	0,003926
2/0	6	23	0,319	0,008025	0,005285
2	23	24	0,075	0,003793	0,001347
2	3	8	0,046	0,002327	0,000826
2	8	9	0,063	0,003186	0,001131
2	17	8	0,237	0,011987	0,004256
2	3	11	0,078	0,003945	0,001401
2	11	13	0,064	0,003237	0,001149
2	13	15	0,16	0,008092	0,002873
2/0	30	31	0,158	0,003975	0,002618
2/0	31	33	0,285	0,007170	0,004722
2/0	37	30	0,05	0,001258	0,000828
2/0	30	26	0,175	0,004403	0,002899
2	26	27	0,246	0,012442	0,004418
2	27	28	0,134	0,006777	0,002406
2	27	17	0,096	0,004855	0,001724
2	17	18	0,085	0,004299	0,001526
2	18	19	0,122	0,006170	0,002191
2	18	21	0,055	0,002782	0,000988
2/0	26	1	0,175	0,004403	0,002899
2/0	23	1	0,05	0,001258	0,000828

Fonte: CELTINS

As cargas de cada uma das unidades consumidoras foram fornecidas pela CELTINS em forma de potências ativa e reativa e apresentadas em um valor total para cada um dos transformadores de hora em hora. Durante o dia, conforme o consumo vai se alterando, esses dados foram sendo modificados no modelo e na simulação tendo um perfil do dia e da noite (Tabelas 4.5 e 4.6). Os gráficos do perfil das cargas estão plotados no Anexo I durante as 24 horas de um dia.

Tabela 4.5 - Potência Ativa em p.u. das cargas de cada um dos transformadores durante 24 horas

	Barra 5	Barra 10	Barra 12	Barra 14	Barra 16	Barra 20	Barra 22	Barra 29	Barra 32	Barra 34	Carga do restante do circuito
00:00:00	0,001930	0,008251	0,000727	0,003072	0,004056	0,004225	0,003881	0,004339	0,001494	0,002769	0,187815
01:00:00	0,001691	0,007229	0,000691	0,002691	0,003691	0,003701	0,003400	0,003801	0,001001	0,001800	0,168662
02:00:00	0,001573	0,006725	0,000643	0,002503	0,003433	0,003442	0,003162	0,003535	0,000931	0,001674	0,156856
03:00:00	0,001632	0,006977	0,000622	0,002597	0,003562	0,003572	0,003281	0,003668	0,000966	0,001737	0,162759
04:00:00	0,001471	0,006293	0,000601	0,002341	0,003211	0,003220	0,002958	0,003307	0,000871	0,001566	0,146736
05:00:00	0,001481	0,006329	0,000605	0,002356	0,003232	0,003240	0,002977	0,003328	0,000876	0,001576	0,147664
06:00:00	0,001428	0,006106	0,000584	0,002273	0,003117	0,003126	0,002872	0,003210	0,000845	0,001520	0,142452
07:00:00	0,001249	0,005674	0,003830	0,001190	0,001971	0,001980	0,002293	0,002243	0,000905	0,001726	0,181918
08:00:00	0,001153	0,005256	0,003887	0,001098	0,001819	0,001827	0,002116	0,002070	0,001447	0,001972	0,207750
09:00:00	0,001243	0,005666	0,004191	0,001184	0,001961	0,001970	0,002281	0,002232	0,001782	0,002126	0,223986
10:00:00	0,001262	0,005753	0,004255	0,001202	0,001991	0,002000	0,002316	0,002266	0,001809	0,002158	0,227397
11:00:00	0,001338	0,006142	0,004170	0,001274	0,001951	0,001960	0,002455	0,002402	0,001773	0,002287	0,241041
12:00:00	0,001446	0,006595	0,004178	0,001377	0,001955	0,001964	0,002654	0,002597	0,001776	0,002473	0,260597
13:00:00	0,001726	0,006826	0,004767	0,001732	0,002297	0,002305	0,002709	0,002672	0,002107	0,002970	0,218917
14:00:00	0,001855	0,007301	0,004816	0,001862	0,002320	0,002329	0,002913	0,002873	0,002129	0,003193	0,235395
15:00:00	0,001865	0,007337	0,004792	0,001871	0,002308	0,002317	0,002928	0,002888	0,002118	0,003209	0,236572
16:00:00	0,001906	0,007502	0,004744	0,001912	0,002285	0,002294	0,002992	0,002951	0,002097	0,003279	0,241751
17:00:00	0,001891	0,007445	0,004696	0,001897	0,002262	0,002271	0,002969	0,002928	0,002076	0,003254	0,239868
18:00:00	0,002115	0,008366	0,004687	0,002123	0,002258	0,002266	0,003321	0,003275	0,002072	0,003640	0,268350
19:00:00	0,002121	0,009007	0,004122	0,003101	0,003084	0,003715	0,003829	0,004655	0,002623	0,004100	0,179612
20:00:00	0,002294	0,009727	0,005152	0,003354	0,003855	0,004643	0,003949	0,004851	0,003279	0,004435	0,183022
21:00:00	0,002164	0,009144	0,005724	0,003164	0,004283	0,005159	0,003989	0,004900	0,003643	0,004184	0,183683
22:00:00	0,002099	0,008892	0,005438	0,003069	0,004197	0,004901	0,003869	0,004851	0,003461	0,004058	0,177898
23:00:00	0,002166	0,009158	0,004351	0,003167	0,004029	0,004411	0,003993	0,004753	0,003115	0,004188	0,181428
00:00:00	0,001991	0,008453	0,000870	0,002911	0,003989	0,004191	0,003909	0,004655	0,002959	0,003849	0,167833

Fonte: CELTINS

Tabela 4.6 Potência Reativa em p.u. das cargas de cada um dos transformadores durante 24 horas

	Barra 5	Barra 10	Barra 12	Barra 14	Barra 16	Barra 20	Barra 22	Barra 29	Barra 32	Barra 34	Carga do restante do circuito
00:00:00	0,000880	0,003578	0,000331	0,001400	0,001848	0,001800	0,001653	0,001977	0,000636	0,001180	0,124002
01:00:00	0,000720	0,003355	0,000294	0,001146	0,001572	0,001686	0,001549	0,001947	0,000456	0,000820	0,111036
02:00:00	0,000762	0,003384	0,000311	0,001212	0,001663	0,001763	0,001347	0,001712	0,000477	0,000858	0,100407
03:00:00	0,000836	0,003629	0,000319	0,001106	0,001725	0,001830	0,001191	0,001879	0,000495	0,000890	0,100812
04:00:00	0,000754	0,003355	0,000308	0,000925	0,001463	0,001738	0,001074	0,001694	0,000470	0,000845	0,087526
05:00:00	0,000799	0,003470	0,000327	0,000931	0,001472	0,001749	0,001268	0,001516	0,000473	0,000851	0,084717
06:00:00	0,000771	0,003290	0,000315	0,001036	0,001683	0,001687	0,001391	0,001269	0,000456	0,000821	0,077702
07:00:00	0,000674	0,002952	0,002067	0,000642	0,001064	0,001014	0,001175	0,001211	0,000463	0,000884	0,107944
08:00:00	0,000591	0,002786	0,001992	0,000563	0,000932	0,000986	0,001142	0,001061	0,000781	0,001064	0,134193
09:00:00	0,000671	0,003118	0,002262	0,000639	0,001059	0,001063	0,001231	0,001205	0,000962	0,001147	0,150520
10:00:00	0,000611	0,003413	0,002061	0,000582	0,000964	0,001187	0,001374	0,001097	0,001073	0,001280	0,160180
11:00:00	0,000685	0,003319	0,002136	0,000653	0,001000	0,001058	0,001325	0,001230	0,000957	0,001235	0,168248
12:00:00	0,000780	0,003780	0,002255	0,000743	0,001055	0,001113	0,001504	0,001401	0,001007	0,001402	0,168329
13:00:00	0,000978	0,003622	0,002702	0,000981	0,001302	0,001244	0,001462	0,001514	0,001137	0,001603	0,135673
14:00:00	0,001101	0,004140	0,002857	0,001105	0,001376	0,001320	0,001651	0,001705	0,001206	0,001810	0,139675
15:00:00	0,001057	0,003982	0,002715	0,001061	0,001308	0,001251	0,001580	0,001636	0,001143	0,001732	0,146614
16:00:00	0,001029	0,004061	0,002560	0,001032	0,001233	0,001238	0,001615	0,001593	0,001132	0,001770	0,143446
17:00:00	0,000969	0,004075	0,002406	0,000972	0,001159	0,001226	0,001602	0,001500	0,001120	0,001756	0,161192
18:00:00	0,001024	0,003874	0,002270	0,001028	0,001093	0,001033	0,001513	0,001586	0,000944	0,001659	0,173337
19:00:00	0,000966	0,003931	0,001878	0,001413	0,001405	0,001582	0,001631	0,002121	0,001117	0,001747	0,104703
20:00:00	0,000977	0,003859	0,002195	0,001429	0,001642	0,001835	0,001561	0,002067	0,001296	0,001753	0,106043
21:00:00	0,000855	0,003643	0,002262	0,001251	0,001693	0,002039	0,001576	0,002373	0,001440	0,001653	0,114851
22:00:00	0,000830	0,003643	0,002149	0,001213	0,001659	0,001937	0,001529	0,002485	0,001368	0,001604	0,111153
23:00:00	0,000923	0,003557	0,001853	0,001349	0,001716	0,001743	0,001578	0,002302	0,001231	0,001655	0,109549
00:00:00	0,000907	0,003744	0,000396	0,001326	0,001817	0,001909	0,001781	0,002121	0,001348	0,001754	0,110367

Fonte: CELTINS

A Figura 4.2 representa a topologia da rede simulada e modelada no programa MATLAB usando a ferramenta PSAT. Essa ferramenta utiliza o método de solução de fluxo de potência Newton Raphson com tolerância de 1×10^{-5} e número máximo de interações de 20. Os barramentos numerados correspondem às interligações entre linhas, transformadores e cargas. Nas tabelas citadas anteriormente pode-se ler os comprimentos e tipo dos cabos utilizados, a potência do transformador e as potências utilizadas pelos grupos de consumidores ligados ao secundário de cada um dos transformadores que estão modelados no sistema.

No cenário reproduzido já instalado procurou-se obter um sistema equilibrado no que diz respeito à distribuição das cargas por fase. Foram mantidas as potências ativas e reativas totais para cada grupo de unidades consumidoras ligadas aos transformadores, não fazendo distinção entre as cargas lineares e as cargas não-lineares assumindo-se apenas as potências.

Também, foram efetuadas simulações nos níveis de tensões de entrada do sistema respeitando suas variações durante as 24 horas do dia.

4.3 Simulações dos Casos

Após todo o sistema modelado, o primeiro caso a ser simulado é do sistema real, ou seja, sem o SFCR cujo objetivo foi comparar e validar tais dados com os dados reais que a CELTINS forneceu, verificando se tal modelo se encontra ajustado e próximo ao real instalado. Foram inseridos os dados fornecidos pela concessionária e os dados de resistência e reatância dos transformadores e das linhas calculados para preencher os requisitos necessários.

Com isso o primeiro fluxo de potência foi rodado verificando-se como o sistema se comporta e qual a direção do fluxo.

Segundo a concessionária, a data de 03/10/2012 que foi escolhida para realizar todos os ensaios, foi a de maior consumo de energia registrado durante o dia ocorrido naquele ano, sem o sistema de Geração Distribuída. Na primeira simulação verificou-se que o fluxo de carga, tensões e potências estavam de acordo com as informações da CELTINS e semelhantes ao sistema real em quatro horários distintos do dia. Um arquivo para cada hora desse dia com esses dados foram gerados pelo programa utilizando a função *Power Flow*.

Outras informações que se alteram no decorrer do dia são as potências de entrada do sistema, neste caso representados pela barra de referência. Esses dados trazem a informação de geração que está sendo injetada na rede de distribuição através da subestação Palmas III, alimentador 2, sem a presença dos SFCR. Os dados informados pela CELTINS foram as variações de tensão para entrada do sistema. Os dados das potências ativa e reativa foram extraídos após rodar o programa. A potência aparente e fator de potência foram calculados com base nas informações anteriores, conforme mostra a Tabela 4.7 e Gráficos 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.7 - Resultados da entrada da rede após simulação

Palmas III Alimentador 2	P [MW]	Q [MVar]	S [MVA]	FP	Tensão [kV]
00:00:00	2,2341	1,4021	2,6376	0,8470	14,1500
01:00:00	1,9891	1,2530	2,3508	0,8461	14,1200
02:00:00	1,8506	1,1452	2,1763	0,8503	14,1019
03:00:00	1,9199	1,1539	2,2400	0,8571	14,1000
04:00:00	1,7307	1,0070	2,0023	0,8644	14,1050
05:00:00	1,7416	0,9812	1,9990	0,8712	14,0990
06:00:00	1,6799	0,9093	1,9102	0,8794	14,0870
07:00:00	2,0561	1,2068	2,3841	0,8624	14,0550
08:00:00	2,3119	1,4678	2,7384	0,8442	14,0320
09:00:00	2,4957	1,6470	2,9902	0,8346	14,0110
10:00:00	2,5341	1,7470	3,0779	0,8233	13,9900
11:00:00	2,6792	1,8281	3,2434	0,8260	13,8900
12:00:00	2,8889	1,8447	3,4276	0,8428	13,7900
13:00:00	2,5004	1,5320	2,9324	0,8527	13,7100
14:00:00	2,6815	1,5907	3,1178	0,8601	13,6300
15:00:00	2,6938	1,6520	3,1600	0,8525	13,6950
16:00:00	2,7489	1,6184	3,1900	0,8617	13,7600
17:00:00	2,7277	1,7911	3,2632	0,8359	13,8250
18:00:00	3,0391	1,9068	3,5877	0,8471	13,8900
19:00:00	2,2085	1,2355	2,5306	0,8727	13,9550
20:00:00	2,2955	1,2588	2,6179	0,8768	14,0200
21:00:00	2,3104	1,3487	2,6753	0,8636	14,0800
22:00:00	2,2367	1,3072	2,5907	0,8634	14,1099
23:00:00	2,2568	1,2857	2,5973	0,8689	14,1200
00:00:00	2,0640	1,2841	2,4309	0,8491	14,1450

Fonte: CELTINS

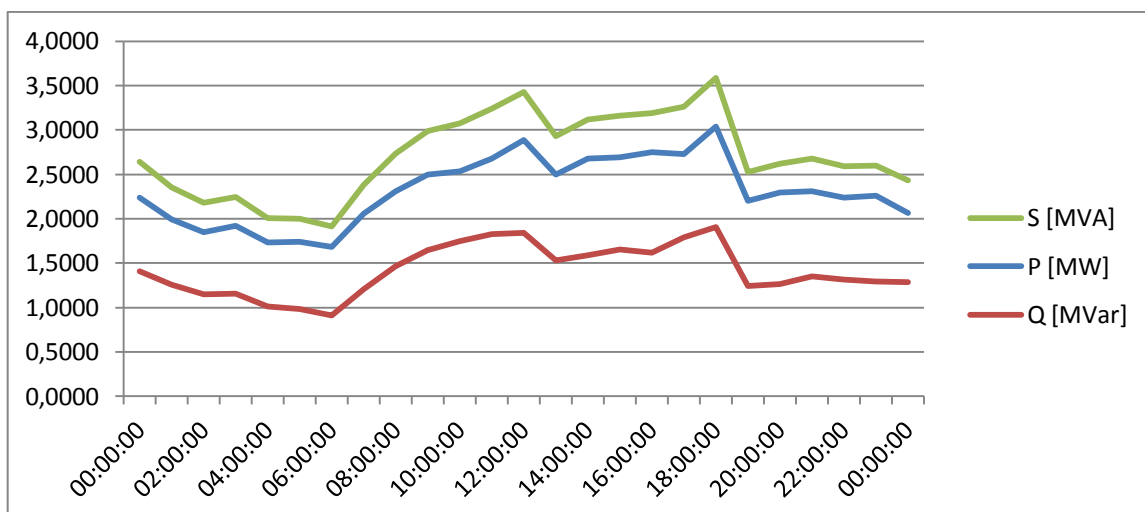


Gráfico 4.1 - Potências de entrada do sistema
Elaboração: Piccini (2013)

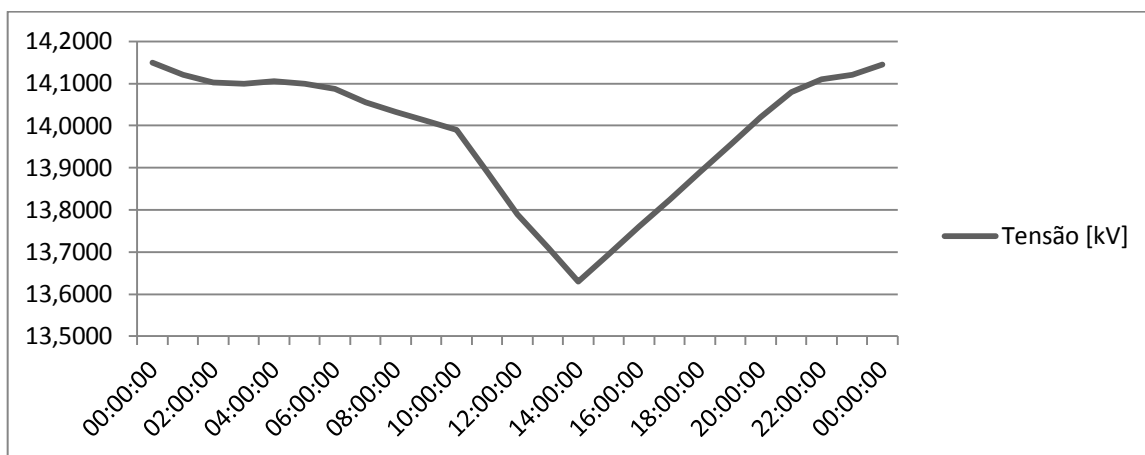


Gráfico 4.2 - Tensão de entrada do sistema
Elaboração: Piccini (2013)

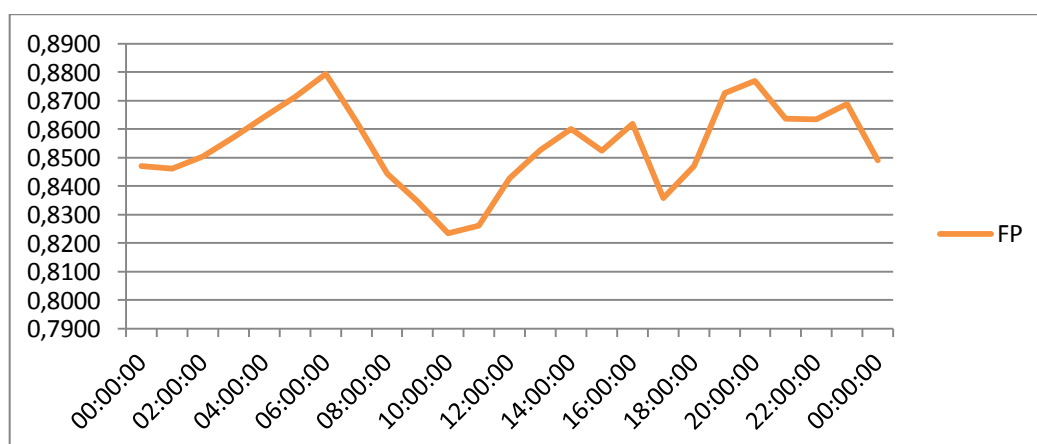


Gráfico 4.3 - Fator de Potência de entrada do sistema
Elaboração: Piccini (2013)

O programa gerou dados que indicaram o sentido do fluxo da potência ativa e reativa e seu comportamento durante as 24 horas do dia.

Conforme o esperado, o sentido do fluxo se deu da barra 37 onde está o alimentador 2 da subestação que alimenta a rede, ou seja, geração, para a barra 30 que se subdividiu em dois. O primeiro foi em sentido à barra 31 e 33, onde alimentou dois transformadores de potência de 75 kVA e 15 unidades consumidoras comerciais. O segundo, em sentido à barra 26, que se subdividiu em dois. Um foi em sentido a barra 1, que alimenta outras quadras e cargas da cidade que foram modeladas como uma carga que representa o restante do circuito conforme descrito nas Tabelas 4.5 e 4.6 e na Figura 4.2.

Na sequência, a barra 26 forneceu energia para toda a quadra residencial através da barra 27 que alimentou a barra 28, com um transformador de potência de 150 kVA com 265 unidades consumidoras ligadas a ele, e também alimentou a barra 17. Por sua vez, a barra 17 forneceu energia a barra 18, com dois transformadores de 112,5 kVA e 480 UC e deixou circular potência para a barra 8, que alimentou um transformador de 112,5 kVA com 280 UC ligadas a ele. Essa barra 8, também conduziu alimentação para a barra 3 que alimentou um transformador de 75 kVA responsável por fornecer energia a um posto de combustível e alguns comércios totalizando 13 UC ligada a esse transformador. A barra 3 alimentou ainda mais três transformadores de 112,5 kVA, um deles responsável por condicionar energia para uma escola estadual e os outros dois por fornecerem energia para 373 UC residenciais.

Os Gráficos 4.4 mostram esse comportamento. Se comparar esses gráficos com os gráficos do Anexo I (potências das cargas) é possível identificar que o fluxo tem um comportamento semelhante ao comportamento das cargas, porém com as potências somadas. O comportamento das cargas, por serem residenciais, durante o dia tem um baixo consumo, pois tem-se poucos equipamentos ligados devido a grande maioria dos consumidores estarem trabalhando fora de casa. Enquanto que à noite e madrugada esse consumo aumenta, pois todos estão em casa e utilizando vários equipamentos.

A tabela com todos os dados dos gráficos abaixo encontra-se no Anexo II.

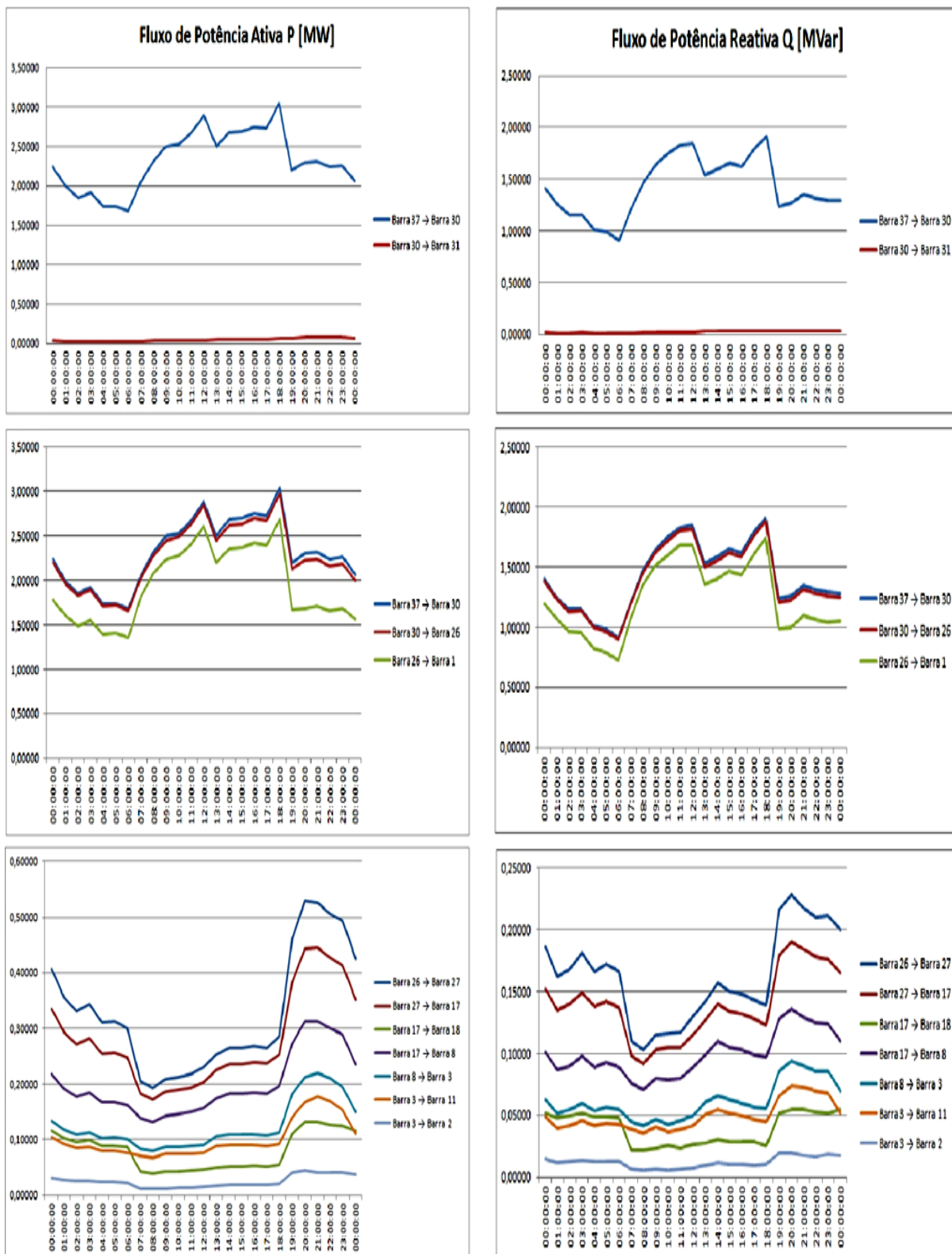


Gráfico 4.4 - Fluxo de Potências Ativa e Reativa sem SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

4.3.1 Simulação com inserção do SFCR

Na sequência será inserido nesse modelo a geração distribuída observando as características e informações apresentadas nos Capítulos II e III.

Para isso, levou-se em consideração a sugestão do Ministério de Minas e Energia publicada em 2009, o Relatório do Grupo de Trabalho de Geração Distribuída em Sistemas Fotovoltaicos, que sugere valores de potência para instalação em larga escala de sistemas distribuídos. Essas sugestões compreendem projetos e instalações de sistemas fotovoltaicos domiciliares conectados à rede elétrica, cada um com potência de até 2,5 kWp (Watts-pico), no mesmo alimentador em áreas urbanas [45]. Seguindo tal sugestão e conforme residência caracterizada no item 3.4 e o SFCR no item 3.5 do Capítulo III, estipulou-se que um SFCR de 1,5kW servirá de base para as análises.

Foram observadas as características das células fotovoltaicas que possuem uma Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT). O NOCT é a temperatura que a célula irá alcançar quando operada em circuito aberto e em condições padrões. Assim, para variações na temperatura ambiente e na radiação, a temperatura da célula (°C) pode ser estimada pela Equação 3.2 do Capítulo III.

Para essa variação de temperatura da célula durante o dia, a potência de saída do SFCR é obtida por meio da Equação 3.3 do Capítulo III.

Os valores da potência instantânea gerada pelos SFCR's são mostrados nos gráficos com um intervalo de uma hora, levando em consideração a temperatura e o índice de irradiação solar nesse momento.

Os dados de temperatura e o índice de irradiação solar foram coletados através do *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [35], para a cidade de Palmas-TO no dia 03/10/2013.

Como critérios de simulação, para conectar esses sistemas à rede de distribuição da concessionária, foram utilizados no sistema geradores PQ com fator de potência unitário, onde foram inseridas as potências ativas de hora em hora conforme as variações de temperatura e radiação sendo zero para as potências reativas.

Foram simuladas duas situações de penetração do sistema de geração distribuída na área residencial. Primeiro foram utilizados sessenta sistemas de

geração distribuídos em sessenta casas, totalizando uma potência máxima dos SFCR de 93.000 Wp, divididos conforme Tabela 4.8. A divisão observou os postos de transformação de potência semelhantes e com o maior número de UC residenciais ligadas a eles. Vale lembrar que no item 3.5 do capítulo III foi especificado um SFCR cujo valor comercial seria de 1550 Wp.

Tabela 4.8 - Distribuição dos SFCR na área residencial

Barra conectado	Número de consumidores ligados ao Posto de transformação	Número de SFCR ligados ao Posto de transformação	Potência Máxima dos SFCR [Wp]
5	13		
10	280	10	15.500
12	1		
14	251	10	15.500
16	122	10	15.500
20	171	10	15.500
22	309	10	15.500
29	265	10	15.500
32	4		
34	11		
Total	1427	60	93.000

Elaboração: Piccini (2013)

O segundo caso respeitou o limite de potência total máximo de geração distribuída interconectada à rede de distribuição de baixa tensão permitindo que a soma das potências nominais dos geradores não excedesse a metade da capacidade do posto de transformação que atende a rede acessada [33]. Por isso, para cada posto de transformação foi inserido SFCR's que equivalem à metade de sua capacidade nominal, conforme Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Potência Máxima dos SFCR respeitando 50% da potência nominal do transformador

Barra conectado	Número de consumidores ligados ao Posto de transformação	Tipo de Unidades Consumidoras	Potência Nominal do Posto de transformação [kVA]	Potência Máxima dos SFCR [kWp]
5	13	Residenciais + Comerciais	75	37,5
10	280	Residenciais	112,5	56,25
12	1	Publica	112,5	56,25
14	251	Residenciais	112,5	56,25
16	122	Residenciais	112,5	56,25
20	171	Residenciais	112,5	56,25
22	309	Residenciais	112,5	56,25
29	265	Residenciais	150	75
32	4	Comerciais	75	37,5
34	11	Comerciais	75	37,5

Elaboração: Piccini (2013)

4.3.2 Resultado das Simulações

As análises das simulações foram divididas em duas situações distintas. Para cada caso foram analisados os comportamentos dos fluxos de potências ativa, reativa e aparente, a variação da tensão nos secundários dos transformadores e o fator de potência.

No primeiro caso, 60 SFCR, cada um com potência de 1,55 kW, foram instalados nas áreas somente residenciais com potências dos postos de transformação semelhantes, divididas de maneira que a porcentagem de penetração do sistema fosse praticamente equivalente, ou seja, 13,77% para cinco transformadores e 10,33% para um dos transformadores.

Os gráficos que mostram o comportamento das potências ativa e reativa da carga estão no Anexo I e a injeção de potência ativa dos SFCR para cada um dos transformadores durante as 24 horas do dia nestes casos estão apresentados no Anexo III.

Nesta seção serão apresentados os gráficos do fluxo de potência ativa e reativa e a variação de tensão no secundário dos transformadores ligados ao sistema.

No Gráfico 4.5 é mostrado o sentido do fluxo de potência ativa, sem e com a inserção dos 60 SFCR a rede de baixa tensão. Nesses gráficos é possível notar o comportamento desse fluxo durante o dia quando se tem a potência sendo injetada na rede pela geração distribuída. Observa-se nesse caso que o fluxo vindo da subestação já existente para a área residencial diminui, pois a geração distribuída passa a atender parte da carga demanda pela região.

Ao se comparar o horário das 13 horas, horário de maior geração de energia pelo SFCR na barra 26 para a 27, que é a entrada da quadra, quando sem a geração distribuída tem-se uma potência de 252,33 kW e com a geração distribuída a potência que circula por essa linha é de 168,02 kW, obtendo uma diminuição de 33,41%. Ou seja, 84,31 kW potência gerada por todos os 60 SFCR ligados ao sistema deixa de ser fornecida pela concessionária. Nas outras linhas de fluxo o valor diminuiu proporcional a soma das potências dos SFCR e estão todos plotados no Anexo VI.

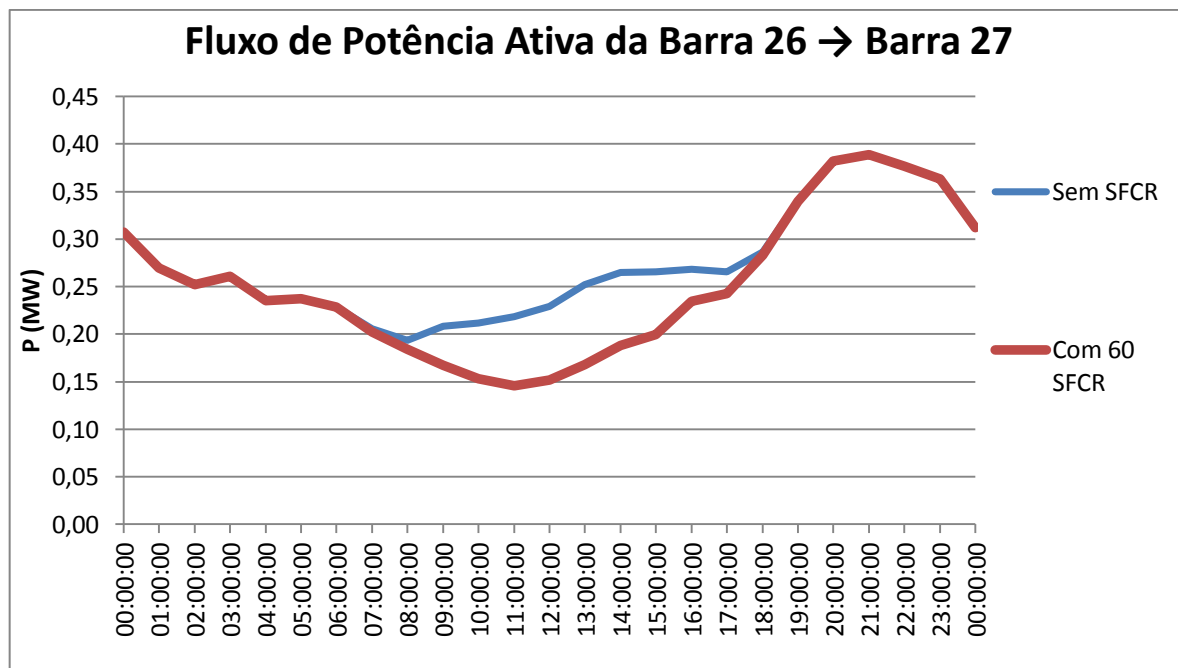


Gráfico 4.5 - Comparação do Fluxo de Potência Ativa sem e com 60 SFCR.
Elaboração: Piccini (2013)

No Gráfico 4.6 é representado o fluxo de potência reativa, sem e com os 60 SFCR. Observa-se que quando se compara o mesmo horário e o mesmo ponto identifica-se que sem a geração distribuída tem-se um consumo de 141,98 kVar, já com os 60 SFCR passa para 140,8 kVar, ou seja, diminuiu 0,83% do consumo e por consequência o fator de potência também diminui, saindo de 87,15 para 76,64, e ficando em uma condição menos favorável.

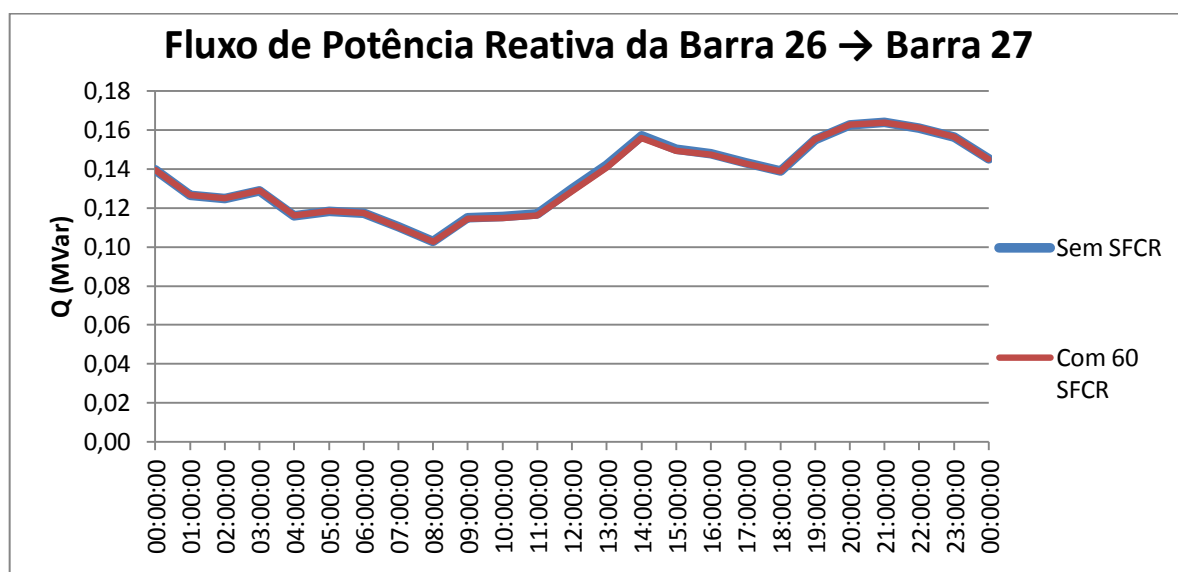


Gráfico 4.6 - Comparação do Fluxo de Potência Reativa sem e com os 60 SFCR.
Elaboração: Piccini (2013)

No Gráfico 4.7 é possível verificar a tensão no secundário do transformador ligado a barra 10 sem e com os 10 SFCR, ligados a esse posto de transformação, que as 14 horas tem seu nível mais baixo. Com a inserção dos 10 SFCR, as tensões tem um pequeno aumento de 365,76V para 366,41V, garantindo o fornecimento de energia elétrica para as cargas com uma tensão mais próxima dos 380 V.

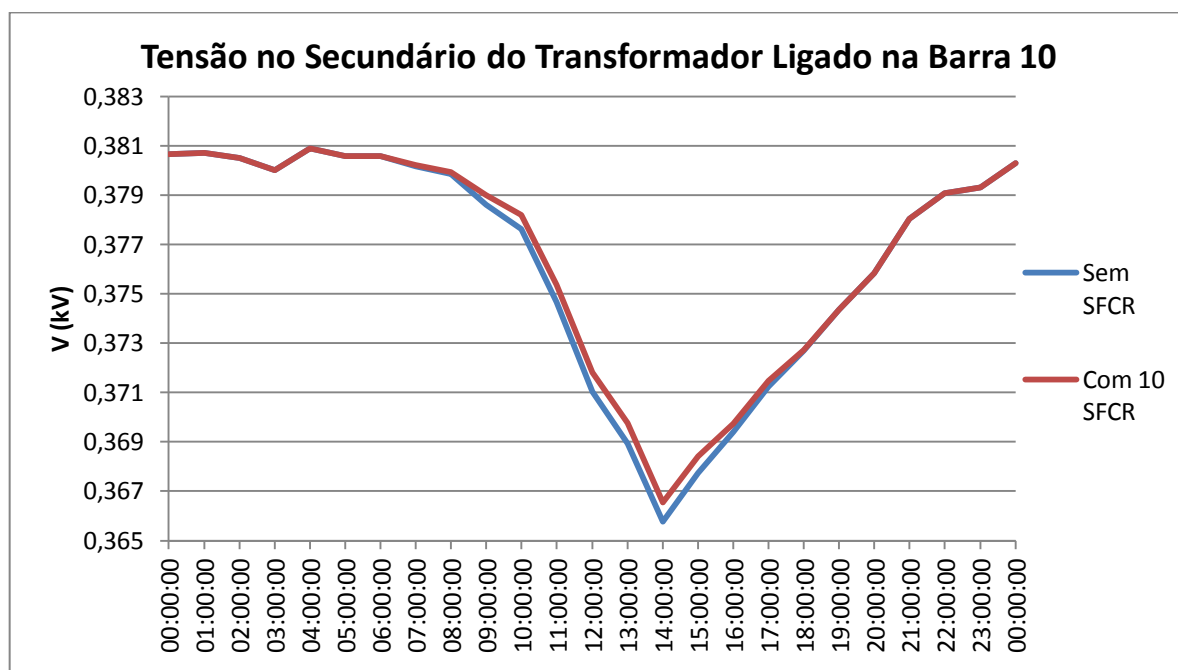


Gráfico 4.7 - Comparação da Tensão no Secundário do Transformador Ligado na Barra 10, sem e com 10 SFCR.

Elaboração: Piccini (2013)

Seguindo com a simulação, no segundo caso foram respeitos os limites de potência total máximo de geração distribuída interconectada a rede de distribuição de baixa tensão, conforme NTD-18 da CELTINS, e apresentada na Tabela 4.9. Os gráficos abaixo apresentam o comportamento do fluxo de potências com a inserção máxima de geração distribuída para todos os transformadores da quadra em análise.

O Gráfico 4.8 representa o fluxo real de potência ativa do sistema hoje instalado, sem SFCR. Este valor, às 12 horas (meio dia), é de aproximadamente 2,889 MW saindo da subestação e percorrendo o alimentador II que está representado pela barra 37 em direção a barra 30, esse alimenta toda a rede simulada nessa pesquisa, onde se divide em duas partes: uma pequena parte

alimenta dois transformadores de 75 kVA e 15 cargas que corresponde a 42,76 kW, observando-se uma pequena diferença entre o fluxo da barra 37 - 30 para a barra 30 – 26.

A outra parte, ao observar-se o fluxo que vai em direção a barra 26, com aproximadamente 2,844 MW, novamente se divide em dois. Uma das partes servirá para alimentar os consumidores da parte interna da quadra (o equivalente a 229,35 kW) enquanto que todo o restante (aproximadamente 2,61 MW) vai em direção a barra 1 para alimentar o restante do circuito.

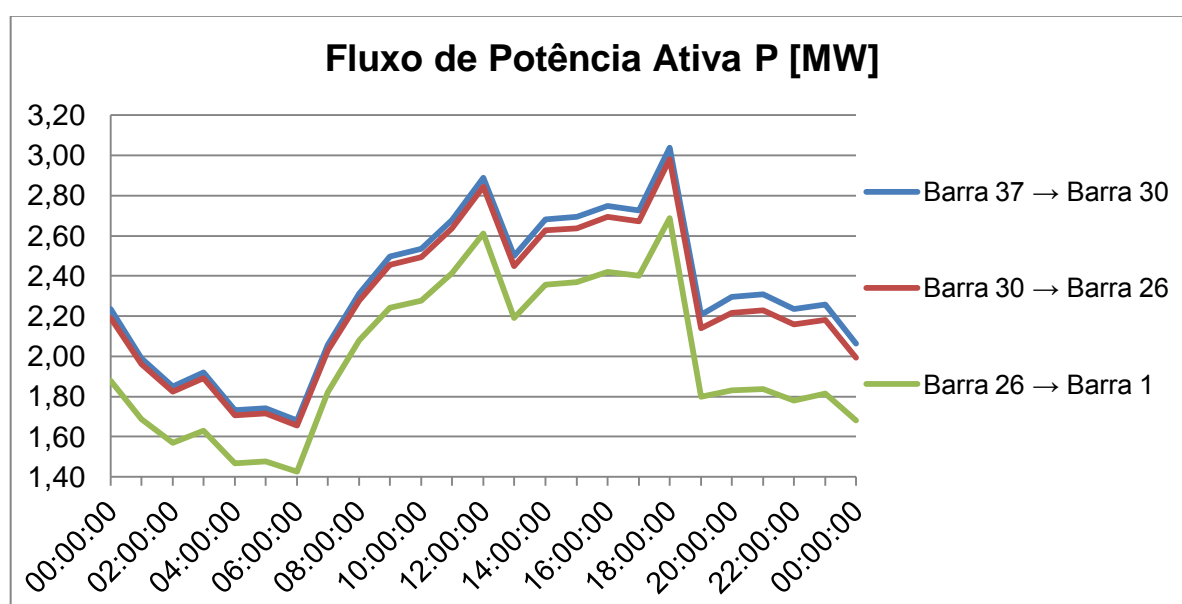


Gráfico 4.8 - Fluxo de Potência Ativa sem SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

No Gráfico 4.9 é possível verificar o comportamento do fluxo de potência ativa no ponto de fornecimento de energia pela concessionária, barra 37 – barra 30, sem os SFCR e com a inserção dos 60 SFCR na área interna residencial da quadra. Nesta análise ao compararmos com o mesmo horário, ou seja, 12h00min, identifica-se que a potência fornecida pelo alimentador na barra 37 passou a ser de aproximadamente 2,81 MW, acarretando um decréscimo de 2,7% (0,078 MW) que neste instante passaram a ser providos pelos SFCR, que além de fornecerem a potência para as cargas da rede passaram ainda a abastecer o restante do sistema.

Ainda no Gráfico 4.9 tem-se SFCR instalados em todos os postos de transformação que tem cargas ligadas, respeitando o limite de 50% da potência do transformador instalado. Nesses casos, o fluxo nos horário do dia com a presença

de radiação solar (a partir das 8h00 da manhã) sofre alterações e passa a se comportar conforme a variação do fornecimento de energia através da geração distribuída, sendo percebido mais claramente até as 17h00. Ao observar-se o horário das 12h00 (meio dia) toda a energia necessária para os consumidores dessa quadra está sendo suprida pela geração distribuída e o restante está sendo injetado na rede, alimentando o restante do circuito em direção a barra 1. O alimentador na barra 37 passa nesse instante a fornecer aproximadamente 2,48 MW a todo o sistema, ou seja, um decréscimo de 12,79% (0,364 MW). Desse último valor, 0,22935 MW são necessário para suprir as cargas dos consumidores e 0,13465 MW estão sendo injetados no sistema alimentando o restante do circuito em direção a barra 1.

Dessa forma, o fluxo se inverte sendo melhor representado pelo Gráfico 4.10.

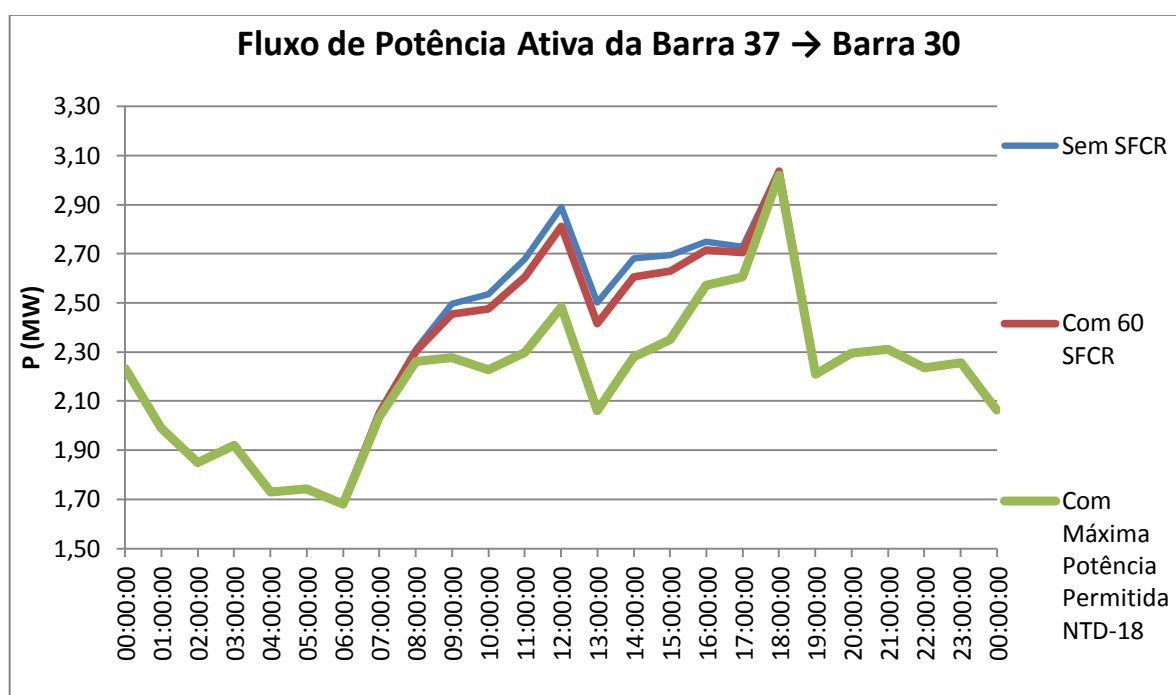


Gráfico 4.9 - Comparação do Fluxo de Potência Ativa no Ponto de Alimentação Principal do Sistema.
Elaboração: Piccini (2013)

Ao analisar o Gráfico 4.10 é possível ver o comportamento de inversão de fluxo. Às 13h00 tem-se a máxima produção de energia com os SFCR. Usando como base da análise a barra 26 (que é a entrada da quadra) a potência ativa fornecida pela concessionária aos consumidores é de 252,33 kW, sem os SFCR, já com 60 SFCR ela passa para 168,02 kW, agora com a máxima potências dos SFCR

permitida pela NTD-18 passa a ser de -127,86 kW, ou seja, deixando de circular na direção da barra 26 para a barra 27 e passa a ser da 27 para a 26, invertendo o sentido e passando a fornecer a potência ativa ao restante do sistema.

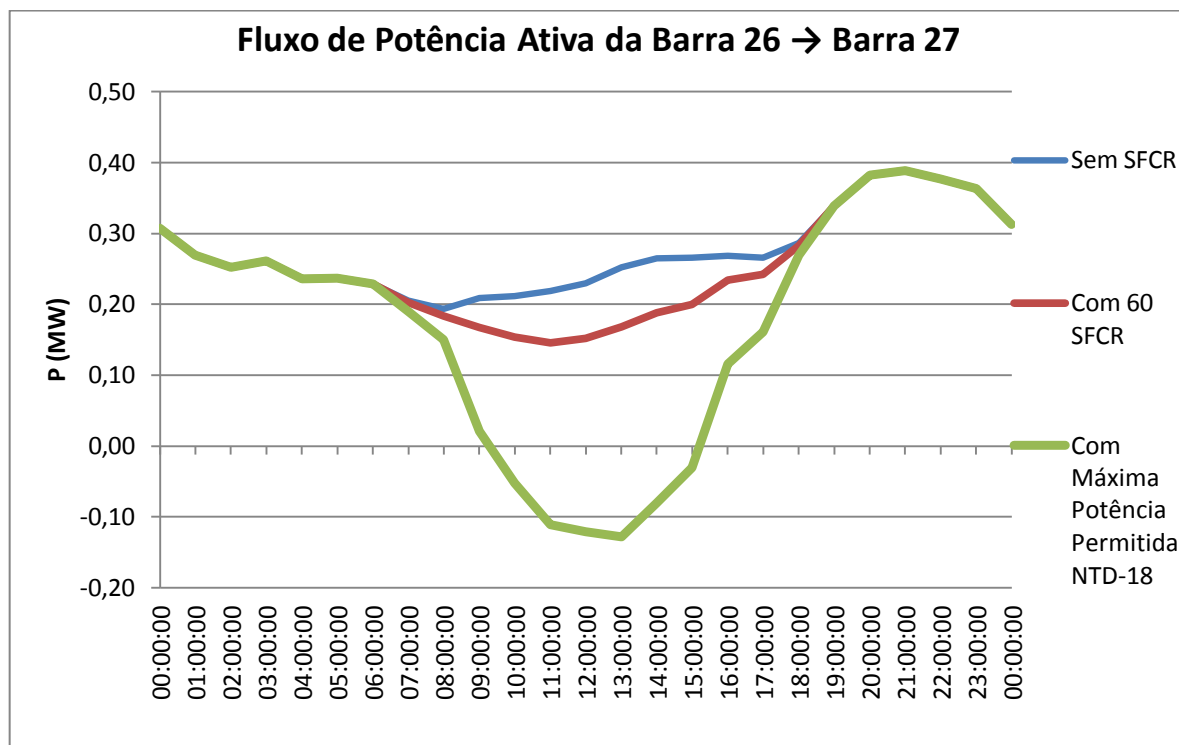


Gráfico 4.10 - Comportamento do Fluxo de Potência Ativa Sem e Com SFCR na Entrada da Quadra 1106 Sul.
Elaboração: Piccini (2013)

A potência reativa não se altera do que foi apresentado no Gráfico 4.6.

O fator de potência total do sistema na barra 37 onde tem a alimentação de entrada do circuito fica em uma condição mais longe do ideal. O Gráfico 4.11 ilustra bem essa condição, pois por ter somente injeção de potência ativa pelos SFCR, a potência reativa fica toda por conta da concessionária, devido a isso o fator de potência fica prejudicado sendo todo compensado pela fonte de geração principal.

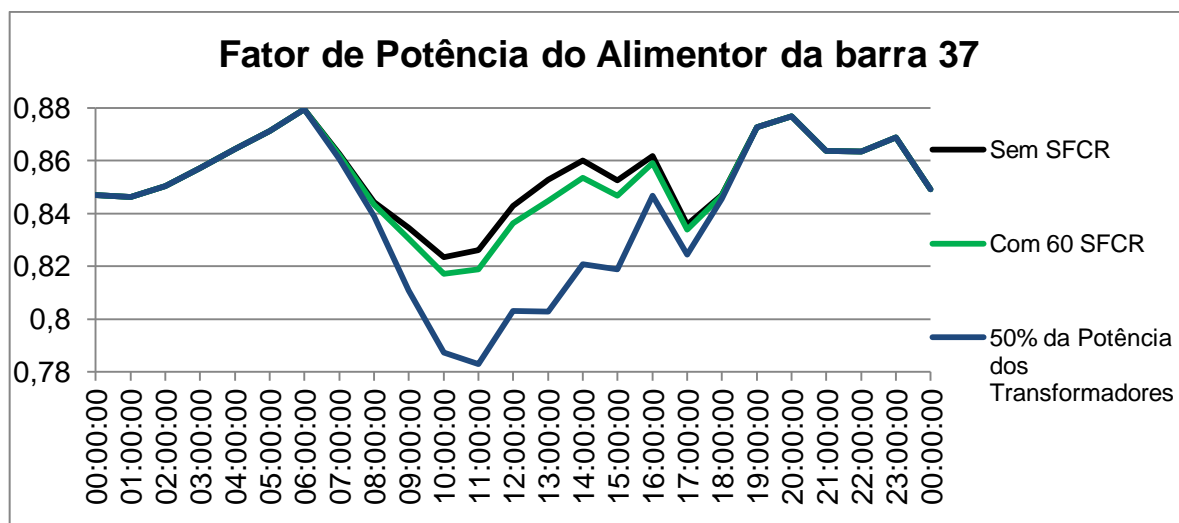


Gráfico 4.11 - Fator de Potência de todo o Sistema
Elaboração: Piccini (2013)

Por fim, ao analisar o Gráficos 4.12, pode-se verificar que os níveis de tensão dos secundários dos transformadores onde estão ligados os SFCR sofrem alterações, subindo todas as tensões e melhorando o fornecimento de energia. Nesse caso, a pior situação das tensões dos secundários que está na barra 10, às 14h00 com nível de tensão em 365,76 V passa para 368,48 V. Isso demonstra uma pequena melhoria no fornecimento de energia elétrica para as cargas com uma tensão mais próxima dos 380 V, devido a injeção de potência ativa no sistema. Melhora-se assim o nível de tensão para todos os consumidores a ele ligados nesse local. No Anexo VI é possível verificar todos os secundários dos transformadores.

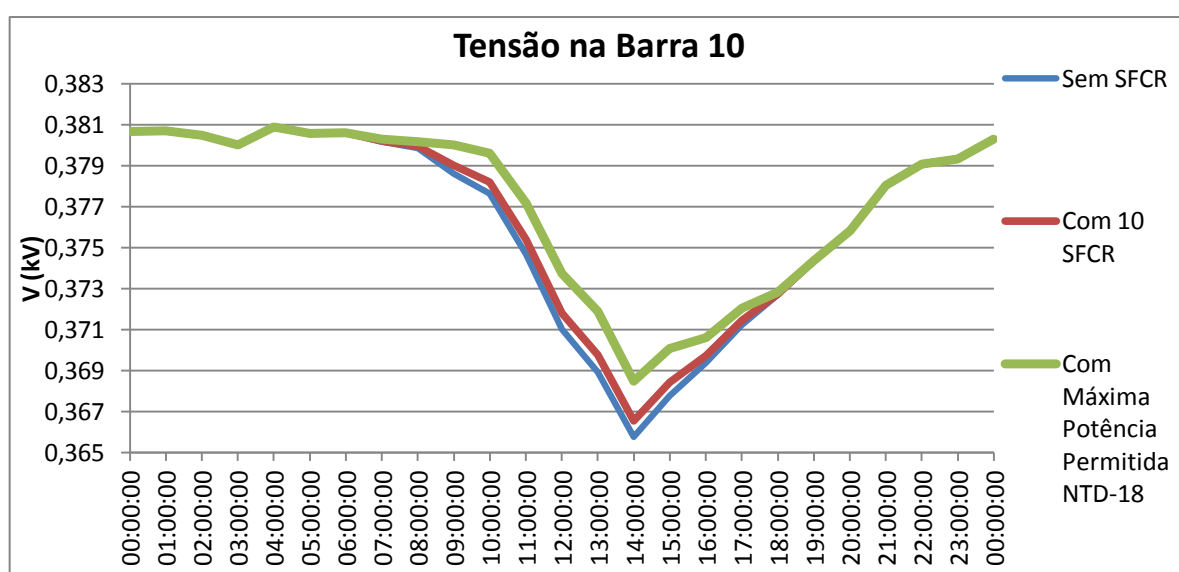


Gráfico 4.12 - Comparação da Tensão no Secundário do Transformador Ligado a Barra 10 Sem e Com SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

Capítulo V

CONCLUSÕES

Neste trabalho utilizou-se um modelo de uma rede de distribuição, no Matlab/PSAT, que permitiu caracterizar o comportamento do sistema elétrico real instalado na cidade de Palmas-TO, na quadra 1106 Sul, nesse sistema, implementou-se equipamentos de Geração Distribuída, sendo estes os Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede elétrica de Baixa Tensão. Com base nesse modelo, foi possível verificar o comportamento dos fluxos de potências, quantificar a variação das tensões da rede e seus equipamentos e o Fator de Potência em vários pontos da rede.

Nessa pesquisa, foi especificado um SFCR com uma potência de 1500 Wp que poderia atender uma residência com um consumo médio de 230 kW mês. Com os dados fornecidos pelo Instituto Ideal, somados a uma pesquisa de preço para aquisição desse equipamento, foi possível calcular um investimento inicial de R\$12.649,00 [46] com prazo de retorno entre 8 a 12 anos. Tal valor ainda se apresenta alto sendo o prazo de retorno longo para os padrões atuais do local em questão. Vale registrar que o Instituto Ideal e seus parceiros disponibilizam um incentivo financeiro aos consumidores e empresários para instalação de geradores fotovoltaicos com até 5 kW de potência [47]. Essa ajuda é feita através do Fundo Solar e tem alguns pré-requisitos que devem ser preenchidos. Uma vez atendido tais requisitos, o valor de incentivo é liberado e pode chegar até R\$ 5.000,00. Com isso o valor do investimento inicial para aquisição do equipamento se reduz diminuindo também o tempo de retorno para o consumidor.

O modelo da rede foi construído considerando um alimentador da subestação Palmas III em 13,8 kV, transformadores 13,8/0,38 kV, linhas de distribuição (cabos aéreos), várias cargas e geradores fotovoltaicos. Os geradores foram representados como inversores de tensão controlados em corrente.

Na construção do modelo da rede foi feito o dimensionamento de cada componente, recorrendo a valores de catálogos de fabricantes de cabos e de

transformadores e também dados fornecidos pela concessionária local. Desta forma, obteve-se um modelo da rede coerente com a realidade instalada.

Com base nesse modelo três ensaios foram realizados, o primeiro sem a inserção dos SFCR e os outros dois com inserção dos SFCR, sendo um com 60 SFCR podendo chegar a potência gerada de 93 kWp e o outro respeitando o limite imposto pela concessionária, sendo que a soma das potências da geração distribuída não ultrapassariam a 50% da potência nominal do posto de transformação que elas estarão ligadas. A soma de cada um dos 50% dos postos de transformação poderia gerar, em condições ideais, uma potência máxima de 517,5 kWp.

Registra-se que a quadra possui um consumo de energia durante as 24 horas do dia, 365 dias do ano, porém, a análise feita considerou somente um dia específico, ou seja, dia 03 de outubro de 2012 sendo este o dia de maior consumo de energia registrado pela concessionária em toda a cidade.

Nestas simulações foi possível verificar como o fluxo de energia se comporta atualmente e como se comportaria com a inserção da geração distribuída.

Observou-se que com uma inserção de potência menor do que a carga demandada, o fluxo mantém seu sentido, mas diminui a potência ativa injetada pela fonte principal, ou seja, a concessionária de energia local. Ao gerar mais energia do que a demandada pelos consumidores daquele posto de transformação, o excedente dessa energia é fornecida para o restante do sistema. Desse modo o fluxo de potência ativa se inverte e passa a circular da direção das cargas para a entrada da quadra alimentando as demais cargas do sistema junto com a concessionária local.

Com isso as cargas próximas à geração distribuída sofrem menos com a oscilação de tensão imposta pelo sistema mantendo-se assim mais próxima dos 380V.

Uma desvantagem para as concessionárias é a potência reativa que praticamente não se altera, ou seja, a concessionária diminui o fornecimento de potência ativa, mas não diminui o fornecimento de potência reativa. Isso faz com que o fator de potência da fonte principal de energia diminua, deixando-o mais longe do ideal que seria 1. Por outro lado, a corrente de alimentação da entrada da rede terá seu valor reduzido evitando futuros investimentos para atendimento do crescimento da demanda por parte da concessionária.

Com relação à aplicação dos SFCR em uma quadra da cidade de Palmas verificou-se uma redução na potência ativa entregue pela concessionária devido aos SFCR injetarem somente potência ativa na rede. Com isso a potência reativa não se altera e faz com que o fator de potência de todo o sistema diminua, deste modo a concessionária continua responsável por fornecer essa potência reativa necessária para o sistema.

Entre as vantagens da utilização dos SFCR observa-se: níveis de tensão mais próximos do ideal para as cargas próximas aos geradores, economia em Reais no valor da conta de energia elétrica para os consumidores que tenham instalados os SFCR em suas residências uma vez que esses passam a ser também micro produtores de energia. Dependendo da configuração de ligação do sistema o micro produtor também terá garantia de fornecimento de energia durante o dia mesmo se a concessionária faltar.

Para a concessionária as vantagens seriam um menor investimento em ampliação de cabos da rede de distribuição próximos aos SFCR, alívio nos postos de transformação com a geração distribuída instalada e garantia de fornecimento de energia. Buscando um aprofundamento desse estudo poderá ser possível verificar uma diminuição na compra de energia da transmissão ou das usinas de geração de energia, podendo ainda diminuir os investimentos em novas unidades geradores de grande porte.

Por fim, a principal vantagem é a geração de energia através de uma fonte limpa e renovável que respeitará o meio ambiente preservando-o para o futuro.

Enfim, constatou-se que os resultados encontrados sem a inserção do SFCR foram muito próximos do real, por consequência com a inserção da geração distribuída espera-se que também os resultados represente o que de real poderá acontecer. O *software* Matlab/PSAT se mostrou eficiente nas simulações e solução de fluxo de potência e que ainda existe um universo relativamente extenso para trabalhos futuros que poderão tomar como base esta pesquisa ou outras relacionadas.

Para trabalho futuros nessa linha de pesquisa ficam as seguintes observações:

O modelo computacional desenvolvido prevê a injeção de potência ativa na rede com fator de potência unitário, no entanto, pode-se alterar e simular um painel fotovoltaico que permita geração ou absorção de potência reativa.

Buscar uma simulação em que se aumente a área de estudo e a inserção de geração distribuída verificando se haverá uma redução significativa de fornecimento de energia pela concessionária. Com isso, em uma visão mais macro, buscar a verificação da possibilidade de uma diminuição na produção de energia pela usina hidrelétrica mais próxima, mantendo, dessa forma, o nível do reservatório mais alto. Tal fator se torna atrativo uma vez que na região de estudo existe um período de seca muito severo que coincide com o período de maior intensidade de radiação solar, fazendo dessa maneira que o reservatório da usina funcionasse como uma bateria sendo armazenado no período mais crítico do ano.

Os próximos estudos poderão também buscar uma análise de quais as melhores opções para melhorar o fator de potência de todo o sistema e poderão também realizar diversificados tipos de estudos relacionados à qualidade de energia e dinâmica de sistemas.

Referências Bibliográficas

1. UNITED NATIONS. World Population Prospects: The 2012 Revision, New York, 2013. Disponível em: <http://esa.un.org/unpd/wpp/Documentation/pdf/WPP2012_%20KEY%20FINDINGS.pdf>. Acesso em: 10 out 2013.
2. VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2012.
3. ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.**, 2012.
4. GRUPO REDE ENERGIA - CELTINS. Normas Técnicas. **NTD – 18 Requisitos para acesso e conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição de baixa tensão (Microgeração)**, Palmas, 2012. Disponível em: <<http://www.celtins.com.br/dicas/normas-tecnicas/>>. Acesso em: 05 abr. 2013.
5. ANEEL. Informações Gerais 2º Trimestre de 2013. **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Jun_2013.pdf>. Acesso em: 17 out. 2013.
6. OS 10 países que mais usam energia solar no mundo. **Exame.com**, 2012. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/noticias/os-10-paises-que-mais-usam-energia-solar-no-mundo#1>>. Acesso em: 17 jul. 2013.
7. SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. **O POTENCIAL BRASILEIRO DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA: ANÁLISE DE PARIDADE DE REDE**. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construtivo - ENCAC. Ouro Preto, MG: 2007. p. 1658 a 1667.
8. COORDENADOR CHIGUERU TIBA. **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestre**. Recife: Universitária da UFPE, 2000.
9. CUNHA, G. H. B. **Modelagem Matemática e Implementação Computacional no ATP de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado a Rede de Baixa Tensão. Dissertação (Engenharia Elétrica)**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia:, 2013.

10. ALBUQUERQUE, F. L. D. **Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Operando como Gerador de Potência Ativa e Compensador de Potência Reativa. TESE (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Uberlândia.** Uberlândia:, 2012.
11. BINAS, F. Microgeração solar chega a mil residências na Bahia. **Jornal da Energia O mundo da eletricidade em tempo real**, 2013. Disponível em: <http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=12977&id_tipo=3&id_secao=8>. Acesso em: 18 jul. 2013.
12. INEE. Sobre GD e Cogeração. **Instituto Nacional de Eficiência Energética - INEE.** Disponível em: <<http://www.inee.org.br/>>. Acesso em: 17 maio 2013.
13. ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. What is Distributed Generation? **International Symposium on Distributed Generation: Power System and Market Aspects.**, Estocolmo. Suécia, Jun 2001.
14. LORA, E. E. S.; ADDAD, J. **Geração Distribuída Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.
15. CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. **Protocolo de Quioto.** Tradução de Ministério da Ciência e Tecnologia. Quito, Japão:, 1998.
<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/28739/Texto_do_Protocolo_de_Quioto_a_Convencao_Quadro_das_Nacoes_Unidas_sobre_Mudanca_do_Clima.html>.
16. ANEEL. BIG - Banco de Informações de Geração, 2013. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 21 nov. 2013.
17. O que é necessário para que o Brasil brilhe na energia solar? **Inovação Tecnológica**, 2009. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=o-necessario-brasil-brilhe-energia-solar&id=010175090701>>. Acesso em: 17 jul. 2013.
18. BP'S Statistical Review of World Energy 2013 Workbook. Disponível em: <<http://www.bp.com/statisticalreview>>. Acesso em: 01 out. 2013.
19. COM funciona a radiação. **Comotudofunciona.** Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br>>. Acesso em: 01 out. 2013.

20. PINHO, J. T.; [ETAL.]. **Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.
21. SANTOS, F. F. D. A Tecnologia Fotovoltaica. **Utilização de Energia Fotovoltaica para a Eficiência Energética de uma Moradia**, 2013. Disponível em: <<http://filipefs.weebly.com/tecnologia-fv.html>>. Acesso em: 02 out. 2013.
22. CARVALHO, D. M. S. **Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação à Rede Elétrica**. Porto - Portugal:, 2011.
23. LORENZO, E.; [ETAL.]. **Electricidad Solar Ingenieria de los Sistemas Fotovoltaicos**. Sevilla - Espanha:, 1994.
24. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60891 - Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.**, 2009.
25. PÓ, J. M. D. C. **Assessment ao the IEC 60891 norm conversion methods under outdoor test conditions**. Lisboa:, 2011.
26. MESSENGER, R.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering.**, 1999.
27. MARANGONI, F. **Inversores monofásicos para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede**. Pato Branco - Pr.:, 2012.
28. JANNUZZI, G. D. M.; [ETAL.]. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**. Campinas, SP:, 2009.
29. MACÊDO, W. N. **ANÁLISE DO FATOR DE DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR APLICADO A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**. São Paulo - SP:, 2006.
30. VIANA, T. **Energia Solar Fotovoltaica.**, 2011.
31. DENARDI, A. M. **Palmas em cena: da geração à banalização do abandono do lixo nos espaços públicos do núcleo central da capital do Tocantins**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente). Universidade Federal do Tocantins. Palmas:, 2013. 166 p.
32. ANEEL. Conheça as Tarifas da Classe de Consumo Residencial de uma Concessionária. **ANEEL**, 2013. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm?fuseaction=tarifaAplicada.mostrarFrmValorOrdenado&tipoOrdenacao=valor&ordenacao=desc&ativaMenu=1>>. Acesso em: 14 nov. 2013.

33. CELTINS - GRUPO REDE ENERGIA. **NTD – 18 REQUISITOS PARA ACESSO E CONEXÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA AO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA CELTINS**. Palmas - To:, 2012.
34. SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO E HABITAÇÃO – PREFEITURA MUNICIPAL DE PALMAS-TO. Disponível em: <<http://srvsefin.palmas.to.gov.br/portalprefeitura/servicos/seduh/>>. Acesso em: 01 out. 2013.
35. INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA BRASILEIRO. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 30 out. 2013.
36. HORÁRIO MUNDIAL - HORA CERTA. Disponível em: <http://24timezones.com/hora_certa.php>. Acesso em: 30 out. 2013.
37. INSTITUTDO IDEAL LANÇA SIMULADOR SOLAR. Disponível em: <http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=12973&id_tipo=3&id_secao=8&id_pai=2&titulo_info=Instituto%20Ideal%20lan%26ccedil%3Ba%20Simulador%20Solar>. Acesso em: 13 abr. 2013.
38. SIMULADOR SOLAR. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/simulador/>>. Acesso em: 13 abr. 2013.
39. JETION SOLAR. Disponível em: <<http://www.jetionsolar.com/>>. Acesso em: 02 nov. 2013.
40. SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. Disponível em: <www.SMA-Solar.com>. Acesso em: 02 nov. 2013.
41. MILANO, F. **Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT**. version 1.3.4. ed., July 14 2005.
42. CAIXETA, D. **Manual de Simulação de Sistema Elétrico com PSAT (versão 1.3.4) e MatLab (versão 6.5) incluindo um Caso Exemplo**. Uberlândia:, 2012.
43. FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3ª ed. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2005.
44. TABELA DE CABOS E FIOS. Disponível em: <<http://www.dicelrs.com.br/index.php?pagina=produto&id=42&chamada=TABELAS>>. Acesso em: 06 set. 2013.
45. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Relatório do Grupo de Trabalho em Sistemas Fotovoltaicos – GT-GDSF**. Ministério de Minas e Energia. Brasília - Brasil, p. 222. 2009.

46. NEO Solar Energia, 2013. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/grid-tie-fotovoltaico-sma-200-kwh-mes.html>>. Acesso em: 05 dez. 2013.
47. INSTITUTO IDEAL. América do Sol, 2013. Disponível em: <www.americadosol.org/fundosolar/>. Acesso em: 10 dez. 2013.

Anexo I

POTÊNCIA DAS CARGAS

Aqui estão apresentados os gráficos das potências ativas e reativas de todas as cargas ligadas ao secundário de cada um dos transformadores antes da inserção do SFCR e as potências ativas e reativas do restante do circuito. Esses gráficos se referem aos dados apresentados nas tabelas 4.5 e 4.6 no capítulo IV.

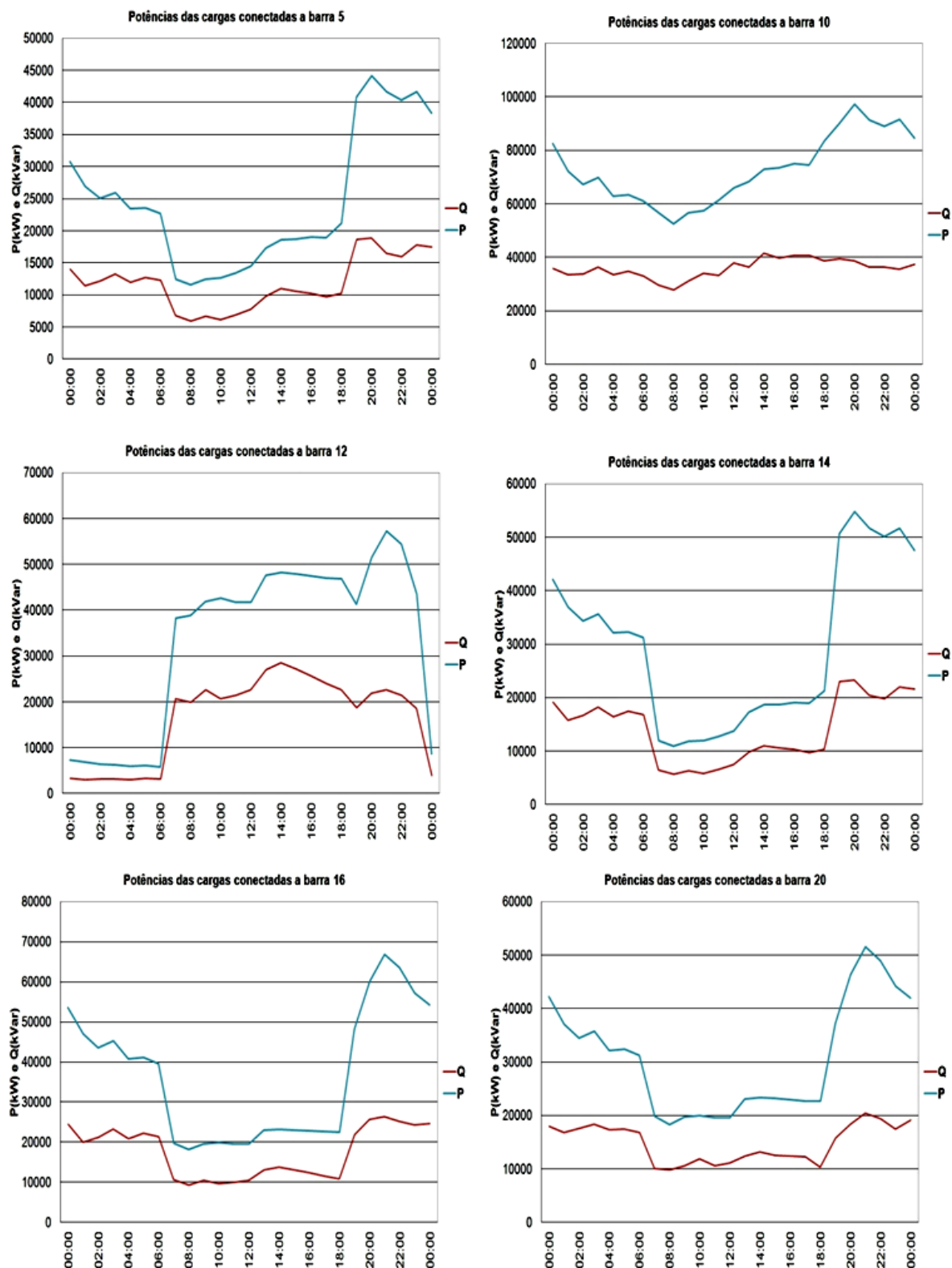


Gráfico - Potências Ativa e Reativa das Cargas
Elaboração: Piccini (2013)

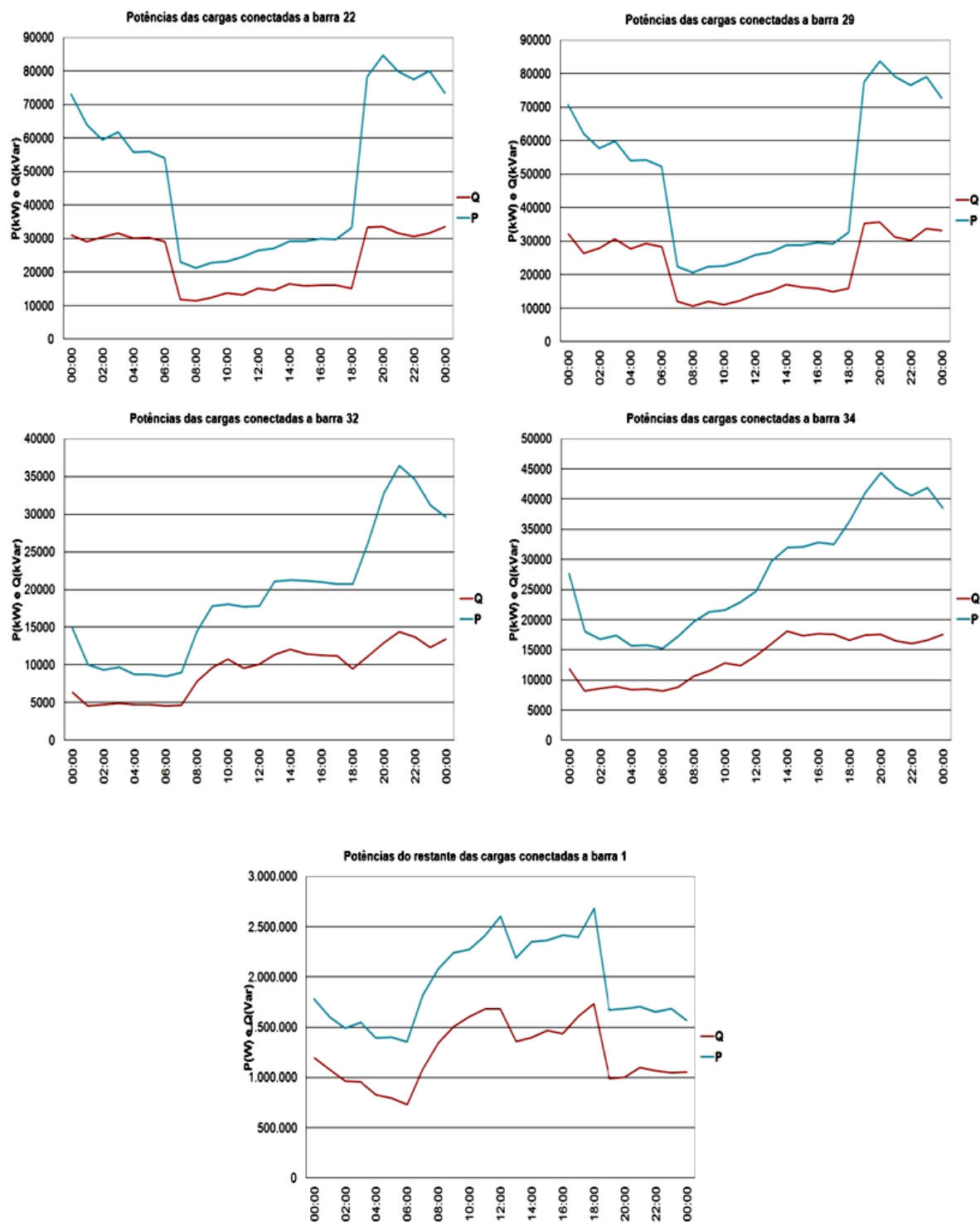


Gráfico - Potências Ativa e Reativa das Cargas
Elaboração: Piccini (2013)

Anexo II

SENTIDO DO FLUXO DE POTÊNCIA SEM SFCR

Apresentação dos dados dos sentidos do fluxo de potência ativa e reativa sem SFCR entre as principais barras do sistema. Esses dados estão consolidados nos gráficos no capítulo IV e no Anexo VI.

Tabela - Sentido do Fluxo de Potência Ativa P [MW] sem SFCR

DE → PARA	Barra 37 → Barra 30	Barra 30 → Barra 31	Barra 30 → Barra 26	Barra 26 → Barra 1	Barra 26 → Barra 27	Barra 27 → Barra 17	Barra 17 → Barra 18	Barra 17 → Barra 8	Barra 8 → Barra 3	Barra 3 → Barra 11	Barra 3 → Barra 2
00:00:00	2,23410	0,04287	2,19039	1,88028	0,30730	0,26357	0,08156	0,18197	0,09836	0,07896	0,01939
01:00:00	1,98911	0,02812	1,96033	1,68834	0,26972	0,23144	0,07140	0,16001	0,08685	0,07106	0,01579
02:00:00	1,85059	0,02615	1,82387	1,57003	0,25190	0,21632	0,06639	0,14990	0,08188	0,06609	0,01579
03:00:00	1,91993	0,02713	1,89219	1,62914	0,26099	0,22405	0,06890	0,15513	0,08452	0,06812	0,01639
04:00:00	1,73073	0,02446	1,70579	1,46860	0,23555	0,20227	0,06208	0,14017	0,07655	0,06178	0,01477
05:00:00	1,74164	0,02461	1,71655	1,47787	0,23704	0,20356	0,06248	0,14105	0,07705	0,06218	0,01487
06:00:00	1,67993	0,02373	1,65576	1,42564	0,22863	0,19634	0,06027	0,13604	0,07433	0,05999	0,01434
07:00:00	2,05608	0,02641	2,02898	1,82109	0,20554	0,18298	0,04288	0,14008	0,08278	0,07025	0,01253
08:00:00	2,31186	0,03435	2,27659	2,08012	0,19337	0,17256	0,03956	0,13298	0,07993	0,06836	0,01157
09:00:00	2,49567	0,03929	2,45529	2,24299	0,20860	0,18615	0,04266	0,14346	0,08622	0,07375	0,01247
10:00:00	2,53412	0,03990	2,49306	2,27731	0,21182	0,18903	0,04333	0,14568	0,08753	0,07486	0,01266
11:00:00	2,67916	0,04083	2,63702	2,41419	0,21838	0,19422	0,04432	0,14988	0,08777	0,07433	0,01343
12:00:00	2,88887	0,04276	2,84463	2,61025	0,22935	0,20321	0,04637	0,15681	0,09003	0,07551	0,01452
13:00:00	2,50041	0,05115	2,44816	2,19215	0,25233	0,22541	0,05036	0,17501	0,10588	0,08852	0,01735
14:00:00	2,68146	0,05366	2,62655	2,35736	0,26498	0,23602	0,05267	0,18331	0,10924	0,09058	0,01866
15:00:00	2,69376	0,05370	2,63878	2,36921	0,26528	0,23618	0,05270	0,18345	0,10905	0,09029	0,01875
16:00:00	2,74894	0,05419	2,69346	2,42104	0,26809	0,23836	0,05311	0,18521	0,10913	0,08996	0,01916
17:00:00	2,72768	0,05372	2,67262	2,40237	0,26575	0,23626	0,05264	0,18358	0,10809	0,08908	0,01901
18:00:00	3,03907	0,05758	2,97989	2,68797	0,28652	0,25352	0,05613	0,19735	0,11248	0,09120	0,02127
19:00:00	2,20853	0,06783	2,13990	1,79799	0,33931	0,29235	0,07588	0,21642	0,12498	0,10365	0,02133
20:00:00	2,29545	0,07789	2,21673	1,83214	0,38185	0,33287	0,08648	0,24633	0,14751	0,12443	0,02307
21:00:00	2,31042	0,07903	2,23053	1,83883	0,38887	0,33938	0,09212	0,24720	0,15440	0,13263	0,02175
22:00:00	2,23672	0,07588	2,16002	1,78084	0,37653	0,32755	0,08828	0,23921	0,14899	0,12789	0,02110
23:00:00	2,25681	0,07369	2,18230	1,81618	0,36346	0,31549	0,08457	0,23087	0,13794	0,11616	0,02178
00:00:00	2,06402	0,06868	1,99463	1,68003	0,31228	0,26535	0,08151	0,18380	0,09810	0,07809	0,02001

Elaboração: Piccini (2013)

Tabela - Sentido do Fluxo de Potência Reativa Q [MVar] sem SFCR

DE → PARA	Barra 37 → Barra 30	Barra 30 → Barra 31	Barra 30 → Barra 26	Barra 26 → Barra 1	Barra 26 → Barra 27	Barra 27 → Barra 17	Barra 17 → Barra 18	Barra 17 → Barra 8	Barra 8 → Barra 3	Barra 3 → Barra 11	Barra 3 → Barra 2
00:00:00	1,40209	0,01863	1,38291	1,24142	0,13964	0,11935	0,03560	0,08373	0,04565	0,03667	0,00898
01:00:00	1,25297	0,01297	1,23957	1,11149	0,12658	0,10669	0,03319	0,07349	0,03814	0,03082	0,00732
02:00:00	1,14524	0,01354	1,13133	1,00504	0,12501	0,10754	0,03184	0,07569	0,04024	0,03249	0,00774
03:00:00	1,15385	0,01405	1,13940	1,00914	0,12890	0,10972	0,03099	0,07872	0,04067	0,03217	0,00850
04:00:00	1,00695	0,01332	0,99332	0,87607	0,11616	0,09891	0,02876	0,07013	0,03514	0,02749	0,00765
05:00:00	0,98122	0,01341	0,96749	0,84798	0,11844	0,10297	0,03083	0,07212	0,03594	0,02784	0,00810
06:00:00	0,90930	0,01293	0,89609	0,77776	0,11734	0,10438	0,03141	0,07296	0,03869	0,03087	0,00782
07:00:00	1,20681	0,01366	1,19269	1,08070	0,11045	0,09818	0,02221	0,07596	0,04527	0,03845	0,00682
08:00:00	1,46779	0,01877	1,44842	1,34366	0,10273	0,09198	0,02156	0,07041	0,04154	0,03556	0,00598
09:00:00	1,64701	0,02150	1,62479	1,50726	0,11509	0,10288	0,02327	0,07961	0,04722	0,04043	0,00679
10:00:00	1,74695	0,02397	1,72222	1,60400	0,11563	0,10450	0,02597	0,07852	0,04310	0,03691	0,00619
11:00:00	1,82809	0,02237	1,80486	1,68497	0,11697	0,10448	0,02419	0,08028	0,04566	0,03872	0,00694
12:00:00	1,84468	0,02461	1,81909	1,68611	0,12967	0,11544	0,02659	0,08884	0,04932	0,04140	0,00791
13:00:00	1,53195	0,02814	1,50309	1,35869	0,14198	0,12659	0,02754	0,09904	0,06101	0,05106	0,00995
14:00:00	1,59068	0,03101	1,55884	1,39899	0,15707	0,13973	0,03026	0,10946	0,06589	0,05468	0,01121
15:00:00	1,65198	0,02958	1,62156	1,46844	0,15030	0,13365	0,02884	0,10480	0,06285	0,05209	0,01077
16:00:00	1,61838	0,02986	1,58767	1,43678	0,14803	0,13181	0,02906	0,10274	0,05993	0,04944	0,01049
17:00:00	1,79114	0,02958	1,76068	1,61435	0,14337	0,12810	0,02880	0,09928	0,05638	0,04650	0,00988
18:00:00	1,90683	0,02692	1,87885	1,73631	0,13898	0,12279	0,02602	0,09676	0,05550	0,04503	0,01047
19:00:00	1,23547	0,02981	1,20514	1,04826	0,15517	0,13333	0,03308	0,10023	0,05808	0,04820	0,00989
20:00:00	1,25875	0,03195	1,22625	1,06169	0,16276	0,14142	0,03517	0,10623	0,06444	0,05442	0,01003
21:00:00	1,34868	0,03239	1,31571	1,14982	0,16402	0,13959	0,03752	0,10204	0,06281	0,05404	0,00877
22:00:00	1,30720	0,03107	1,27561	1,11276	0,16110	0,13556	0,03591	0,09962	0,06054	0,05203	0,00851
23:00:00	1,28567	0,03015	1,25499	1,09674	0,15649	0,13282	0,03434	0,09845	0,06012	0,05066	0,00945
00:00:00	1,28414	0,03218	1,25150	1,10479	0,14518	0,12337	0,03800	0,08536	0,04549	0,03623	0,00926

Elaboração: Piccini (2013)

Anexo III

POTÊNCIAS ATIVAS

Neste anexo estão apresentados os gráficos e os dados das potências ativas de todas as cargas sem SFCR, com 60 SFCR e com 50% da potência nominal de cada um dos transformadores com cargas ligadas a eles. Todas essas informações estão representadas durante as 24 horas do dia considerando os dados de insolação e temperatura apresentados na tabela 3.4 e no gráfico 3.2 do capítulo III e respeitando as equações 3.2 e 3.3 também do capítulo III.

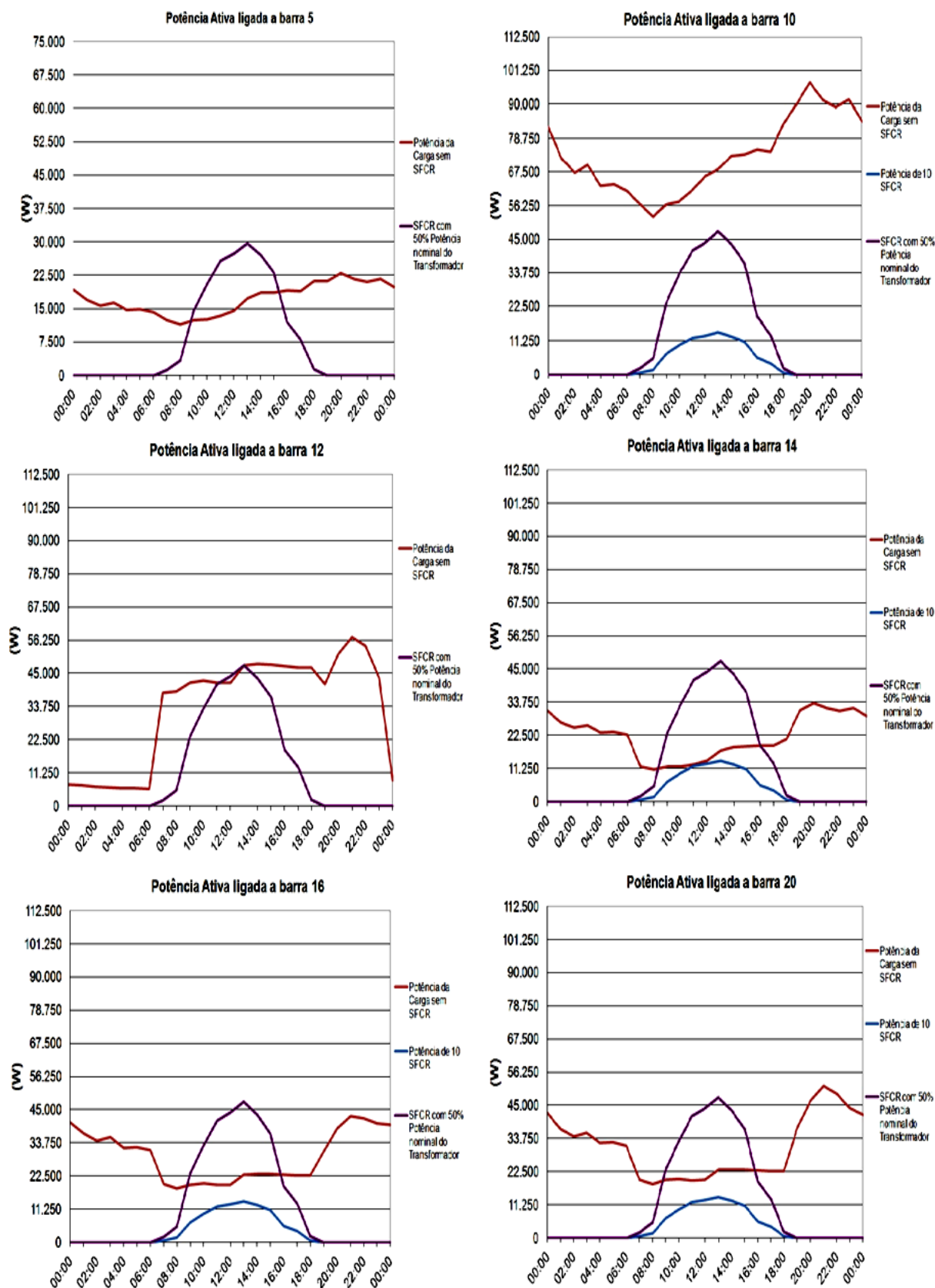


Gráfico - Potência Ativa [W] sem e com SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

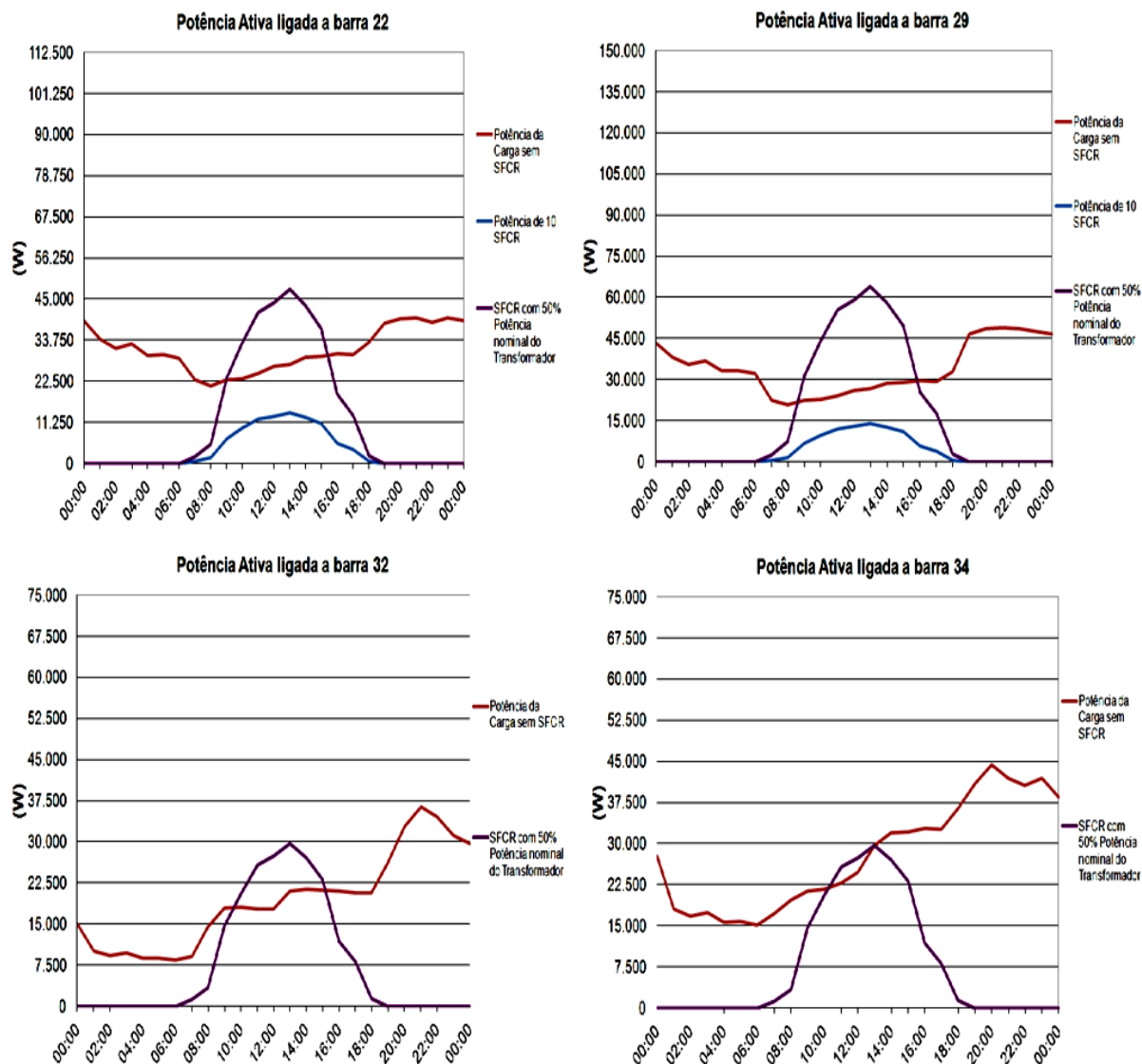


Gráfico - Potência Ativa [W] sem e com SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

Tabela - Potência Ativa em pu sem e com SFCR

	Barra 5			Barra 10			Barra 12			Barra 14			Barra 16			Barra 20			Barra 22			Barra 29			Barra 32		Barra 34	
	Carga	50%		Carga	10 SFCR	50%	Carga	50%		Carga	10 SFCR	50%	Carga	10 SFCR	50%	Carga	10 SFCR	50%	Carga	10 SFCR	50%	Carga	10 SFCR	50%	Carga	50%	Carga	50%
0:00	0,00193			0,00825			0,00073			0,00307			0,00406			0,00422			0,00388			0,00434			0,00149		0,00277	
1:00	0,00169			0,00723			0,00069			0,00269			0,00369			0,00370			0,00340			0,00380			0,00100		0,00180	
2:00	0,00157			0,00672			0,00064			0,00250			0,00343			0,00344			0,00316			0,00353			0,00093		0,00167	
3:00	0,00163			0,00698			0,00062			0,00260			0,00356			0,00357			0,00328			0,00367			0,00097		0,00174	
4:00	0,00147			0,00629			0,00060			0,00234			0,00321			0,00322			0,00296			0,00331			0,00087		0,00157	
5:00	0,00148			0,00633			0,00061			0,00236			0,00323			0,00324			0,00298			0,00333			0,00088		0,00158	
6:00	0,00143			0,00611			0,00058			0,00227			0,00312			0,00313			0,00287			0,00321			0,00085		0,00152	
7:00	0,00125	0,00012		0,00567	0,00006	0,00020	0,00383	0,00020		0,00119	0,00006	0,00020	0,00197	0,00006	0,00020	0,00198	0,00006	0,00020	0,00229	0,00006	0,00020	0,00224	0,00006	0,00026	0,00090	0,00012	0,00173	0,00012
8:00	0,00115	0,00034		0,00526	0,00016	0,00054	0,00389	0,00054		0,00110	0,00016	0,00054	0,00182	0,00016	0,00054	0,00183	0,00016	0,00054	0,00212	0,00016	0,00054	0,00207	0,00016	0,00072	0,00145	0,00034	0,00197	0,00034
9:00	0,00124	0,00146		0,00567	0,00069	0,00234	0,00419	0,00234		0,00118	0,00069	0,00234	0,00196	0,00069	0,00234	0,00197	0,00069	0,00234	0,00228	0,00069	0,00234	0,00223	0,00069	0,00314	0,00178	0,00146	0,00213	0,00146
10:00	0,00126	0,00206		0,00575	0,00097	0,00330	0,00426	0,00330		0,00120	0,00097	0,00330	0,00199	0,00097	0,00330	0,00200	0,00097	0,00330	0,00232	0,00097	0,00330	0,00227	0,00097	0,00442	0,00181	0,00206	0,00216	0,00206
11:00	0,00134	0,00257		0,00614	0,00121	0,00413	0,00417	0,00413		0,00127	0,00121	0,00413	0,00195	0,00121	0,00413	0,00196	0,00121	0,00413	0,00245	0,00121	0,00413	0,00240	0,00121	0,00553	0,00177	0,00257	0,00229	0,00257
12:00	0,00145	0,00274		0,00660	0,00129	0,00440	0,00418	0,00440		0,00138	0,00129	0,00440	0,00196	0,00129	0,00440	0,00196	0,00129	0,00440	0,00265	0,00129	0,00440	0,00260	0,00129	0,00589	0,00178	0,00274	0,00247	0,00274
13:00	0,00173	0,00297		0,00683	0,00139	0,00476	0,00477	0,00476		0,00173	0,00139	0,00476	0,00230	0,00139	0,00476	0,00231	0,00139	0,00476	0,00271	0,00139	0,00476	0,00267	0,00139	0,00638	0,00211	0,00297	0,00297	0,00297
14:00	0,00186	0,00270		0,00730	0,00127	0,00433	0,00482	0,00433		0,00186	0,00127	0,00433	0,00232	0,00127	0,00433	0,00233	0,00127	0,00433	0,00291	0,00127	0,00433	0,00287	0,00127	0,00579	0,00213	0,00270	0,00319	0,00270
15:00	0,00186	0,00231		0,00734	0,00108	0,00370	0,00479	0,00370		0,00187	0,00108	0,00370	0,00231	0,00108	0,00370	0,00232	0,00108	0,00370	0,00293	0,00108	0,00370	0,00289	0,00108	0,00496	0,00212	0,00231	0,00321	0,00231
16:00	0,00191	0,00119		0,00750	0,00056	0,00190	0,00474	0,00190		0,00191	0,00056	0,00190	0,00229	0,00056	0,00190	0,00229	0,00056	0,00190	0,00299	0,00056	0,00190	0,00295	0,00056	0,00255	0,00210	0,00119	0,00328	0,00119
17:00	0,00189	0,00081		0,00744	0,00038	0,00130	0,00470	0,00130		0,00190	0,00038	0,00130	0,00226	0,00038	0,00130	0,00227	0,00038	0,00130	0,00297	0,00038	0,00130	0,00293	0,00038	0,00174	0,00208	0,00081	0,00325	0,00081
18:00	0,00212	0,00013		0,00837	0,00006	0,00021	0,00469	0,00021		0,00212	0,00006	0,00021	0,00226	0,00006	0,00021	0,00227	0,00006	0,00021	0,00332	0,00006	0,00021	0,00328	0,00006	0,00028	0,00207	0,00013	0,00364	0,00013
19:00	0,00212			0,00901			0,00412			0,00310			0,00308			0,00371			0,00383			0,00466			0,00262		0,00410	
20:00	0,00229			0,00973			0,00515			0,00335			0,00385			0,00464			0,00395			0,00485			0,00328		0,00443	
21:00	0,00216			0,00914			0,00572			0,00316			0,00428			0,00516			0,00399			0,00490			0,00364		0,00418	
22:00	0,00210			0,00889			0,00544			0,00307			0,00420			0,00490			0,00387			0,00485			0,00346		0,00406	
23:00	0,00217			0,00916			0,00435			0,00317			0,00403			0,00441			0,00399			0,00475			0,00311		0,00419	
0:00	0,00199			0,00845			0,00087			0,00291			0,00399			0,00419			0,00391			0,00466			0,00296		0,00385	

Elaboração: Piccini (2013)

Anexo IV

Sentido do Fluxo de Potência com 60 SFCR

Na tabela a seguir são apresentados os dados do sentido do fluxo de potência ativa nas principais barras com a inserção dos 60 SFCR ao sistemas.

Os gráficos no capítulo IV, estão diretamente ligados a esses dados e no Anexo VI.

Tabela - Fluxo de Potência Ativa em pu com 60 SFCR no sistema

DE → PARA	Barra 37 → Barra 30	Barra 30 → Barra 31	Barra 30 → Barra 26	Barra 26 → Barra 1	Barra 26 → Barra 27	Barra 27 → Barra 17	Barra 17 → Barra 18	Barra 17 → Barra 8	Barra 8 → Barra 3	Barra 3 → Barra 11	Barra 3 → Barra 2
0:00	2,23410	0,04287	2,19039	1,88028	0,30730	0,26357	0,08156	0,18197	0,09836	0,07896	0,01939
1:00	1,98911	0,02812	1,96033	1,68834	0,26972	0,23144	0,07140	0,16001	0,08685	0,07106	0,01579
2:00	1,85059	0,02615	1,82387	1,57003	0,25190	0,21632	0,06639	0,14990	0,08188	0,06609	0,01579
3:00	1,91993	0,02713	1,89219	1,62914	0,26099	0,22405	0,06890	0,15513	0,08452	0,06812	0,01639
4:00	1,73073	0,02446	1,70579	1,46860	0,23555	0,20227	0,06208	0,14017	0,07655	0,06178	0,01477
5:00	1,74164	0,02461	1,71655	1,47787	0,23704	0,20356	0,06248	0,14105	0,07705	0,06218	0,01487
6:00	1,67993	0,02373	1,65576	1,42564	0,22863	0,19634	0,06027	0,13604	0,07433	0,05999	0,01434
7:00	2,05263	0,02641	2,02553	1,82109	0,20209	0,18011	0,04173	0,13836	0,08164	0,06910	0,01253
8:00	2,30229	0,03435	2,26703	2,08012	0,18382	0,16461	0,03639	0,12821	0,07676	0,06519	0,01157
9:00	2,45414	0,03929	2,41378	2,24299	0,16717	0,15163	0,02888	0,12274	0,07246	0,05998	0,01247
10:00	2,47558	0,03990	2,43456	2,27731	0,15344	0,14038	0,02390	0,11647	0,06813	0,05546	0,01266
11:00	2,60596	0,04083	2,56386	2,41419	0,14540	0,13340	0,02004	0,11335	0,06352	0,05009	0,01343
12:00	2,81089	0,04276	2,76670	2,61025	0,15162	0,13844	0,02052	0,11790	0,06421	0,04969	0,01452
13:00	2,41586	0,05115	2,36367	2,19215	0,16802	0,15515	0,02232	0,13281	0,07787	0,06052	0,01735
14:00	2,60459	0,05366	2,54973	2,35736	0,18834	0,17215	0,02719	0,14493	0,08380	0,06514	0,01865
15:00	2,62798	0,05370	2,57305	2,36921	0,19970	0,18153	0,03089	0,15061	0,08727	0,06852	0,01875
16:00	2,71505	0,05419	2,65960	2,42103	0,23431	0,21020	0,04188	0,16830	0,09792	0,07875	0,01916
17:00	2,70448	0,05372	2,64943	2,40237	0,24262	0,21698	0,04495	0,17200	0,10041	0,08140	0,01901
18:00	3,03530	0,05758	2,97612	2,68797	0,28276	0,25039	0,05488	0,19547	0,11123	0,08996	0,02127
19:00	2,20853	0,06783	2,13990	1,79799	0,33931	0,29235	0,07588	0,21642	0,12498	0,10365	0,02133
20:00	2,29545	0,07789	2,21673	1,83214	0,38185	0,33287	0,08648	0,24633	0,14751	0,12443	0,02307
21:00	2,31042	0,07903	2,23053	1,83883	0,38887	0,33938	0,09212	0,24720	0,15440	0,13263	0,02175
22:00	2,23672	0,07588	2,16002	1,78084	0,37653	0,32755	0,08828	0,23921	0,14899	0,12789	0,02110
23:00	2,25681	0,07369	2,18230	1,81618	0,36346	0,31549	0,08457	0,23087	0,13794	0,11616	0,02178
0:00	2,06402	0,06868	1,99463	1,68003	0,31228	0,26535	0,08151	0,18380	0,09810	0,07809	0,02001

Elaboração: Piccini (2013)

Anexo V

SENTIDO DO FLUXO DE POTÊNCIA COM INSERÇÃO DE SFCR EM 50% DA POTÊNCIA DOS TRANSFORMADORES

Na tabela a seguir são apresentados os dados do sentido do fluxo de potência ativa nas principais barras com a inserção dos SFCR em 50% da potência nominal de cada um dos postos de transformação que tem cargas ligadas a ele. Os dados em vermelho representam a inversão do fluxo.

Os gráficos no capítulo IV, estão diretamente ligados a esses dados e no Anexo VI.

Tabela - Fluxo de Potência Ativa em pu com SFCR em 50% da potência do posto de transformação

DE → PARA	Barra 37 → Barra 30	Barra 30 → Barra 31	Barra 30 → Barra 26	Barra 26 → Barra 1	Barra 26 → Barra 27	Barra 27 → Barra 17	Barra 17 → Barra 18	Barra 17 → Barra 8	Barra 8 → Barra 3	Barra 3 → Barra 11	Barra 3 → Barra 2
0:00	2,23410	0,04287	2,19039	1,88028	0,30730	0,26357	0,08156	0,18197	0,09836	0,07896	0,01939
1:00	1,98911	0,02812	1,96033	1,68834	0,26972	0,23144	0,07140	0,16001	0,08685	0,07106	0,01579
2:00	1,85059	0,02615	1,82387	1,57003	0,25190	0,21632	0,06639	0,14990	0,08188	0,06609	0,01579
3:00	1,91993	0,02713	1,89219	1,62914	0,26099	0,22405	0,06890	0,15513	0,08452	0,06812	0,01639
4:00	1,73073	0,02446	1,70579	1,46860	0,23555	0,20227	0,06208	0,14017	0,07655	0,06178	0,01477
5:00	1,74164	0,02461	1,71655	1,47787	0,23704	0,20356	0,06248	0,14105	0,07705	0,06218	0,01487
6:00	1,67993	0,02373	1,65576	1,42564	0,22863	0,19634	0,06027	0,13604	0,07433	0,05999	0,01434
7:00	2,03788	0,02396	2,01324	1,82109	0,18983	0,16991	0,03894	0,13095	0,07564	0,06433	0,01131
8:00	2,26180	0,02759	2,23333	2,08012	0,15019	0,13663	0,02873	0,10788	0,06030	0,05211	0,00819
9:00	2,27843	0,00992	2,26754	2,24299	0,02123	0,03025	-0,00431	0,03456	0,00105	0,00322	-0,00217
10:00	2,22827	-0,00145	2,22874	2,27731	-0,05196	-0,03047	-0,02282	-0,00766	-0,03240	-0,02445	-0,00795
11:00	2,29729	-0,01079	2,30701	2,41419	-0,11091	-0,07980	-0,03825	-0,04156	-0,06192	-0,04961	-0,01231
12:00	2,48208	-0,01222	2,49310	2,61025	-0,12134	-0,08862	-0,04155	-0,04708	-0,06935	-0,05646	-0,01289
13:00	2,05953	-0,00851	2,06720	2,19215	-0,12786	-0,09100	-0,04493	-0,04608	-0,06696	-0,05459	-0,01238
14:00	2,28038	-0,00060	2,27998	2,35735	-0,08081	-0,05176	-0,03398	-0,01779	-0,04791	-0,03953	-0,00838
15:00	2,35027	0,00722	2,34200	2,36921	-0,03084	-0,01025	-0,02150	0,01124	-0,02552	-0,02112	-0,00440
16:00	2,57177	0,03023	2,54037	2,42103	0,11536	0,11128	0,01485	0,09641	0,03975	0,03253	0,00722
17:00	2,60636	0,03732	2,56779	2,40237	0,16116	0,14923	0,02644	0,12277	0,06058	0,04974	0,01084
18:00	3,01939	0,05493	2,96288	2,68797	0,26955	0,23940	0,05188	0,18749	0,10477	0,08482	0,01995
19:00	2,20853	0,06783	2,13990	1,79799	0,33931	0,29235	0,07588	0,21642	0,12498	0,10365	0,02133
20:00	2,29545	0,07789	2,21673	1,83214	0,38185	0,33287	0,08648	0,24633	0,14751	0,12443	0,02307
21:00	2,31042	0,07903	2,23053	1,83883	0,38887	0,33938	0,09212	0,24720	0,15440	0,13263	0,02175
22:00	2,23672	0,07588	2,16002	1,78084	0,37653	0,32755	0,08828	0,23921	0,14899	0,12789	0,02110
23:00	2,25681	0,07369	2,18230	1,81618	0,36346	0,31549	0,08457	0,23087	0,13794	0,11616	0,02178
0:00	2,06402	0,06868	1,99463	1,68003	0,31228	0,26535	0,08151	0,18380	0,09810	0,07809	0,02001

Elaboração: Piccini (2013)

Anexo VI

FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E TENSÃO DE TODO O SISTEMA APRESENTADOS NO CAPÍTULO IV.

Aqui estão apresentados os gráficos dos fluxos de potência ativa e reativa de todo o sistema apresentados no capítulo IV nos gráficos 4.5, 4.6, 4.8, 4.9 e 4.10.

Também os gráficos das tensões dos secundários dos transformadores de todo o sistema apresentados no capítulo IV nos gráficos 4.7 e 4.12.

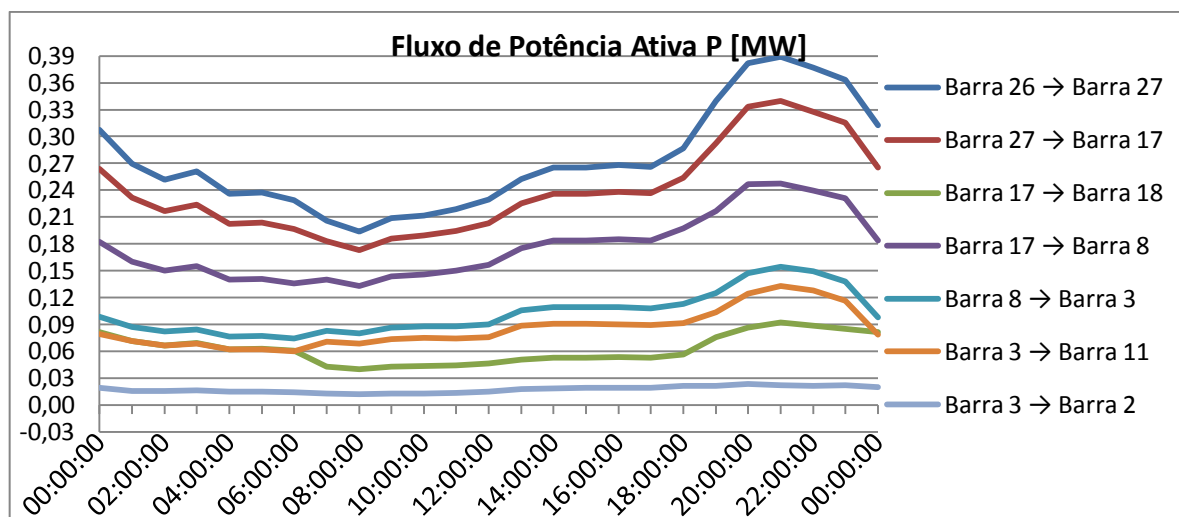


Gráfico - Fluxo de Potência Ativa sem SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

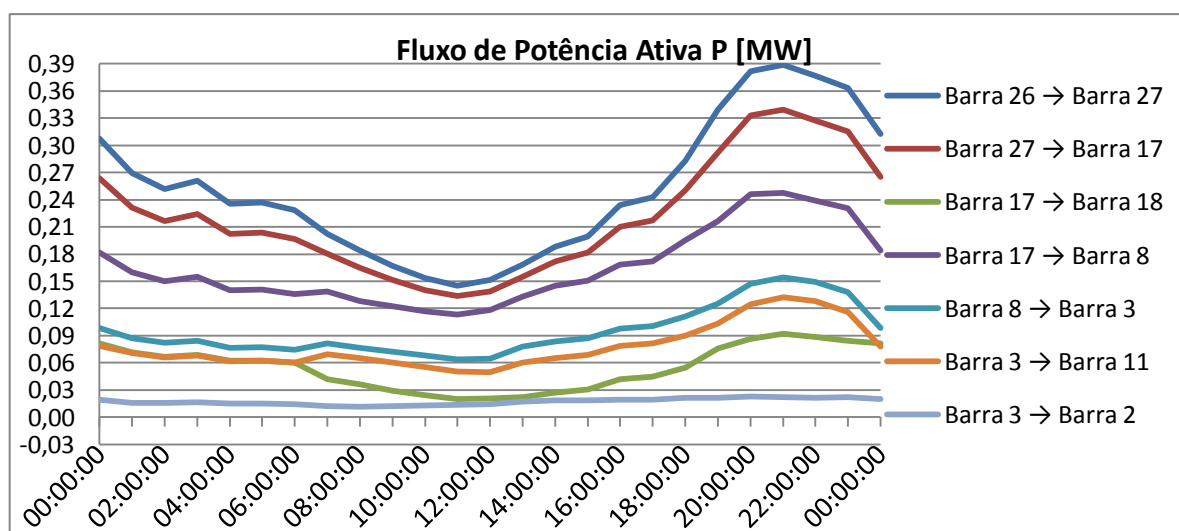


Gráfico - Fluxo de Potência Ativa com 60 SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

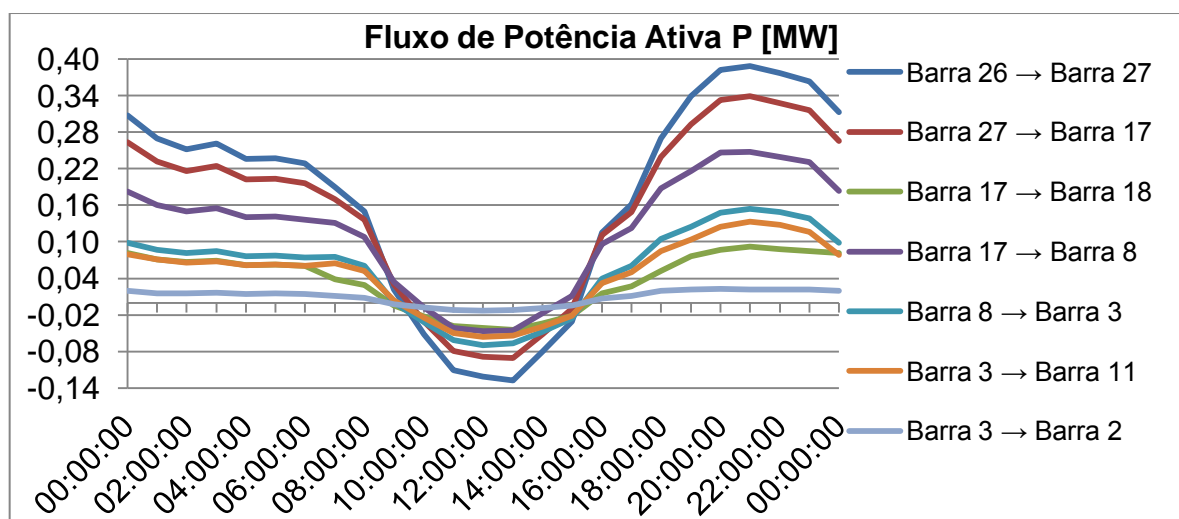


Gráfico - Fluxo de Potência com SFCR, total 50% da potência dos transformadores
Elaboração: Piccini (2013)

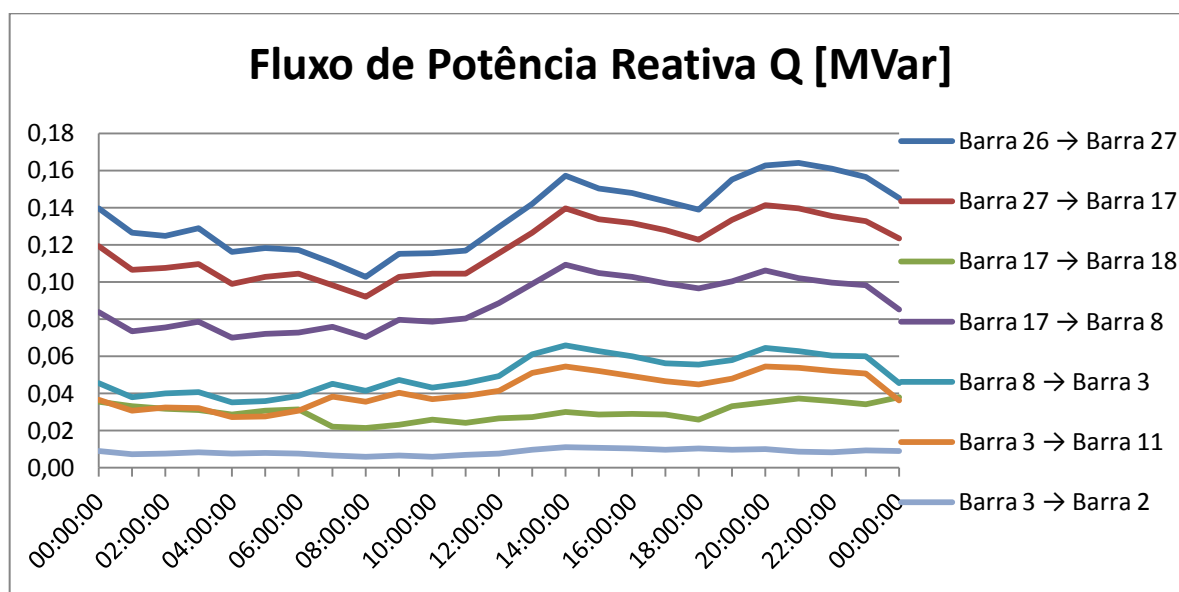


Gráfico - Fluxo de Potência Reativa sem SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

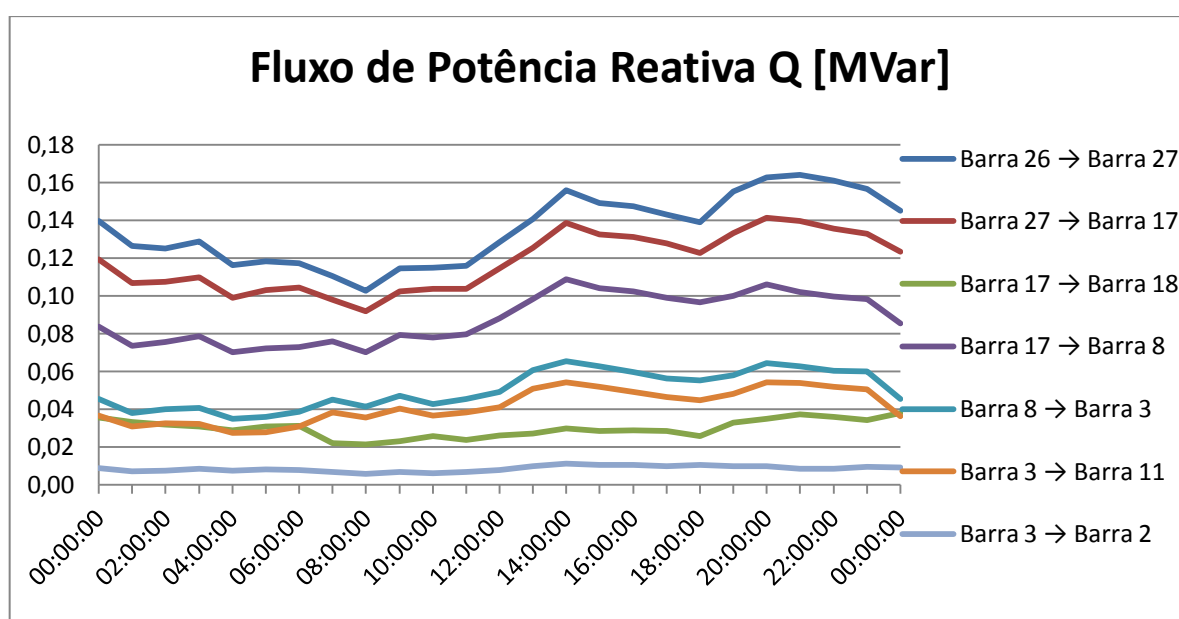


Gráfico - Fluxo de Potência Reativa com 60 SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

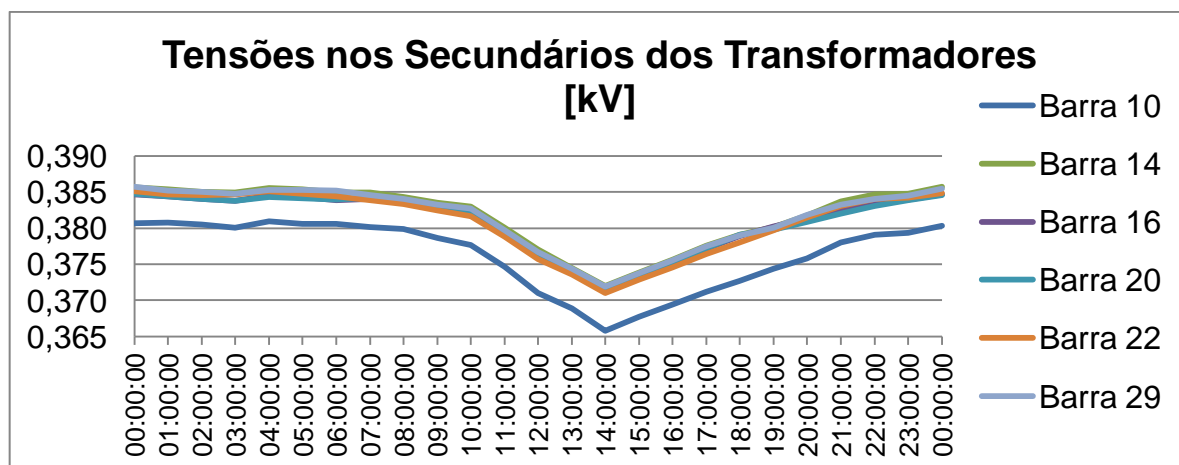


Gráfico - Tensão no Secundário dos Transformadores sem SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

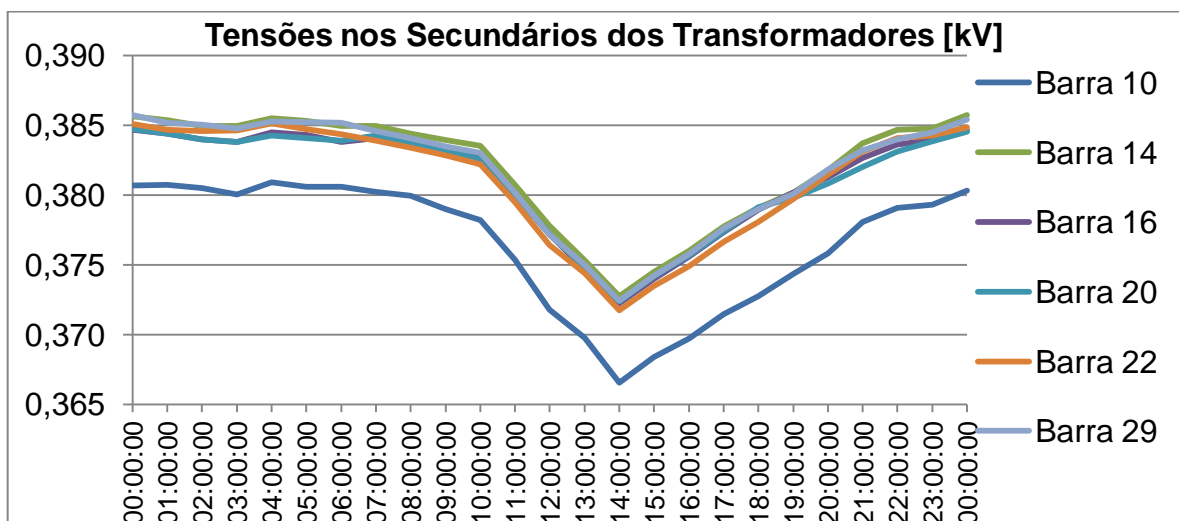


Gráfico - Tensão nos Secundários dos Transformadores com os 60 SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

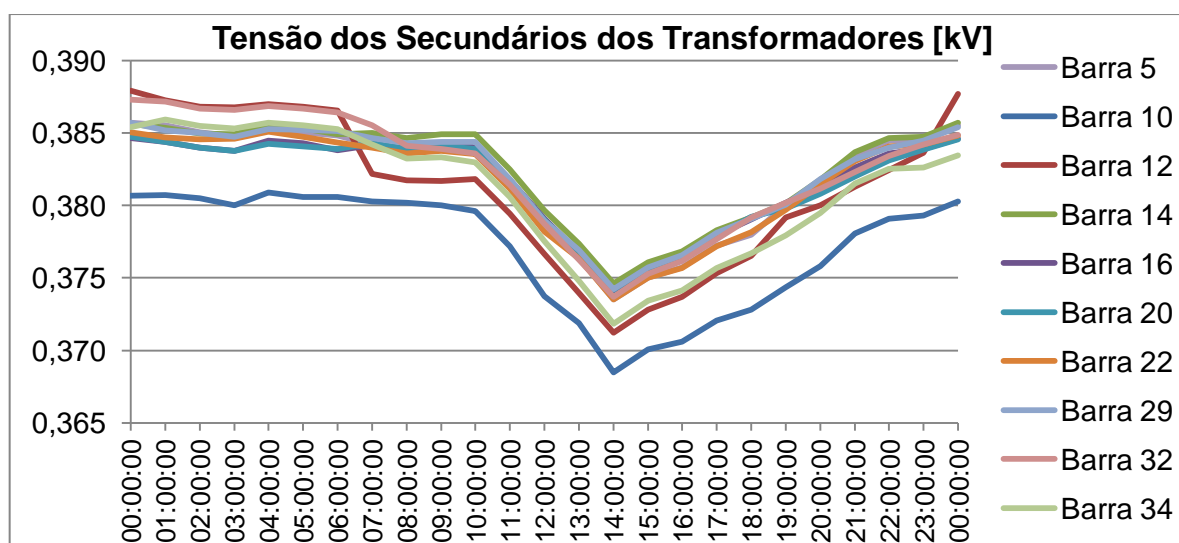


Gráfico - Tensão no secundário dos transformadores com SFCR em 50% da potência dos transformadores
Elaboração: Piccini (2013)

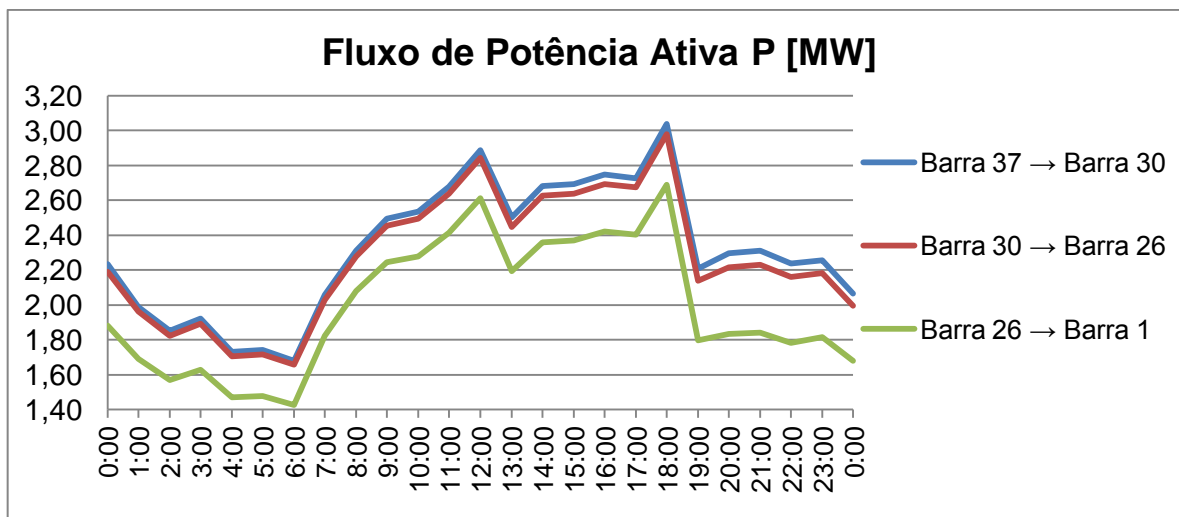


Gráfico - Fluxo de Potência Ativa sem SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

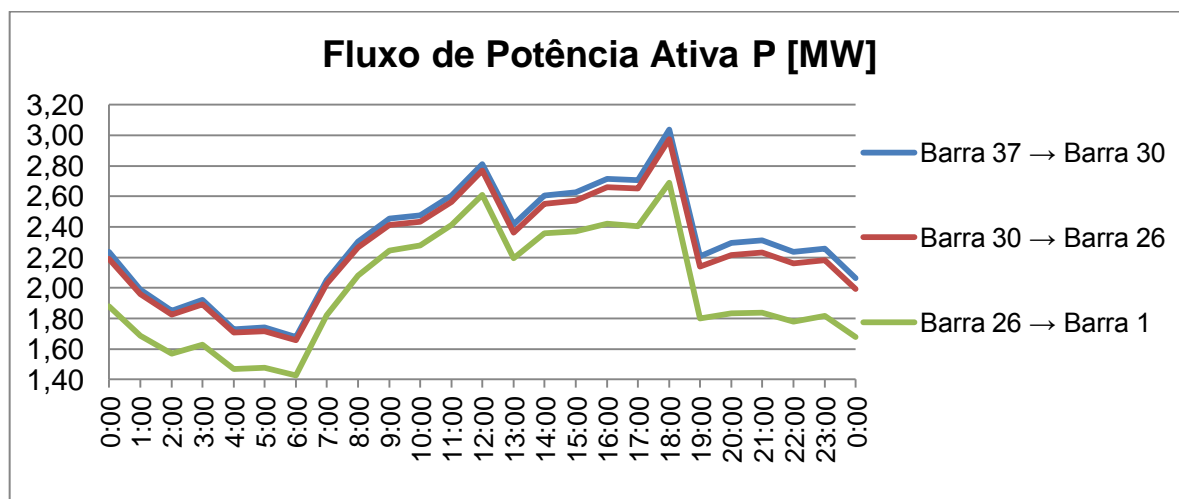


Gráfico - Fluxo de Potência Ativa com 60 SFCR
Elaboração: Piccini (2013)

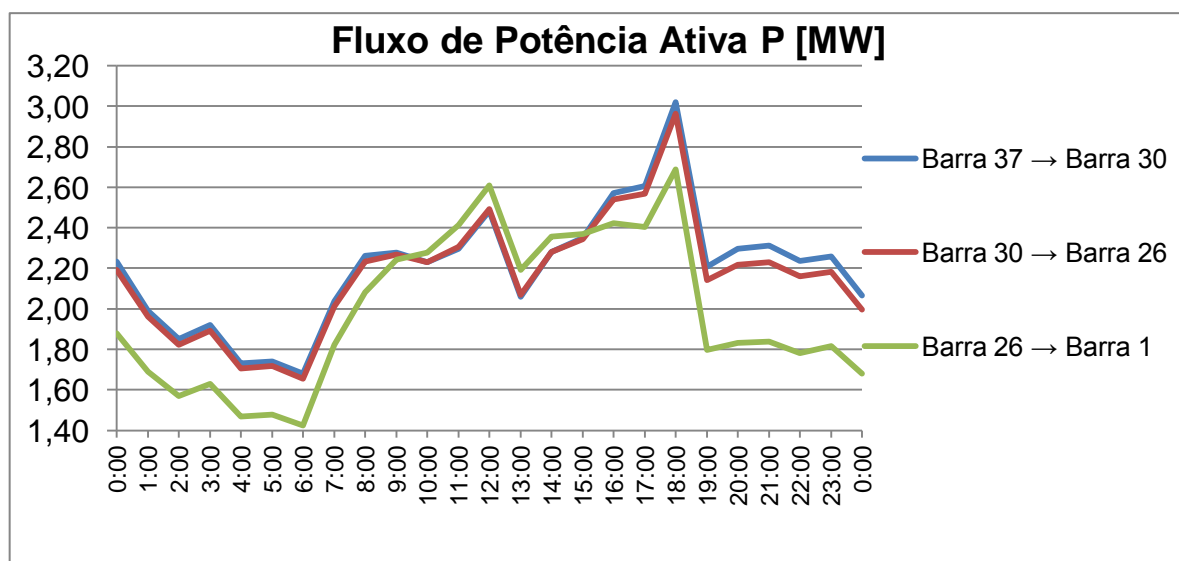


Gráfico - Fluxo de Potência Ativa com SFCR, total 50% da potência dos transformadores
Elaboração: Piccini (2013)