

**Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica**

**Modelagem e Análise de Desempenho de
um Sistema Fotovoltaico em Operação
Isolada e em Paralelo com uma Rede de
Distribuição de Energia Elétrica**

Juliana Aramizu

**São Carlos
2010**

JULIANA ARAMIZU

**Modelagem e Análise de Desempenho de
um Sistema Fotovoltaico em Operação
Isolada e em Paralelo com uma Rede de
Distribuição de Energia Elétrica**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A661m Aramizu, Juliana
 Modelagem e análise de desempenho de um sistema
fotovoltaico em operação isolada e em paralelo com uma
rede de distribuição de energia elétrica / Juliana
Aramizu ; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. -
- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em
Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema de Energia e
Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2010.

1. Energia solar. 2. Fotovoltaica. 3. Meio
ambiente. 4. Energia renovável. 5. Simulação.
6. *SimPowerSystem*. I. Título.

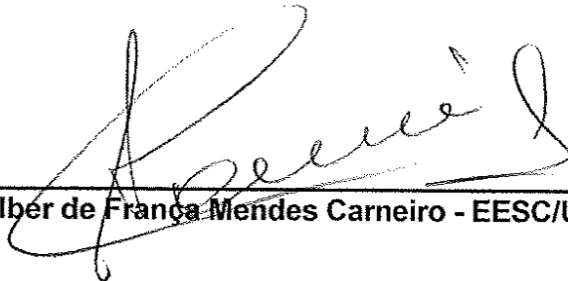
FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Juliana Aramizu

Título: “Modelagem e Análise de Desempenho de um Módulo Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 24/10/10,

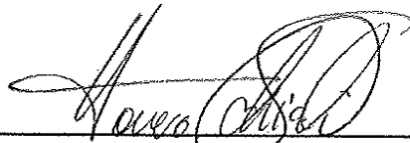
com NOTA 9,3 (nove, três), pela comissão julgadora:



Prof. Dr. Adriano Alber de França Mendes Carneiro - EESC/USP



Prof. Daniel Petean - EESC/USP



Prof. Associado Homero Schiabel
Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica
EESC/USP

Agradecimentos

A Deus, por sempre iluminar meu caminho e por ter me proporcionado uma experiência inesquecível durante estes cinco anos de faculdade.

Aos meus pais, Marcos e Heloisa, que nunca mediram esforços para oferecer o melhor para seus filhos. Por todo amor, carinho e educação, que me transformaram na pessoa que sou hoje.

Aos meus amigos, que foram mais do que simples colegas de classe. Amigos com quem pude conviver e compartilhar conhecimento e momentos de carinho, alegria e amizade. Em especial ao Paulo, que sempre me apoiou, principalmente nos períodos difíceis.

Ao professor e orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior, por seu incentivo e dedicação no desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Por fim, a todos aqueles que me auxiliaram de alguma forma na conclusão desta etapa tão importante de minha vida.

Sumário

Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xiii
Lista de abreviaturas e siglas	xv
Lista de símbolos.....	xvii
Resumo	xix
Abstract.....	xxi
1 Introdução	23
2 Revisão Bibliográfica	29
2.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	29
2.2 CARACTERÍSTICAS DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO	34
2.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO	38
2.4 CLASSIFICAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	41
2.5 PRINCIPAIS APLICAÇÕES.....	44
3 Modelagem computacional de um sistema fotovoltaico.....	45
3.1 O SOFTWARE MATLAB	45
3.2 MÓDULOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	46
3.2.1 <i>Painel fotovoltaico</i>	46
3.2.2 <i>Inversor Controlado via PWM</i>	54
3.2.3 <i>Outros elementos do sistema</i>	58
3.3 REPRESENTAÇÃO DE UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	58
3.4 OPERAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	59
3.4.1 <i>Modelagem do sistema fotovoltaico isolado</i>	60
3.4.2 <i>Modelagem do sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição</i>	61
4 Simulações e análises dos desempenhos	63
4.1 SIMULAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO	64
4.1.1 <i>Caso base</i>	64
4.1.2 <i>Caso 1</i>	66
4.1.3 <i>Caso 2</i>	68
4.1.4 <i>Caso 3</i>	71
4.1.5 <i>Caso 4</i>	74
4.2 ANÁLISES DO DESEMPENHO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO.....	76
4.3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	77
4.3.1 <i>Caso base</i>	78
4.3.2 <i>Caso 1</i>	81
4.3.3 <i>Caso 2</i>	85

4.3.4	<i>Caso 3</i>	90
4.3.5	<i>Caso 4</i>	93
4.4	ANÁLISES DO DESEMPENHO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	97
5	Conclusões	99
	Referências Bibliográficas	101
	Apêndice – Parâmetros elétricos dos sistemas	105

Lista de figuras

Figura 1 – Evolução do mercado brasileiro na área de aquecimento solar	24
Figura 2 – Expansão do uso da energia solar fotovoltaica	25
Figura 3 – “Vila Solar” em Freiburg, Alemanha, com painéis fotovoltaicos	26
Figura 4 – Estádio "Stade De Suisse", na Suíça	26
Figura 5 – Representação de uma célula fotovoltaica	31
Figura 6 – Célula fotovoltaica de silício monocristalina	32
Figura 7 – Célula fotovoltaica de silício policristalina.....	32
Figura 8 – Célula, módulo e painel fotovoltaico.....	33
Figura 9 – Módulo fotovoltaico de célula de silício monocristalina.....	33
Figura 10 – Módulo fotovoltaico de célula de silício policristalina	34
Figura 11 – Corte de um módulo fotovoltaico.....	34
Figura 12 – Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica	35
Figura 13 – Curva da potência em função da tensão para uma célula	36
Figura 14 – Determinação do ponto de máxima potência em uma célula	36
Figura 15 – Curva característica I-V para diferentes valores de irradiação solar	37
Figura 16 – Curva característica I-V para diferentes temperaturas da célula.....	37
Figura 17 – Ligação do controlador de tensão tipo série	39
Figura 18 – Ligação do controlador de tensão tipo <i>shunt</i>	39
Figura 19 – Concentrador solar fotovoltaico.....	41
Figura 20 – Painel solar fotovoltaico com rastreador.....	41
Figura 21 – Diagrama representativo de um sistema fotovoltaico isolado alimentando cargas CC e CA	42
Figura 22 - Diagrama representativo de um sistema fotovoltaico híbrido	43
Figura 23 – Diagrama representativo de um sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica de distribuição.....	43

Figura 24 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	47
Figura 25 – Equação da Tensão V_C	51
Figura 26 – Efeito da temperatura ambiente e do nível de irradiação solar	51
Figura 27 – Determinação da tensão e da corrente de saída na célula fotovoltaica	52
Figura 28 – Modelagem do painel fotovoltaico	53
Figura 29 – Representação de um inversor de frequência para o circuito monofásico	54
Figura 30 – Representação de um inversor de frequência para um circuito trifásico	55
Figura 31 – Representação das formas de onda de um gerador de PWM	56
Figura 32 – Módulo do inversor PWM	57
Figura 33 – Representação de uma rede de distribuição de energia elétrica	59
Figura 34 – Sistema fotovoltaico operando de modo isolado	60
Figura 35 – Sistema fotovoltaico utilizado na operação de conexão com a rede elétrica	61
Figura 36 – Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica	62
Figura 37 – Forma de onda da tensão na carga para o caso base do sistema isolado	65
Figura 38 – Forma de onda da corrente na carga para o caso base do sistema isolado	65
Figura 39 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 1 do sistema isolado	67
Figura 40 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 1 do sistema isolado	68
Figura 41 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 2 do sistema isolado	70
Figura 42 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 2 do sistema isolado	70
Figura 43 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 3 do sistema isolado	72
Figura 44 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 3 do sistema isolado	73
Figura 45 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 4 do sistema isolado	75
Figura 46 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 4 do sistema isolado	75
Figura 47 – Forma de onda da tensão do transformador do sistema fotovoltaico para o caso base do sistema conectado à rede de distribuição	79
Figura 48 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso base do sistema conectado à rede de distribuição	79
Figura 49 – Forma de onda da tensão na carga para o caso base do sistema conectado à rede de distribuição	80

Figura 50 – Forma de onda da corrente na carga para o caso base do sistema conectado à rede de distribuição.....	80
Figura 51 – Forma de onda da tensão no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 1 do sistema conectado à rede de distribuição	83
Figura 52 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 1 do sistema conectado à rede de distribuição	84
Figura 53 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 1 do sistema conectado à rede de distribuição.....	84
Figura 54 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 1 do conectado à rede de distribuição	85
Figura 55 – Forma de onda da tensão no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição	87
Figura 56 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição	88
Figura 57 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição.....	88
Figura 58 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição.....	89
Figura 59 – Forma de onda da tensão no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição	91
Figura 60 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição	92
Figura 61 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição.....	92
Figura 62 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição.....	93
Figura 63 – Forma de onda da tensão no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição	95
Figura 64 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição	96
Figura 65 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição.....	96

Figura 66 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição.....	97
---	----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Combinação para acionamento de IGBTs de um inversor de frequência para um circuito trifásico	55
Tabela 2 – Parâmetros do caso base do sistema isolado	64
Tabela 3 – Resultados do caso base do sistema isolado	64
Tabela 4 – Parâmetros do caso 1 do sistema isolado	66
Tabela 5 – Resultados do caso 1 para T_{x1} do sistema isolado	66
Tabela 6 – Resultados do caso 1 para T_{x2} do sistema isolado	67
Tabela 7 – Parâmetros do caso 2 do sistema isolado	69
Tabela 8 – Resultados do caso 2 para S_{x1} do sistema isolado	69
Tabela 9 – Resultados do caso 2 para S_{x2} do sistema isolado	69
Tabela 10 – Parâmetros do caso 3 do sistema isolado	71
Tabela 11 – Resultados do caso 3 para f_{c1} do sistema isolado	72
Tabela 12 – Resultados do caso 3 para f_{c2} do sistema isolado	72
Tabela 13 – Parâmetros do caso 4 do sistema isolado	74
Tabela 14 – Resultados do caso 4 para m_1 do sistema isolado	74
Tabela 15 – Resultados do caso 4 para m_2 do sistema isolado	74
Tabela 16 – Parâmetros do caso base do sistema conectado à rede de distribuição	78
Tabela 17 – Resultados do caso base do sistema conectado à rede de distribuição	78
Tabela 18 – Parâmetros do caso 1 do sistema conectado à rede de distribuição	81
Tabela 19 – Resultados do caso 1 para T_{x1} do sistema conectado à rede de distribuição ...	82
Tabela 20 – Resultados do caso 1 para T_{x2} do sistema conectado à rede de distribuição ...	82
Tabela 21 – Parâmetros do caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição	85
Tabela 22 – Resultados do caso 2 para S_{x1} do sistema conectado à rede de distribuição ...	86
Tabela 23 – Resultados do caso 2 para S_{x2} do sistema conectado à rede de distribuição ...	86
Tabela 24 – Parâmetros do caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição	90

Tabela 25 – Resultados do caso 3 para f_{C1} do sistema conectado à rede de distribuição	90
Tabela 26 – Resultados do caso 3 para f_{C2} do sistema conectado à rede de distribuição	91
Tabela 27 – Parâmetros do caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição	94
Tabela 28 – Resultados do caso 4 para m_1 do sistema conectado à rede de distribuição	94
Tabela 29 – Resultados do caso 4 para m_2 do sistema conectado à rede de distribuição	94
Tabela 30 – Parâmetros da fonte de tensão controlada	105
Tabela 31 – Parâmetros do atraso	105
Tabela 32 – Parâmetros do inversor	105
Tabela 33 – Parâmetros do gerador discreto PWM.....	106
Tabela 34 – Parâmetros do filtro LC indutor.....	106
Tabela 35 – Parâmetros do filtro LC capacitor	106
Tabela 36 – Parâmetros da Rede da Concessionária.	106
Tabela 37 – Parâmetros do Transformador da Subestação.	107
Tabela 38 – Impedâncias de Seqüência (+) / (-) e (o) dos cabos.	107
Tabela 39 – Comprimento das Linhas do Sistema da rede elétrica em Km.....	107
Tabela 40 – Parâmetros do Transformador TR1	107
Tabela 41 – Parâmetros do Transformador TR2.....	108
Tabela 42 – Valores das Cargas do Sistema da rede elétrica.	108
Tabela 43 – Parâmetros do transformador trifásico.....	108
Tabela 44 – Parâmetros da carga CA.....	109
Tabela 45 – Parâmetros do gerador discreto PWM no sistema interligado	109
Tabela 46 – Parâmetros do transformador do sistema fotovoltaico (TRSF)	109
Tabela 47 – Parâmetros da carga CA no sistema interligado.....	110

Lista de abreviaturas e siglas

ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DASOL	Departamento Nacional de Aquecimento Solar
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IGBTs	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> , ou transistor bipolar de porta isolada
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
PWM	Pulse Width Modulated
SE	Subestação

Lista de símbolos

α_S	Grau de inclinação da reta que representa o comportamento da temperatura de operação da célula em função da irradiação solar
β_T	Constante igual a 0,004
γ_T	Constante igual a 0,06
A	ampére
C	Constante de ajuste
C_I	Fator de correção da fotocorrente
C_{SI}	Fator de correção da corrente para a variação do nível de irradiação solar
C_{SV}	Fator de correção da tensão para a variação do nível de irradiação solar
C_{TI}	Fator de correção da corrente para a variação de temperatura ambiente
C_{TV}	Fator de correção da tensão para a variação de temperatura ambiente
C_V	Fator de correção da tensão de saída da célula
D	Diodo que representa a junção PN da célula fotovoltaica
DHI_T	Distorção harmônica total da corrente, em %
DHV_T	Distorção harmônica total da tensão, em %
f_C	Freqüência da onda $v_C(t)$, em Hz
f_M	Freqüência da onda $v_R(t)$, em Hz
I_0	Corrente de saturação do diodo, em A
I_1	Corrente na freqüência fundamental ($n=0$), em A
I_C	Corrente de saída de uma célula fotovoltaica, em A
I_D	Corrente que circula pela junção PN (diodo), em A
I_{MP}	Corrente de máxima potência, em A
I_N	Corrente harmônica de ordem n, em A
I_{Ph}	Fotocorrente, em A
I_{SC}	Corrente de curto circuito, em A
k	Constante de Boltzmann, em $J/^\circ K$
m	Índice de modulação, responsável pela determinação da largura dos pulsos e o valor da tensão eficaz na saída do inversor PWM
n	Constante que depende do material e da estrutura física do diodo

N	Responsável pela determinação do número de pulsos em cada semiciclo da tensão de saída do inversor PWM
P_M	Potência máxima, em W
q	Carga elétrica, em C
R_S	Resistência representante das quedas de tensão no interior da célula, em Ω
S_C	Irradiação solar de referência
SimPowerSystems	Extensão do Simulink que possui ferramentas para análise de sistemas de energia elétrica
S_X	Novo nível de irradiação solar, W/m^2
T_A	Temperatura ambiente, em $^{\circ}C$
T_C	Temperatura de referência da operação da célula, em $^{\circ}C$
T_X	Nova temperatura ambiente, em $^{\circ}C$
V	volt
V_1	Tensão na frequência fundamental ($n=0$), em V
V_C	Amplitude da onda $v_C(t)$, em V
V_C	Tensão de saída da célula fotovoltaica, em V
$v_C(t)$	Onda portadora do inversor PWM, em V
V_D	Tensão no diodo, em V
V_M	Amplitude da onda $v_R(t)$, em V
V_{MP}	Tensão de máxima potência, em V
V_N	Tensão harmônica de ordem n , em V
V_{OC}	Tensão de circuito aberto, em V
$v_R(t)$	Sinal de referência do inversor PWM, em V
W	watt

Resumo

ARAMIZU, J. **Modelagem e Análise de Desempenho de um Sistema Fotovoltaico em Operação Isolada e em Paralelo com uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. 2010. 110p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

A eletricidade é um fator importante no cotidiano da sociedade, e a cada dia o consumo desta vem aumentando. Além deste fato, há também a preocupação atual com a preservação do meio ambiente. Com o objetivo de suprir esta crescente demanda energética, e reduzir os impactos ambientais, vários investimentos estão sendo direcionados para as fontes alternativas de energia. Muitas empresas estão aplicando o conceito de desenvolvimento sustentável, adotando atitudes e políticas ecologicamente corretas.

A energia solar, renovável e limpa, é uma dessas alternativas para gerar eletricidade. Apesar de seu custo elevado, muitos países já têm adotado a energia solar em diversas aplicações.

A conversão da luz solar em energia elétrica é realizada através de um sistema fotovoltaico. Esse pode operar em três modos: isolado, conectado à rede de distribuição de energia elétrica ou híbrido (operando com outras fontes de geração de energia).

Este trabalho apresenta a modelagem de um sistema fotovoltaico operando nos dois primeiros modos. O objetivo é verificar sua atuação, em cada caso, no fornecimento de energia para uma determinada carga. Para isso, foi realizada a implementação e a simulação de cada modo de operação no SimPowerSystems, parte integrante do *software* MATLAB.

Foi realizada a variação de alguns parâmetros, como temperatura ambiente e nível de irradiação solar, para verificar o impacto que estes têm sobre as grandezas elétricas que alimentam a carga. Os resultados foram apresentados em gráficos e tabelas para facilitar a comparação dos diferentes comportamentos.

Palavras-chave: energia solar, fotovoltaica, meio ambiente, energia renovável, simulação, SimPowerSystems.

Abstract

ARAMIZU, J. **Modeling and Performance Analysis of a Photovoltaic System in Isolated Operation and in Parallel with a Distribution System Network**. 2010. 110p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Electricity is an important factor on society's everyday life and its consumption has been increasing. Moreover, there is a current concern about the environment preservation as well. In order to supply the growing energy demand, and minimize environmental impacts, several investments have been directed to alternative energy sources. Many companies have applied the sustainable development concept, adopting attitudes and ecological policies.

Solar energy, renewable and clean, is one of those alternatives to generate electricity. Despite high costs, several countries have adopted the solar energy in different applications.

The process of converting sunlight into electrical energy needs a photovoltaic system. That system can operate in three different conditions: isolated, connected to the distribution system network, or hybrid (together with other energy generation sources).

This research presents a modeling of a photovoltaic system operating in the first two operating modes. The purpose is to evaluate its performance, in each case, on providing energy for a determined load. For that, an implementation and simulation for each operation mode were done using SimPowerSystems, a toolbox of MATLAB.

Some parameters were varied, such as ambient temperature and solar irradiation level, to analyze their impacts on the load.

The results have been presented on graphics and tables in order to facilitate the comparison among different situations.

Keywords: *solar energy, photovoltaic, environment, renewable energy, simulation, SimPowerSystems.*

1 Introdução

Nas últimas décadas, empresas de diversos setores sentiram a necessidade de se mobilizar e adotar novas políticas, em decorrência da conscientização ambiental. A preocupação com o meio ambiente vem crescendo a cada ano, e a cobrança não é só do governo, mas em grande parte dos consumidores. O governo criou leis que obrigam as empresas a ter uma política de gestão ambiental [1] e a sociedade está ficando cada vez mais crítica quando se trata de preservação do ecossistema. Dentro deste contexto, as empresas estão investindo e incentivando pesquisas voltadas para fontes renováveis de energia, redução da emissão de poluentes, reciclagem, entre outras. As empresas estão mudando o foco de “desenvolvimento a qualquer custo” para “desenvolvimento sustentável”.

A questão ambiental atinge todos os setores, inclusive o setor elétrico, que também precisa se adaptar a essa nova situação. A energia elétrica sempre desempenhou um papel mundial de suma importância, seja para uso residencial, comercial ou industrial, pois se caracteriza como um insumo básico para o desenvolvimento econômico, tecnológico e social dos países. Porém, a cada dia, a necessidade e a dependência da eletricidade aumentam, assim como a preocupação de como suprir a crescente demanda de energia elétrica de maneira sustentável. Esse fato tem incentivado muitas empresas a investir no desenvolvimento e/ou melhoramento tecnológico da geração de energia, aplicando fontes convencionais ou alternativas. Um exemplo é a EDP Bandeirante, que além de possuir vários certificados de sustentabilidade, possui uma seção exclusiva para energia renovável [2]. O uso consciente da energia elétrica também é importante e deve ser estimulado. O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) foi criado com esse objetivo, e vem auxiliando na redução do desperdício de energia elétrica no país. A empresa responsável por esse programa é a Eletrobrás [3].

No Brasil, a principal fonte de geração de energia elétrica é a hidráulica, em seguida encontra-se a geração térmica [4]. Como fontes alternativas e renováveis para a geração de energia elétrica observam-se o crescimento do uso da biomassa, dos ventos e da proliferação de pequenas centrais hidroelétricas, todas impulsionadas pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA) [5]. Além disso, há perspectivas de expansão do parque de geração de energia solar fotovoltaica.

A energia solar é a energia proveniente do sol. A radiação solar pode ser utilizada como fonte de energia térmica (para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica) e como fonte de geração de energia elétrica [6]. O emprego como fonte de energia térmica vem sendo muito utilizado em usos residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais etc.). Essa aplicação acarreta uma grande redução

no uso do chuveiro elétrico que, no horário de pico, é um dos grandes responsáveis pelo alto consumo da energia elétrica, exigindo altos investimentos das distribuidoras para suprir essa demanda [7].

O mercado mundial de aquecedores solares começou a crescer a partir da década de 70, mas expandiu significativamente durante a década de 90. Como resultado deste crescimento, houve um aumento substancial de aplicações da tecnologia, da qualidade e confiabilidade e dos modelos de produtos disponíveis.

No Brasil, no ano de 2001, quando a demanda por energia elétrica superou a oferta e houve a necessidade de racionar energia elétrica, o aquecimento solar de água experimentou um crescimento de 80% em relação ao verificado nos anos anteriores [8]. E desde essa época, sua aplicação vem crescendo, como ilustra a Figura 1.

Evolução do Mercado de Aquecimento Solar Brasileiro

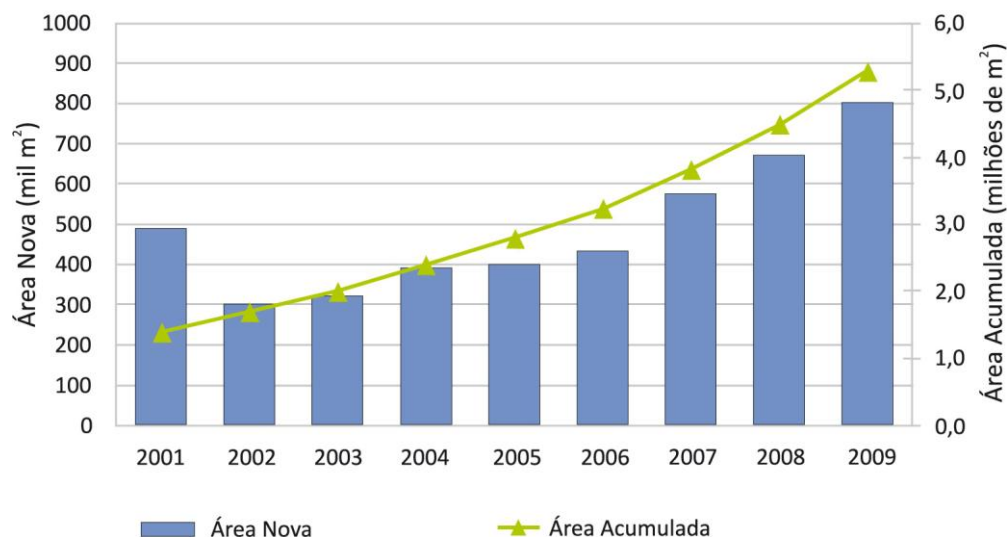


Figura 1 – Evolução do mercado brasileiro na área de aquecimento solar (Fonte: [7])

Na Figura 1, a “Área Nova” corresponde à área ocupada pelos aquecedores solares instalados em cada ano. Já a “Área Acumulada” representa a área total ocupada por todos os aquecedores solares instalados ao longo dos anos.

A outra aplicação da energia solar, foco principal deste trabalho, é a energia solar sendo convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais. Dentre esses efeitos destacam-se o termoelétrico e o fotovoltaico. O primeiro se caracteriza pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada pela junção de dois metais, quando tal junção está a uma temperatura mais elevada do que as outras extremidades dos fios. Embora muito empregado na construção de medidores de temperatura, seu uso comercial para a geração de eletricidade tem sido impossibilitado pelos baixos rendimentos obtidos e pelos custos elevados dos materiais.

O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar (ou outras formas apropriadas de energia). O processo de conversão da radiação solar em energia elétrica ocorre nas chamadas células solares ou fotovoltaicas. Entre os materiais mais adequados para composição dessas células destaca-se o silício [6].

A energia solar fotovoltaica é uma fonte alternativa de energia que não possui grande impacto ambiental, sonoro, visual, não necessita de manutenção, resfriamento, combustível ou grandes construções. A Figura 2 ilustra o crescimento do uso da energia fotovoltaica no mundo de 2000 a 2008.

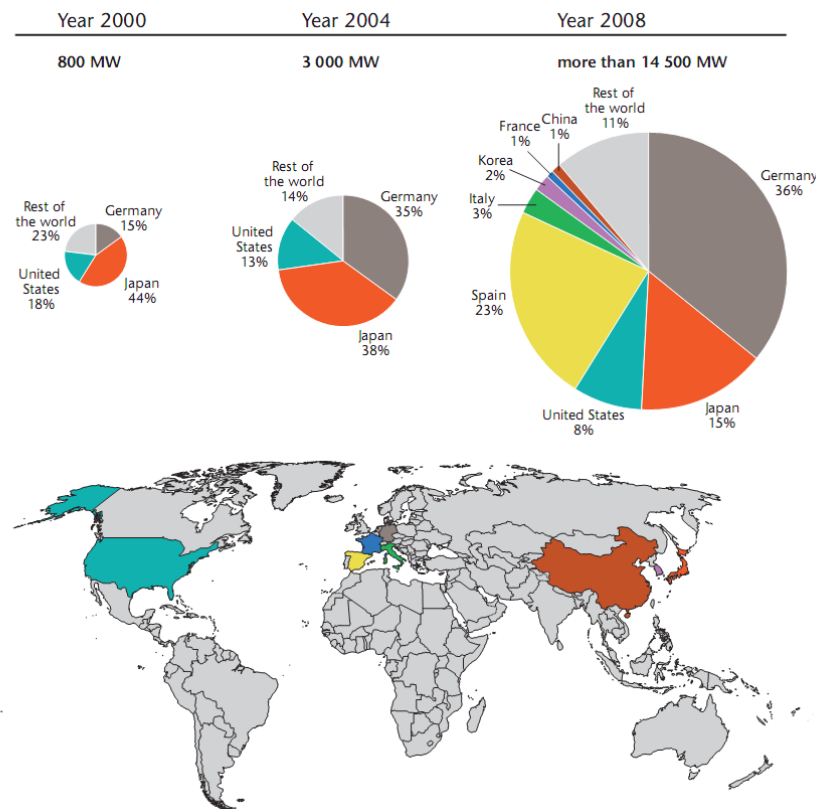


Figura 2 – Expansão do uso da energia solar fotovoltaica (Fonte: [9])

Atualmente, países como Alemanha, Itália, República Tcheca, Estados Unidos da América, Japão, têm realizado um alto investimento em energia solar fotovoltaica. De acordo com o relatório “Solarbuzz 2010”, uma pesquisa de mercado internacional sobre a energia solar, as usinas solares fotovoltaicas no mundo todo atingiram um recorde de 7,3 GW em 2009, um crescimento de 20% em relação ao ano anterior. A indústria fotovoltaica gerou US\$ 38,5 bilhões em receitas globais em 2009 [10].

Uma aplicação interessante, utilizada em alguns países, é a instalação de painéis fotovoltaicos em casas e edifícios. Na Figura 3, tem-se o exemplo de uma vila solar, na Alemanha. E na Figura 4, tem-se o estádio “Stade De Suisse”, localizado na Suíça. Este é

abastecido por mais de 10.000 painéis fotovoltaicos que produzem mais de 1.000GW de eletricidade anualmente.



Figura 3 – “Vila Solar” em Freiburg, Alemanha, com painéis fotovoltaicos (Fonte: [11])



Figura 4 – Estádio "Stade De Suisse", na Suíça (Fonte: [12])

O Brasil possui um enorme potencial de aproveitamento da energia solar, já que todas suas regiões recebem mais de 2200 horas de insolação por ano com um potencial equivalente a 15 trilhões de MWh, correspondente a 50 mil vezes o consumo nacional de eletricidade [8]. O nível de irradiação é extremamente alto, sendo que o pior nível está relacionado ao estado de Santa Catarina, que mesmo assim é 30% maior que a média da Alemanha [7].

Em conseqüência do seu custo elevado e sua baixa eficiência, comparados às fontes convencionais de energia, a energia solar é praticamente inexistente no país. Sua aplicação ocorre principalmente, em áreas remotas e iluminação pública [13]-[16]. No entanto, o uso da energia solar fotovoltaica no Brasil foi reconhecido e publicado, este ano (2010), em um relatório da *International Energy Agency* (IEA). Neste consta que o país é líder no uso de geração fotovoltaica para eletrificação rural, dentre os países em desenvolvimento, e pode ter um papel importante no desenvolvimento e repasse desta tecnologia aos mesmos [9].

De acordo com o relatório “Solarbuzz 2010”, prevê-se que este setor voltará a crescer em 2010, uma situação que deverá manter-se ao longo dos próximos cinco anos. Mesmo no cenário de crescimento mais lento, estima-se que o mercado global terá 2,5 vezes o seu tamanho atual em 2014. Usando a previsão de crescimento mais otimista, o faturamento anual da indústria se aproximará de US\$ 100 bilhões até 2014 [10].

A tecnologia que engloba a energia solar fotovoltaica está sendo aprimorada. Existem muitas pesquisas em todo o mundo, com o objetivo de tornar esta forma de geração de energia mais viável. Há vários estudos com a finalidade de obter a maior eficiência possível das células fotovoltaicas. Recentemente, engenheiros do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), nos EUA, descobriram que usando nanotubos de carbono é possível concentrar a energia solar 100 vezes mais do que uma célula fotovoltaica de silício é capaz de capturar. Com isso, as antenas de nanotubos, quando totalmente desenvolvidas, poderão captar e focalizar a luz solar e permitir a criação de painéis solares menores e muito mais eficientes [17].

Para obter o melhor aproveitamento desta tecnologia, é necessária uma correta implantação do painel fotovoltaico no local. Para isso, é de suma importância a simulação do comportamento do mesmo frente a diversas condições normais e anormais de operação. Isso possibilita avaliar os impactos técnicos que essa fonte causará ao sistema elétrico como um todo, bem como permite prever seu comportamento quando o mesmo estiver sujeito a distúrbios, como curtos-circuitos, chaveamento de grandes blocos de carga, entre outros.

Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso possui como finalidade a implementação de um modelo computacional de um sistema fotovoltaico, para que o mesmo possa ser empregado em simulações tanto para projeto de novos sistemas quanto para a avaliação do desempenho daqueles já existentes.

Este trabalho de conclusão de curso tem os seguintes objetivos:

- Estudar os componentes de um sistema fotovoltaico para a geração de energia elétrica;

- Implementar o modelo computacional desse sistema;
- Analisar o comportamento do modelo computacional do sistema considerando sua operação isolada, e em condições de regime permanente, já que esta é a aplicação mais simples deste sistema;
- Analisar o comportamento do modelo computacional do sistema conectado à uma rede de distribuição de energia elétrica, e em condições de regime permanente, pois esta é uma aplicação importante do sistema.

A estrutura do documento é dividida em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo, foi realizada a introdução do tema estudado. No capítulo 2, são apresentados vários tópicos importantes, com o objetivo de facilitar a compreensão do modelo computacional desenvolvido. Os assuntos que são abordados neste segundo capítulo são: os tipos de células fotovoltaicas existentes, seu princípio de funcionamento, os componentes que compõe um sistema fotovoltaico, algumas aplicações da energia solar fotovoltaica.

No terceiro capítulo, há uma explanação da modelagem desenvolvida para um sistema fotovoltaico, assim como a apresentação do *software* utilizado.

No capítulo 4, são expostas as simulações realizadas no *software* juntamente com a discussão dos resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões a respeito de todo o trabalho desenvolvido.

2 Revisão Bibliográfica

Como foi mencionado no capítulo 1, o efeito fotovoltaico é a geração de energia elétrica a partir da luz solar. O efeito fotovoltaico foi visto pela primeira vez, em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel, que observou que certos materiais produziam pequena quantidade de corrente elétrica quando expostos à luz. O primeiro dispositivo fotovoltaico foi desenvolvido em 1876, porém somente em 1956 que se iniciou sua produção industrial. Esta produção ocorreu devido à “corrida espacial”, que buscava o fornecimento de energia durante os períodos de permanência no espaço e também para a manutenção dos satélites [18].

Um sistema fotovoltaico é composto por diversos componentes, no qual o principal é o painel fotovoltaico. Porém, antes de analisar um painel fotovoltaico, é importante estudar a menor estrutura deste: a célula fotovoltaica.

2.1 Células fotovoltaicas

Além das empresas estimuladas pela “corrida espacial”, existiram outras que também se interessaram pela busca da conversão da luz solar em energia elétrica. As empresas de telecomunicação investiram nesse tipo de tecnologia, com o objetivo de abastecer sistemas instalados em locais remotos.

A crise energética de 1973 ajudou a renovar e ampliar o interesse na aplicação da energia solar, porém o custo das células utilizadas em explorações espaciais era extremamente elevado, tornando aquele tipo de tecnologia inviável para uso terrestre [18].

As células fotovoltaicas são dispositivos formados por material semicondutor, que transformam energia luminosa, proveniente do sol ou de outra fonte de luz, em energia elétrica. Os semicondutores se caracterizam pela presença de duas bandas de energia: a banda de valência (onde existe a presença de elétrons) e a banda de condução (totalmente “vazia”, onde não existem elétrons).

O semicondutor mais usado na fabricação das células é o silício. Seus átomos caracterizam-se por possuírem quatro elétrons, que se interligam, e formam uma rede cristalina. Ao se vincularem a átomos, como o fósforo, por exemplo, que possui cinco elétrons de ligação, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado, e permanecerá sozinho. Este elétron isolado possuirá uma fraca ligação com o átomo de origem, bastando um pouco de energia térmica, para que o mesmo se livre, e migre para a

banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante N ou impureza N.

Pode-se introduzir também, átomos com apenas três elétrons de ligação, como, por exemplo, o boro. Neste caso, faltará um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e, com pouca energia térmica, um elétron de um espaço vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Desta forma, denomina-se o boro como um aceitador de elétrons ou um dopante P.

Colocando-se átomos de boro em uma metade de um silício puro e átomos de fósforo na outra metade, será formado o que se chama junção PN. Nessa junção, elétrons livres do lado N passam para o lado P, onde encontram os buracos que os capturam. Esse fato acarreta em um acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado N, que o faz eletricamente positivo. Essas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado N para o lado P. Esse processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado N.

Se uma junção PN for exposta a fótons com energia maior que a energia de *gap* (energia mínima necessária para que um elétron desloque-se da banda de valência à banda de condução), ocorrerá a geração de pares de elétrons e lacunas. Se isso acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, e conseqüentemente haverá uma corrente através da junção. O efeito fotovoltaico é esse deslocamento de cargas, ocasionado por uma diferença de potencial. Portanto, se as duas extremidades do silício fossem conectadas por um fio, haveria uma circulação de elétrons [18].

A base do funcionamento das células fotovoltaicas é dada pelo processo descrito anteriormente. Na Figura 5, tem-se a ilustração da estrutura de uma célula.

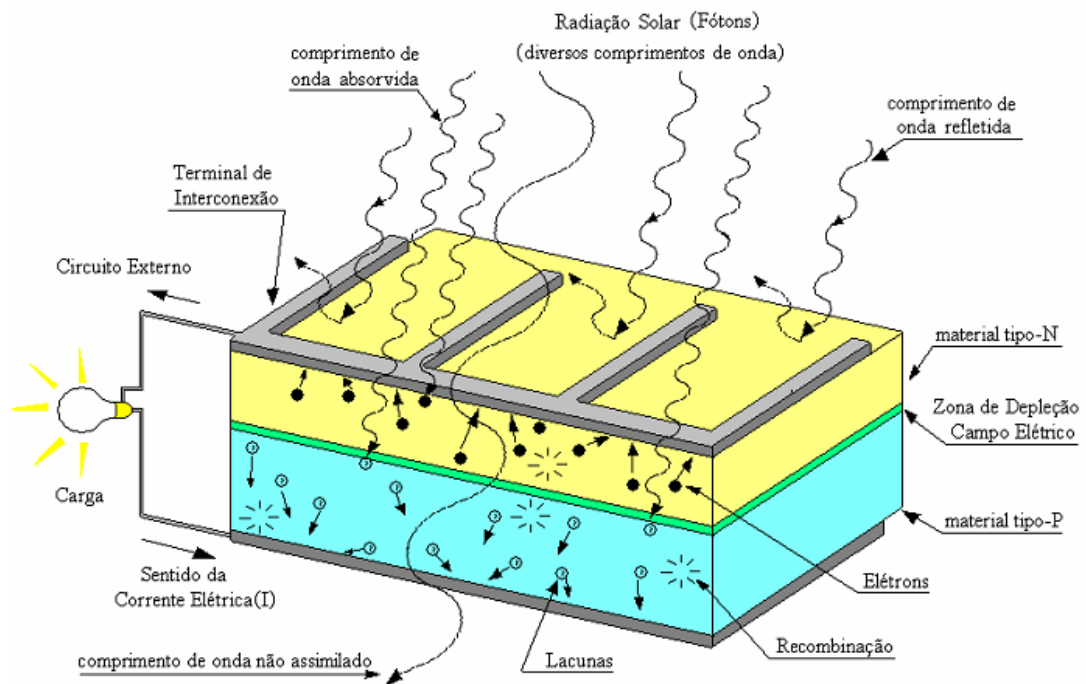


Figura 5 – Representação de uma célula fotovoltaica (Fonte: [19])

Como foi mencionado anteriormente, o material mais utilizado na construção das células é o silício, segundo elemento mais abundante no globo terrestre. Sendo assim, têm-se três tipos de células, desse material, disponíveis no mercado:

- Células de silício monocristalinas;
- Células de silício policristalinas;
- Células de silício amorfo.

As células de silício monocristalinas são cerca de 2% mais eficientes que as policristalinas, contudo estas últimas são mais baratas, já que exigem um processo de preparação das células menos rigoroso. Quanto às células de silício amorfo, estas possuem uma eficiência menor, e necessitam de uma área de instalação maior. Por outro lado, possuem um processo de fabricação simples e barato, e são mais resistentes ao efeito do sombreamento e altas temperaturas [20].

Na 25ª Conferência Europeia de Energia Fotovoltaica, realizada em Valência (Espanha), a IMEC apresentou várias células policristalinas, para painéis solares, cuja eficiência de conversão atinge os 19%. A IMEC é uma das mais importantes empresas de pesquisa na área da nanoeletrônica [21]. Esse valor supera os apresentados há alguns

anos, em que as eficiências para células de silício policristalinas variavam na faixa de 13% a 15%.

A Figura 6 e a Figura 7, apresentam as células fotovoltaicas de silício mono e policristalina, respectivamente:



Figura 6 – Célula fotovoltaica de silício monocristalina (Fonte: [22])

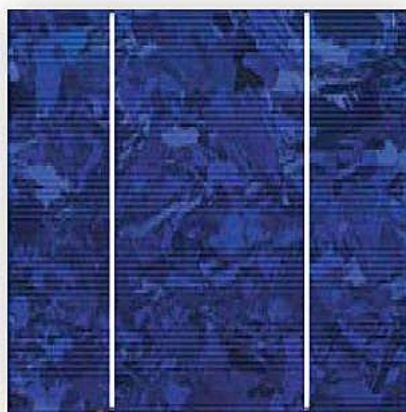


Figura 7 – Célula fotovoltaica de silício policristalina (Fonte: [22])

Além das células feitas de silício, existem também as células feitas de Gálio Arsênio (GaAs). Esse material é utilizado para a produção das células de alta eficiência, usado especialmente na tecnologia espacial. As células estudadas em laboratório chegam a atingir eficiências entre 25% e 28%, porém, este tipo de célula possui um custo mais elevado. Outro tipo de tecnologia existente é a de película fina de Cobre Índio Deselenio (CuInSe_2 , ou CIS). A célula relativa a este caso é composta por um filme fino de material policristalino, que experimentalmente chega aos 17% de eficiência. Módulos de grandes dimensões atingem 11% [23].

Atualmente, existem outras tecnologias de células solares sendo desenvolvidas, principalmente, para reduzir os custos ou aumentar a eficiência da geração da energia fotovoltaica. Mas a ciência ainda encontra o grande impasse: se há o aumento da eficiência,

há a elevação do custo. Assim sendo, as aplicações de células solares fotovoltaicas ainda concentram-se no uso de células de silício.

Uma única célula de silício produz uma corrente CC entre 3A e 5A e uma tensão de saída de aproximadamente 0,7V. Por esse motivo é necessário agrupar várias células em série e/ou paralelo para que os valores de tensão e corrente sejam adequados às aplicações desejadas. A combinação de células em série e/ou paralelo forma um módulo fotovoltaico, e a combinação destes módulos, também em série e/ou paralelo, dão origem ao painel fotovoltaico, como ilustra a Figura 8.

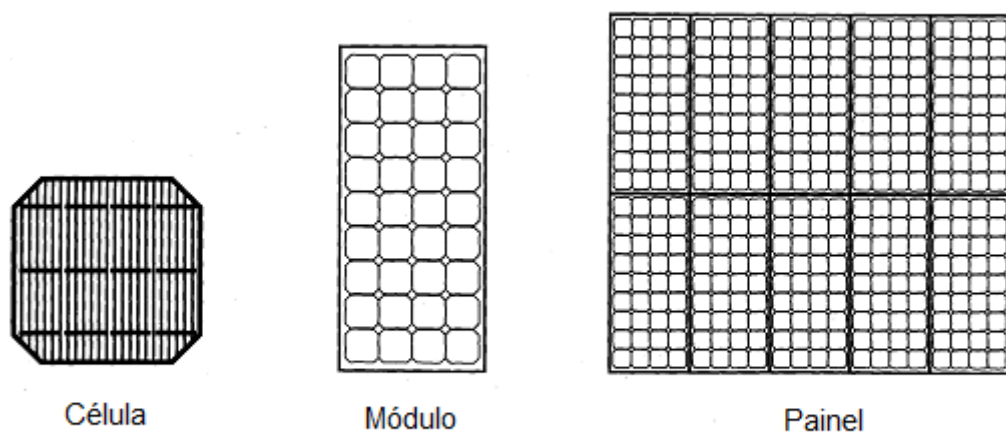


Figura 8 – Célula, módulo e painel fotovoltaico (Fonte: [25])

A seguir, têm-se as ilustrações de módulos fotovoltaicos fabricados com células de silício mono e policristalina. Essas são apresentadas na Figura 9 e na Figura 10, respectivamente.



Figura 9 – Módulo fotovoltaico de célula de silício monocristalina (Fonte: [22])

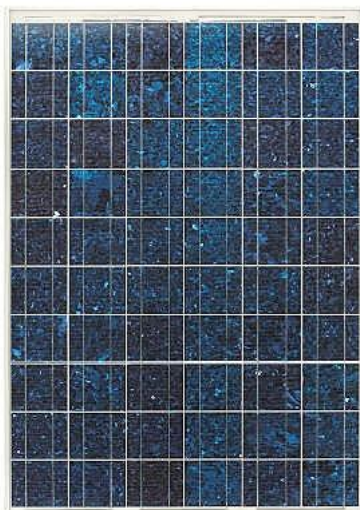


Figura 10 – Módulo fotovoltaico de célula de silício policristalina (Fonte: [22])

2.2 Características de um módulo fotovoltaico

A construção de um módulo fotovoltaico, geralmente, é dada como ilustra a Figura 11:

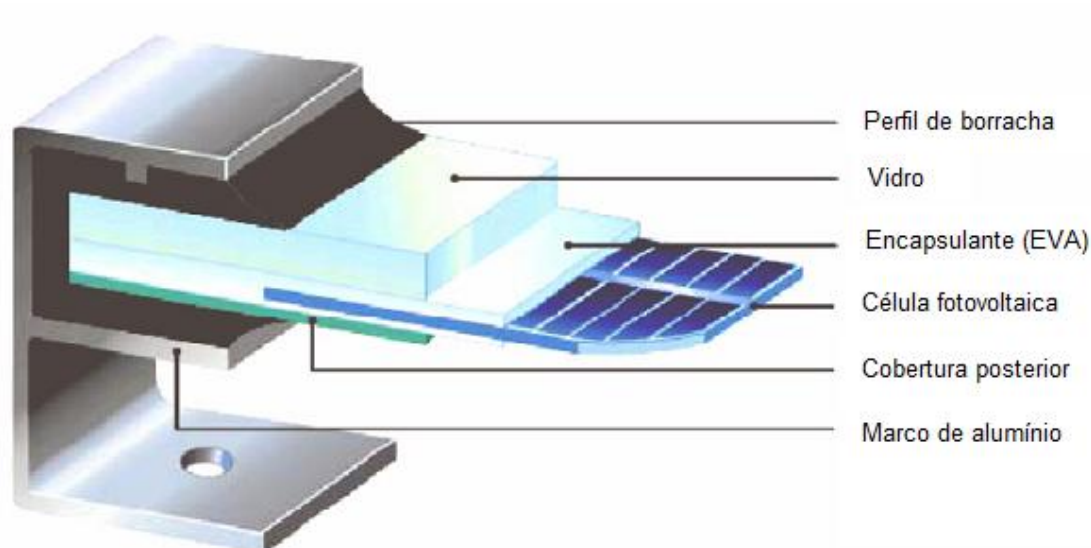


Figura 11 – Corte de um módulo fotovoltaico (Fonte: [24])

A característica de um módulo fotovoltaico, normalmente, é dada por sua potência máxima (P_M). Devido a isso, este valor acaba sendo considerado o mais importante, quando se trata de caracterizar um determinado módulo. Porém, há outros parâmetros que também apresentam a funcionalidade do mesmo e que devem ser considerados. Estes são:

- Tensão de circuito aberto (V_{OC});
- Corrente de curto-circuito (I_{SC});
- Tensão de máxima potência (V_{MP});
- Corrente de máxima potência (I_{MP}).

A apresentação desses parâmetros é realizada graficamente para uma única célula fotovoltaica. Na Figura 12, tem-se uma típica curva característica I-V de uma célula fotovoltaica. Nesta, podem ser observados os parâmetros I_{SC} e V_{OC} . Na Figura 13 é apresentado o comportamento da potência em função da tensão. E na Figura 14, verifica-se o ponto de máxima potência e, conseqüentemente, os valores de tensão e corrente neste ponto. Essas curvas foram obtidas nas condições padrões: nível de irradiação solar igual a $1000W/m^2$ e temperatura de $25^{\circ}C$ de operação da célula [18].

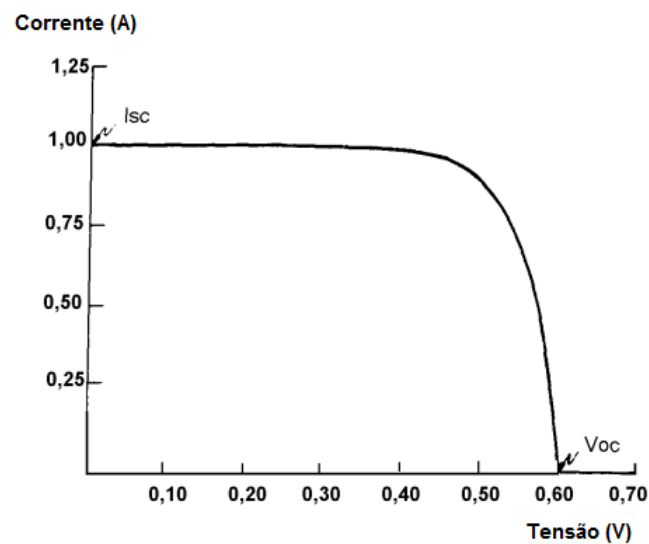


Figura 12 – Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica (Fonte: [18])

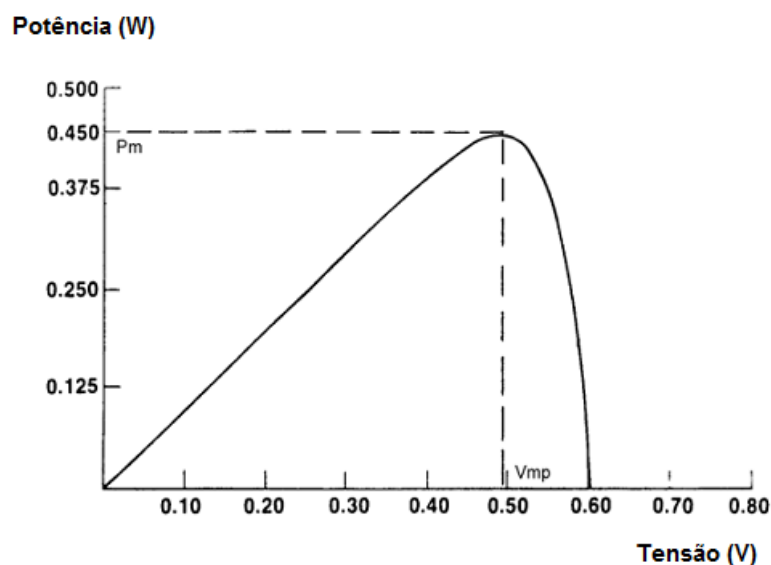


Figura 13 – Curva da potência em função da tensão para uma célula (Fonte: [18])

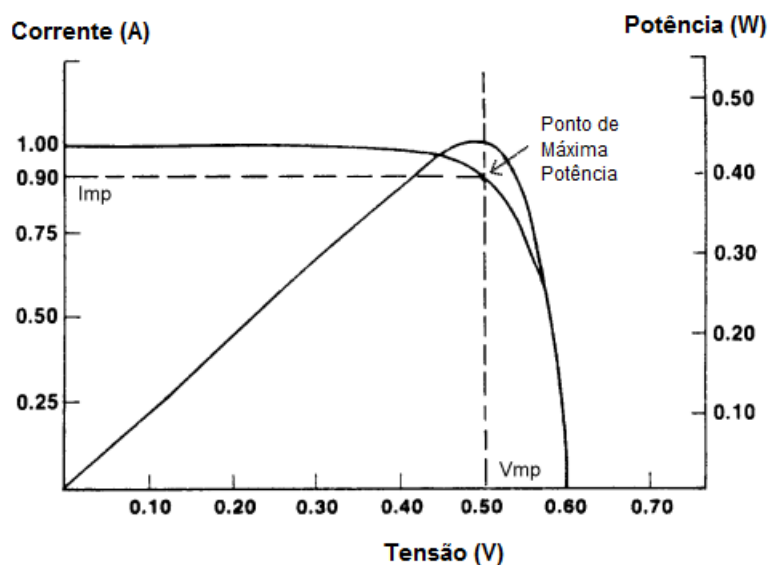


Figura 14 – Determinação do ponto de máxima potência em uma célula (Fonte: [18])

Quando expostos à luz solar, os módulos fotovoltaicos geram energia elétrica em corrente contínua. O desempenho desses depende da temperatura de operação da célula fotovoltaica e do nível de irradiação solar a que os módulos estão sujeitos. Na Figura 15 e na Figura 16, são apresentadas as curvas características I-V do módulo fotovoltaico policristalino da Kyocera, modelo KC 40T, em função dessas variáveis.

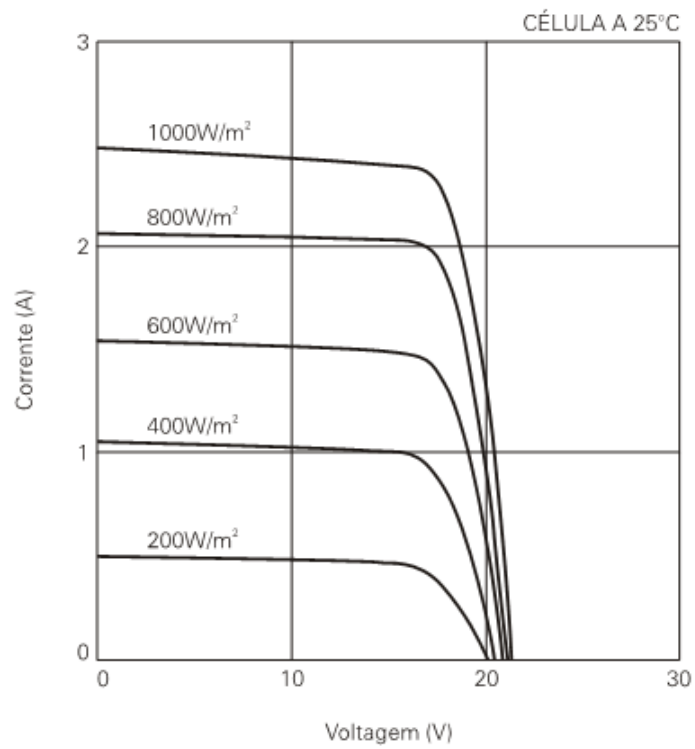


Figura 15 – Curva característica I-V para diferentes valores de irradiação solar (Fonte: [26])

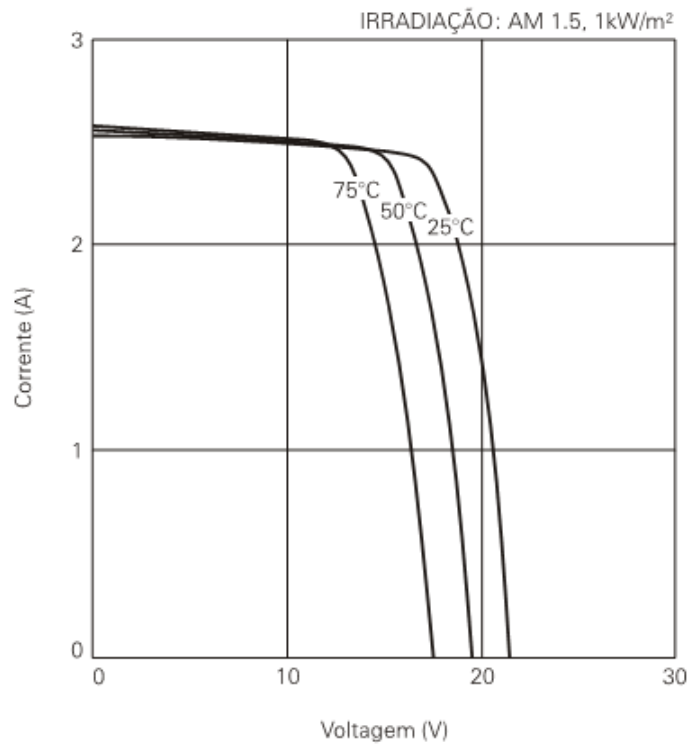


Figura 16 – Curva característica I-V para diferentes temperaturas da célula (Fonte: [26])

2.3 Sistema fotovoltaico

A composição de um sistema fotovoltaico depende do tipo de aplicação que o mesmo terá. Porém, são basicamente cinco itens, além dos painéis, que podem compor os sistemas fotovoltaicos:

- Baterias;
- Reguladores ou controladores de tensão;
- Inversores;
- Choppers;
- Equipamentos de suporte;

As baterias são os elementos armazenadores de energia. A partir destes, é possível alimentar as cargas em condições nas quais não ocorre a produção de energia nos módulos ou painéis solares. Este fato acontece, por exemplo, à noite, ou durante o dia, quando o clima está chuvoso ou nublado. As baterias são classificadas em primárias e secundárias. As baterias primárias são aquelas que não podem ser reutilizadas, uma vez que sua energia já foi esgotada. Já as secundárias são aquelas que podem ser recarregadas através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais. Para os sistemas fotovoltaicos são utilizadas as secundárias [14], e em relação ao tipo de bateria utilizada, opta-se pelas baterias estacionárias (ou baterias de ciclo profundo). Ao contrário das baterias automotivas, as baterias estacionárias podem operar com ciclos diários de carga e descarga profundos, sem que se danifiquem [16].

O controlador de tensão possui uma ligação direta com a bateria. Esse é responsável por controlar a carga que as baterias podem receber ou fornecer. Esta função evita desgastes, ou até mesmo a queima devido a sobrecargas, prolongando assim, a vida útil da bateria. O controlador é composto por dois circuitos: um circuito de controle e um de comutação. O primeiro controla as grandezas do sistema, como tensão, corrente e temperatura na bateria. Essas informações serão utilizadas para comandar o circuito de comutação. Este segundo circuito é composto por chaves semicondutoras que controlam a tensão e/ou a corrente de carga ou de descarga das baterias.

Os controladores de tensão podem conectar a bateria e o painel solar de duas maneiras: em série (tipo série) ou em paralelo (tipo *shunt*). Em ambos os casos, o controlador interrompe o processo de carregamento quando as baterias se encontram

completamente carregadas. Quando a tensão na bateria começa a diminuir, isto é, quando esta é descarregada, as baterias são reconectadas novamente, e reinicia-se o processo.

Na ligação em série, os painéis são desconectados das baterias quando a tensão atinge seu limite, como mostra a Figura 17:

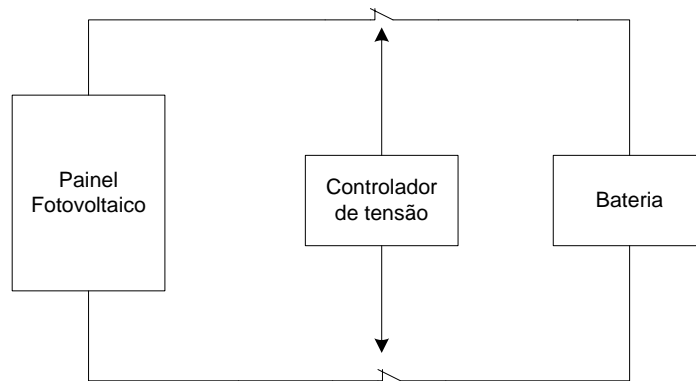


Figura 17 – Ligação do controlador de tensão tipo série (Fonte: [15])

Já na ligação em paralelo, quando a bateria é carregada, além dos painéis serem desconectados da bateria, ocorre também o curto-circuito do painel. Isso se deve ao fato de existir uma chave, nos terminais do painel fotovoltaico, que é fechada quando a tensão na bateria atinge seu limite. A ligação é ilustrada na Figura 18:

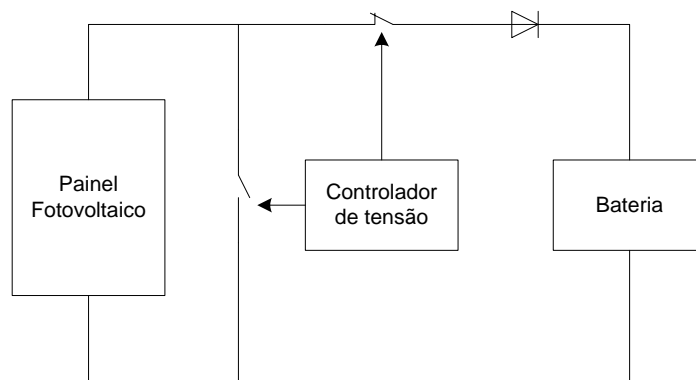


Figura 18 – Ligação do controlador de tensão tipo *shunt* (Fonte: [15])

O inversor, ou conversor CC-CA, é o dispositivo responsável pela conversão de grandezas de corrente contínua (CC), que se encontram na saída do painel solar, em grandezas de corrente alternada (CA). Este tipo de conversão, normalmente, é necessária, já que a maioria dos equipamentos elétricos atuais são alimentados por tensão CA. O

controle deste dispositivo é, geralmente, realizado via modulação por largura de pulso (PWM) [15].

É importante notar que os inversores devem fornecer um sinal adequado para que o funcionamento dos equipamentos alimentados não seja afetado e também para evitar que, quando o sistema fotovoltaico estiver ligado à rede elétrica, a qualidade da tensão não seja prejudicada por harmônicos [15].

A utilização de choppers, ou conversores CC-CC, tem como objetivo elevar ou reduzir uma determinada tensão CC. Muitos sistemas fotovoltaicos não utilizam inversores, já que as cargas que necessitam alimentar são puramente CC. Isso ocorre principalmente em zonas rurais, onde, em alguns casos, a energia solar substitui pilhas e baterias que alimentam aparelhos como rádios, pequenos televisores, etc. [14].

Os equipamentos de suporte são todos aqueles que auxiliam na instalação dos painéis, e que não foram mencionados até o momento. Como exemplos podem-se citar: a fiação utilizada, as estruturas metálicas para suporte dos módulos, as caixas de junção, disjuntores, entre outros equipamentos [26].

Para obter um melhor desempenho de um painel fotovoltaico, podem ser utilizados rastreadores e/ou concentradores solares. Há uma grande quantidade de trabalhos e pesquisas que focam no uso destes utensílios. Em relação aos rastreadores, existem dois tipos: o passivo e o ativo. O tipo passivo funciona através da transferência de massa (Freon normalmente) e o movimento é na direção Leste-Oeste. Este tipo de rastreador possui uma resposta lenta e dependente da temperatura, e não é recomendável o uso de concentradores juntamente com o mesmo [27].

Já o outro tipo de rastreador, o ativo, atua através de motores elétricos, que são controlados por circuitos eletrônicos e sensores. Esse tipo possui uma complexidade maior, porém pode realizar o acompanhamento do sol em um ou dois eixos [27]. Com o uso destes rastreadores, foi obtido um aumento significativo na coleta de energia solar. Em um dos estudos, a média do ganho, para um rastreador solar de um eixo, foi de 36,1% [28].

Na Figura 19 e na Figura 20, são ilustrados painéis solares utilizando concentrador e rastreador solar, respectivamente:



Figura 19 – Concentrador solar fotovoltaico (Fonte: [29])



Figura 20 – Painel solar fotovoltaico com rastreador (Fonte: [27])

2.4 Classificação do sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias:

- Sistema isolado (ou autônomo);
- Sistema híbrido;
- Sistema conectado à rede de distribuição.

Os sistemas isolados, ou autônomos, são aqueles que produzem eletricidade independentemente de outras fontes de energia. Estes podem alimentar cargas de corrente contínua e/ou de corrente alternada, dependendo da aplicação desejada. Neste tipo de operação, pode ser necessário o uso de baterias, e os elementos que irão compor o sistema podem variar de acordo com as necessidades exigidas. Na Figura 21 é apresentado um diagrama que representa a operação de um sistema isolado alimentando cargas CC e CA.

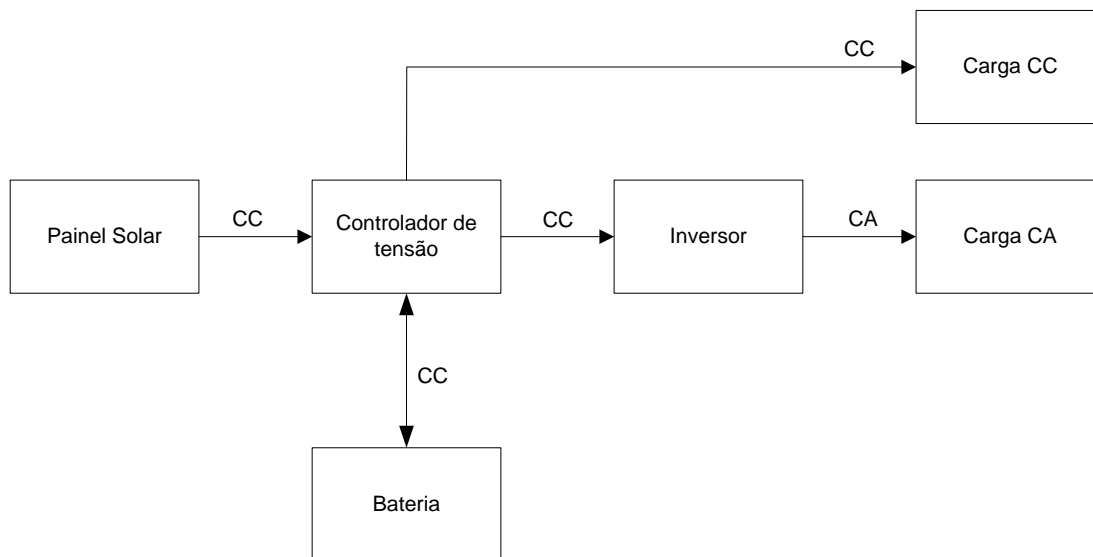


Figura 21 – Diagrama representativo de um sistema fotovoltaico isolado alimentando cargas CC e CA

Os sistemas híbridos são os sistemas isolados operando em conjunto com outros geradores, como os eólicos, a diesel, a gás, a gasolina, etc. Em algumas situações, essa união pode ser mais vantajosa e econômica do que um sistema fotovoltaico operando de forma autônoma, já que acarreta na redução da potência instalada de painéis solares, diminuindo assim, os custos totais [30].

Na Figura 22, há a ilustração da operação de um sistema híbrido, em que a energia solar atua em conjunto com a energia eólica.

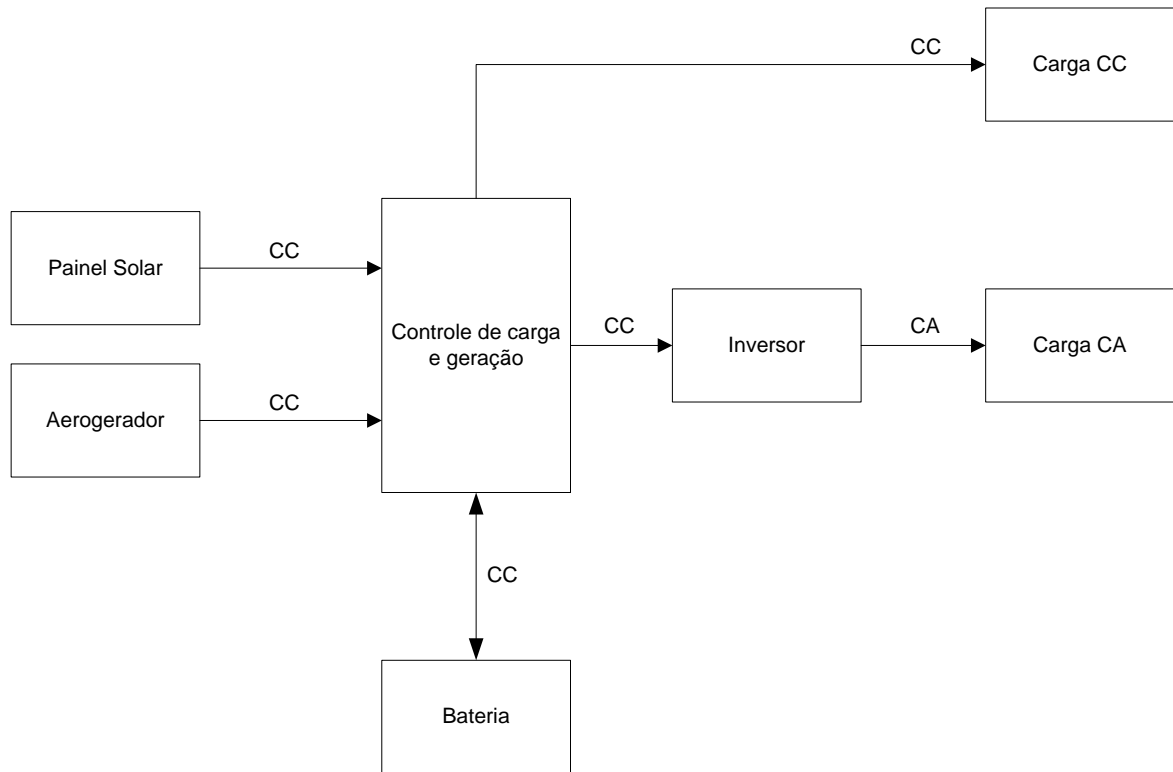


Figura 22 - Diagrama representativo de um sistema fotovoltaico híbrido

O outro modo de operação de um sistema fotovoltaico é o interligado à rede elétrica de distribuição. Neste caso, os painéis fotovoltaicos atuam como uma fonte de energia complementar ao sistema elétrico que estão conectados. Toda energia em excesso, gerada durante o dia, é entregue à rede e, durante a noite ou em períodos nublados, a energia necessária para alimentar as cargas é retirada da mesma. Desta forma, nota-se que o sistema não necessita de um componente para armazenamento de energia [30].

Na Figura 23, tem-se a representação da operação de um sistema interligado à rede elétrica.

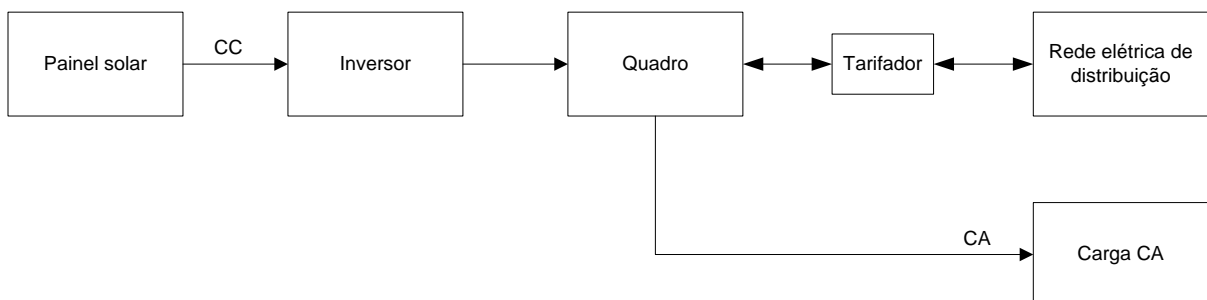


Figura 23 – Diagrama representativo de um sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica de distribuição

2.5 Principais aplicações

A quantidade de aplicações da geração de energia solar fotovoltaica está sendo ampliada. Como as principais formas de uso, podem-se citar: [30]

- Fornecimento de energia para comunidades remotas, que se encontram muito distantes da rede elétrica, ou o acesso é restrito;
- Bombeamento de água;
- Irrigação;
- Fornecimento de energia para estações remotas de telecomunicações, telemetria e para embarcações;
- Iluminação pública de estradas, parques, praças;
- Alimentação de telefones públicos em estradas e comunidades;
- Cercas elétricas;
- Geração distribuída, com o sistema interligado à rede de distribuição;
- Integração dos sistemas fotovoltaicos em edifícios.

Esta última aplicação, atualmente, é quase inexistente no Brasil, porém é muito utilizada em outros países como já foi mencionado no primeiro capítulo. Esta é uma aplicação muito interessante e promissora, já que uma grande desvantagem no uso da geração fotovoltaica é o espaço físico necessário para a instalação dos painéis. Nesse caso, os módulos ou painéis podem ser instalados em fachadas, telhados, etc.

3 Modelagem computacional de um sistema fotovoltaico

Para avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico por meio de simulações no domínio do tempo, primeiramente é necessário determinar o comportamento do painel fotovoltaico que gerará energia para o sistema. Em seguida, é importante escolher o modo como o sistema irá operar, para que sejam colocados todos os componentes necessários para tal aplicação, como baterias, inversores, controladores de tensão, etc.

Os modos de operação do sistema fotovoltaico escolhidos para a realização deste trabalho foram: isolado e interligado à rede de distribuição de energia elétrica. Ambos os modos de operação possuem uso em larga escala nos sistemas elétricos e por isso seus comportamentos devem ser estudados em detalhes. O primeiro modo de operação foi escolhido, pois é comumente empregado para o suprimento de energia elétrica em comunidades isoladas, as quais se localizam em regiões onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica é técnica e economicamente inviável. Em seguida, implementou-se o segundo modo de operação para verificar os impactos do sistema fotovoltaico em uma rede de distribuição de energia elétrica, uma vez que existe uma forte tendência de crescimento da conexão desse tipo de geração nessas redes, principalmente no Brasil [9].

A modelagem inicial do sistema fotovoltaico, operando de forma isolada, foi baseada na modelagem desenvolvida em [31]. Algumas modificações foram necessárias para aprimorar a qualidade dos resultados. É importante ressaltar que determinados parâmetros foram utilizados, visando reproduzir o mesmo tipo de célula utilizada pelo autor do artigo.

Para desenvolver a segunda parte da modelagem, conectou-se um sistema de distribuição de energia elétrica ao modelo desenvolvido para a operação isolada.

Para encontrar os resultados desejados, foi utilizado o *software* MATLAB, mais especificamente o módulo SimPowerSystems, da empresa MathWorks [32].

3.1 O *software* MATLAB

A MathWorks é uma empresa multinacional, que é líder no desenvolvimento de *softwares* computacionais matemáticos, destinados a engenheiros, cientistas, matemáticos e pesquisadores. Entre seus produtos, destacam-se o MATLAB e o Simulink.

O MATLAB é um *software* que possui uma grande aplicação em desenvolvimento de algoritmos, análise de dados, visualização gráfica e computação numérica. O Simulink está

presente dentro do MATLAB e é uma importante ferramenta para modelagem e simulação gráfica de diversos tipos de sistemas.

Dentro do Simulink, existem várias bibliotecas, que englobam várias áreas científicas. Uma destas bibliotecas chama-se SimPowerSystems, que foi a utilizada para o desenvolvimento da modelagem e das simulações do sistema fotovoltaico.

O SimPowerSystems é uma biblioteca que está relacionada à área da engenharia elétrica. Nesta encontram-se, entre muitos outros, elementos para simulação de circuitos elétricos básicos, circuitos digitais, simulações discretas ou contínuas, e até blocos completos para simulação de geração de energia.

Neste trabalho foi utilizada a versão R2009a do MATLAB.

3.2 Módulos do sistema fotovoltaico

Para um melhor entendimento da modelagem dos sistemas fotovoltaicos desenvolvidos, são apresentados, separadamente, os módulos utilizados para a simulação dos sistemas. Tanto para o caso do sistema isolado, quanto para o sistema conectado à rede, não são utilizadas baterias para armazenamento de energia. Conseqüentemente, não é necessário o uso de controladores de tensão. Em relação às cargas, é considerada apenas a carga CA. Dessa forma, os componentes do sistema fotovoltaico se resumem basicamente em: painel fotovoltaico, inversor com controle PWM, filtro na saída do inversor e transformador isolador.

Na operação em que o sistema é interligado à rede de distribuição, tem-se a elaboração de um circuito que possa representar o funcionamento da rede. Este circuito também é apresentado neste capítulo.

3.2.1 Painel fotovoltaico

Para modelar o painel fotovoltaico, inicialmente é necessário determinar o comportamento da menor estrutura do mesmo: a célula fotovoltaica. Para isso, o estudo é baseado no circuito equivalente da Figura 24.

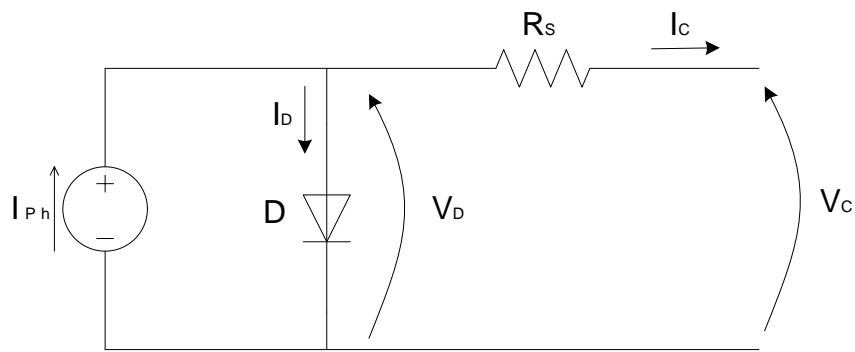


Figura 24 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica

Como pode ser observado, o circuito é simples e possui poucos componentes. A fonte de corrente I_{ph} representa a corrente elétrica gerada através do efeito fotovoltaico, denominada fotocorrente. Seu valor é responsável pelo desempenho do painel fotovoltaico e é diretamente proporcional ao nível de irradiação solar e inversamente proporcional à temperatura de operação da célula [33].

Como foi explicado no capítulo 2, a célula fotovoltaica é fabricada por um material semicondutor, com duas camadas: a P e a N. Essa é exatamente a estrutura de um diodo, este é o motivo do diodo D, em paralelo com a fonte. Este representa a junção PN da célula.

Se o comportamento desejado fosse totalmente ideal, o circuito equivalente da célula seria simplesmente estes dois componentes. Porém, coloca-se o resistor R_s para considerar as perdas devido às quedas de tensão no interior da célula, tais como: perdas por efeito Joule, resistência interna devido ao material (silício), etc.

Em relação às grandezas I_D , V_D , I_c e V_c , estas são, respectivamente: a corrente que passará pelo diodo D, a tensão no diodo, a corrente de saída da célula e a tensão de saída da célula.

Pela Lei dos Nós, sabe-se que:

$$I_{ph} = I_D + I_c \quad (1)$$

A corrente I_D , que passa pelo diodo, é dada pela seguinte equação:

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

Em que I_0 é a corrente de saturação do diodo (0,0002A), q é a carga elétrica ($1,602 \times 10^{-19}C$) e k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}J/^{\circ}K$). O valor de I_0 varia de acordo com

a temperatura de operação e material utilizado na célula. Neste trabalho, o valor de I_0 é admitido segundo [31].

A temperatura T é a temperatura de operação da célula. O valor de referência para essa temperatura, utilizado durante os testes, é de 25°C e é denominado como T_C . Para esse valor de temperatura, tem-se um nível de irradiação solar de referência correspondente igual a 1000W/m^2 , denominado por S_C . Observa-se, que os valores de T_C e S_C são os valores para condições normais de operação.

Trabalhando com a equação (2) e isolando V_D , tem-se:

$$V_D = \frac{k \cdot T_C}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph} - I_C + I_0}{I_0}\right) \quad (3)$$

Aplicando a Lei das Malhas no circuito da Figura 24, tem-se que:

$$V_C = V_D - R_S \cdot I_C \quad (4)$$

Portanto, substituindo (3) em (4), encontra-se:

$$V_C = \frac{k \cdot T_C}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph} - I_C + I_0}{I_0}\right) - R_S \cdot I_C \quad (5)$$

Na equação (5) é acrescentada uma constante C , que tem o objetivo de ajustar o valor da tensão de saída da célula para aproximadamente $0,7\text{V}$. Essa constante depende do tipo e fabricante da célula fotovoltaica utilizada e no caso deste trabalho, seu valor é igual a $2,3144$, baseado em [31]. Desta forma, a tensão de saída da célula é dada por:

$$V_C = \frac{C \cdot k \cdot T_C}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph} - I_C + I_0}{I_0}\right) - R_S \cdot I_C \quad (6)$$

Para as simulações dos comportamentos do sistema fotovoltaico, é considerado, inicialmente, um valor igual a 5A para a fotocorrente, e um valor constante para a resistência R_S igual a $0,001\Omega$.

A equação (6) refere-se à tensão de saída de uma única célula. Para obter o valor da tensão de saída de um painel fotovoltaico, é necessário multiplicar o número de células conectadas em série pelo valor de V_C . Da mesma forma, a corrente I_C é a corrente para uma

única célula. Para determinar a corrente de saída do painel fotovoltaico, deve-se multiplicar o número de células conectadas em paralelo pelo valor de I_C .

Os valores de V_C e I_{Ph} correspondem a determinados valores de S_C e T_C , valores de referência. Se a temperatura de operação da célula e/ou o nível de irradiação solar variar, os valores da tensão de saída e da fotocorrente acompanharão este comportamento. Portanto, na modelagem do painel fotovoltaico, é necessário incluir os efeitos destas variações de temperatura e irradiação solar para verificar o desempenho do mesmo. O método utilizado para incluir estes valores, neste trabalho, foi desenvolvido por Buresch [34].

A temperatura de operação da célula varia em função da temperatura ambiente e do nível de irradiação solar. Portanto, tem-se que a temperatura ambiente (T_A) também é um fator que interfere nos valores de saída de um painel fotovoltaico. O efeito de T_A é incluído na modelagem do painel, através dos seguintes coeficientes de correção:

$$C_{TV} = 1 + \beta_T \cdot (T_A - T_X) \quad (7)$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_C} \cdot (T_X - T_A) \quad (8)$$

Nas expressões (7) e (8), β_T é igual a 0,004 e γ_T é igual a 0,06, para a célula utilizada em [31], e T_X é o novo valor para a temperatura ambiente. A temperatura ambiente de referência T_A , possui o mesmo valor que T_C , igual a 25°C.

Como foi mencionado anteriormente, o nível de irradiação solar interfere na temperatura de operação da célula e no desempenho da mesma. Portanto, sua variação também deve ser considerada na modelagem do painel solar. Sendo assim, a influência do nível de irradiação solar pode ser verificada através dos coeficientes de correção:

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \cdot \alpha_S \cdot (S_X - S_C) \quad (9)$$

$$C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_C} \cdot (S_X - S_C) \quad (10)$$

Sendo S_X o novo valor para o nível de irradiação solar. A constante α_S é o grau de inclinação da reta que representa o comportamento da temperatura de operação da célula em função do nível de irradiação solar, como mostra a equação (11):

$$\Delta T_C = \alpha_S \cdot (S_X - S_C) \quad (11)$$

Para a célula fotovoltaica estudada em [31], o valor de α_S é igual a 0,2.

Assim, considerando esses fatores de correção, os novos valores para a fotocorrente e para a tensão de saída da célula fotovoltaica são:

$$V_{CX} = C_{TV} \cdot C_{SV} \cdot V_C \quad (12)$$

$$I_{PhX} = C_{TI} \cdot C_{SI} \cdot I_{Ph} \quad (13)$$

Para simplificar, tem-se que:

$$V_{CX} = C_V \cdot V_C \quad (14)$$

$$I_{PhX} = C_I \cdot I_{Ph} \quad (15)$$

Portanto:

$$C_V = C_{TV} \cdot C_{SV} = \left[1 + \beta_T \cdot (T_A - T_X)\right] \cdot \left[1 + \beta_T \cdot \alpha_S \cdot (S_X - S_C)\right] \quad (16)$$

$$C_I = C_{TI} \cdot C_{SI} = \left[1 + \frac{\gamma_T}{S_C} \cdot (T_X - T_A)\right] \cdot \left[1 + \frac{1}{S_C} \cdot (S_X - S_C)\right] \quad (17)$$

Como foi citado anteriormente, utiliza-se o Simulink para simular o comportamento dos sistemas fotovoltaicos. Sendo assim, o primeiro passo é implementar o painel fotovoltaico no programa.

Primeiramente, é estruturada a equação (6), como ilustra a Figura 25. Para desenvolver a equação são utilizados alguns blocos de operações e um bloco de função. O bloco de função $f(u)$ é empregado simplesmente para simplificar a montagem da função logarítmica da expressão (6).

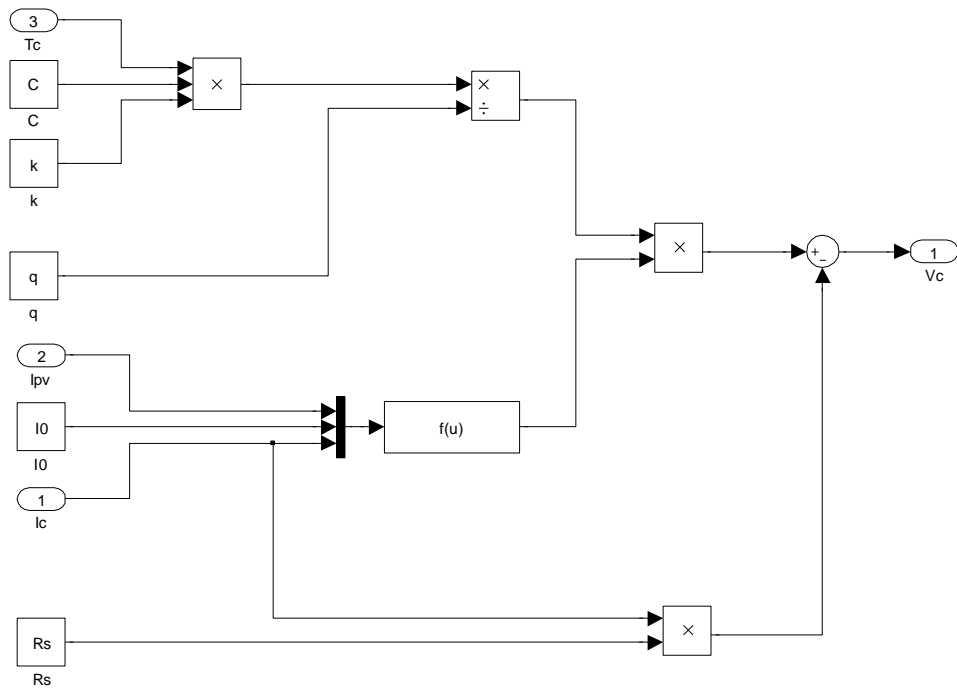


Figura 25 – Equação da Tensão V_C

As equações (16) e (17) são desenvolvidas utilizando blocos de funções, como mostra a Figura 26.

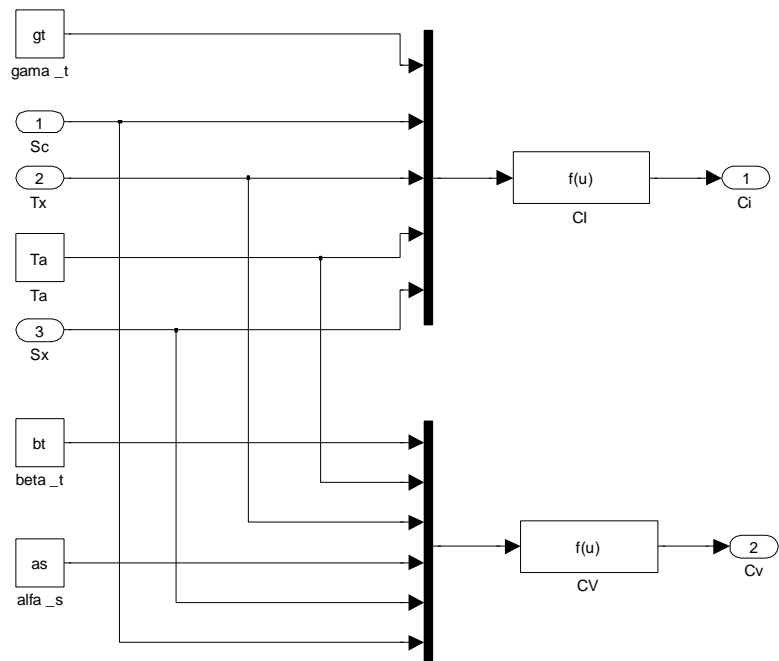


Figura 26 – Efeito da temperatura ambiente e do nível de irradiação solar

Com estes sistemas, são criados dois subsistemas: um correspondente ao cálculo da tensão de saída V_C e outro correspondente aos efeitos da temperatura ambiente e do nível

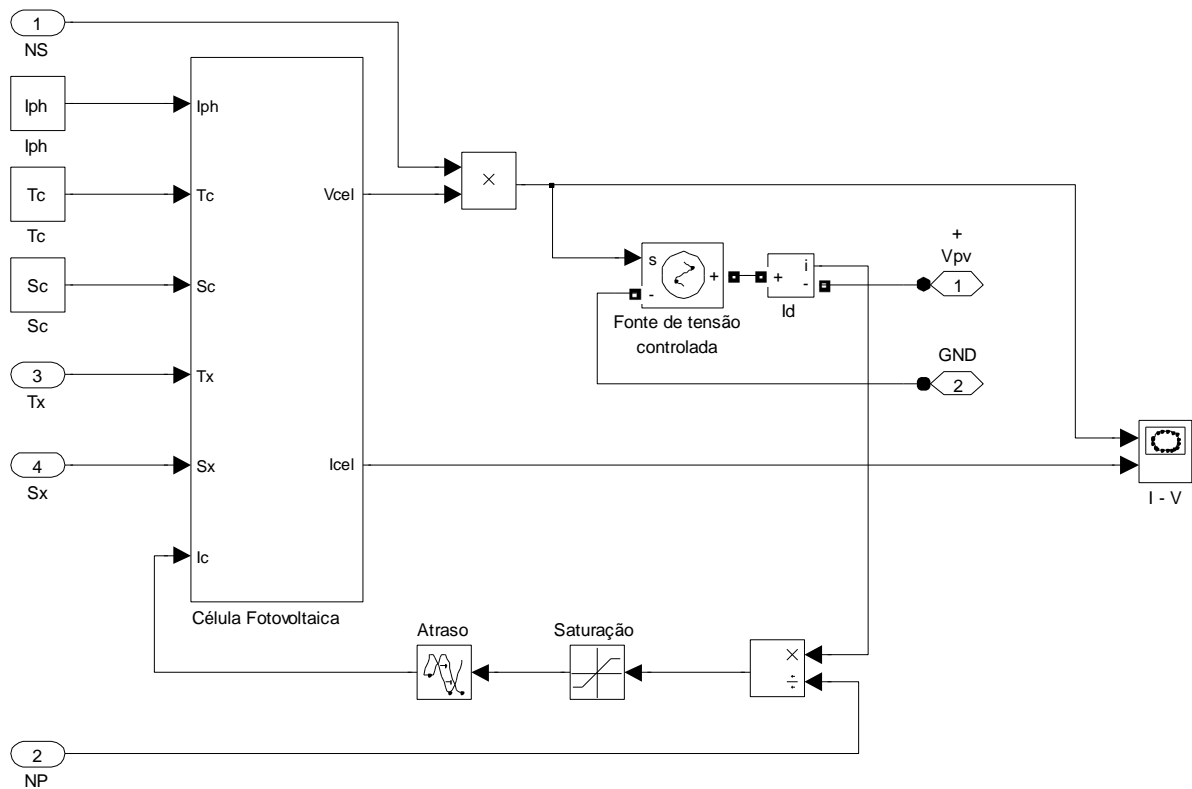


Figura 28 – Modelagem do painel fotovoltaico

No bloco “Saturação” da Figura 28, deve ser escolhido um valor máximo para a corrente de uma única célula fotovoltaica atentando-se para as variações de I_{Ph} , a qual sofre influência da temperatura ambiente e do nível de irradiação solar. Além disso, para evitar problemas numéricos durante a simulação, este valor limitante da corrente I_C deve ser menor que I_{Ph} , de tal forma que o valor interno da função logarítmica da equação (6) seja maior do que zero. Entretanto, é importante observar que o valor da saturação não deve ser muito inferior a I_{Ph} , pois isto pode interferir nos resultados em regime permanente. Dessa forma é necessário alterar o valor da saturação para que não ocorram problemas de convergência. Outro ponto importante a ser ressaltado é que na maioria dos casos simulados, a corrente de saída de cada célula apresenta um valor inferior a 5A.

O atraso adotado é de 1ms, sendo este valor necessário ao processo iterativo de solução das equações, a fim de evitar loops algébricos.

Outros parâmetros deste sistema podem ser encontrados no Apêndice.

3.2.2 Inversor Controlado via PWM

Um inversor tem como objetivo transformar uma grandeza CC em uma grandeza CA. Esta transformação ocorre, basicamente, através do controle de chaveamento de elementos como os transistores, como é explicado em [35].

Antes de abordar a modelagem do inversor utilizado no sistema fotovoltaico, tem-se uma breve explicação do funcionamento do mesmo. Primeiramente, é apresentado o circuito inversor com chaveamento simples de transistores. A conversão do sinal pode ser feita de modo monofásico ou trifásico. O circuito monofásico é um pouco mais simples, como ilustra a Figura 29.

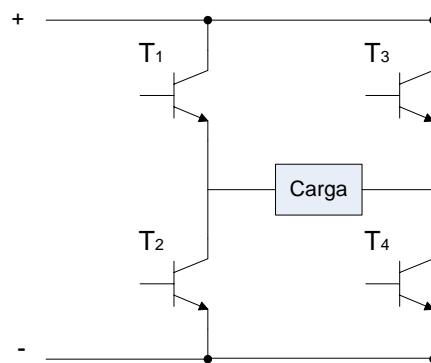


Figura 29 – Representação de um inversor de freqüência para o circuito monofásico

Neste caso, ocorre o chaveamento de pares de transistores. Ora estão ativados T_1 e T_4 , ora T_2 e T_3 .

Já para o caso de circuitos trifásicos, é necessário chavear os elementos para que as tensões de saída alternada sejam defasadas 120° uma da outra. Na Figura 30, tem-se um inversor trifásico com uma lógica de controle de disparo de seis IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, ou transistor bipolar de porta isolada) conectado a um motor de indução trifásico.

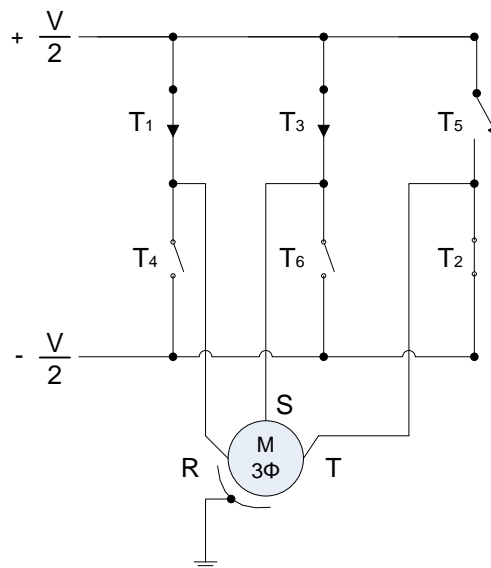


Figura 30 – Representação de um inversor de frequência para um circuito trifásico

As combinações para obter as tensões trifásicas são dadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Combinação para acionamento de IGBTs de um inversor de frequência para um circuito trifásico

IGBTs ativados	Tempo
T ₁ , T ₂ , T ₃	1°
T ₂ , T ₃ , T ₄	2°
T ₃ , T ₄ , T ₅	3°
T ₄ , T ₅ , T ₆	4°
T ₅ , T ₆ , T ₁	5°
T ₆ , T ₁ , T ₂	6°

Com esse controle, para cada tempo, são obtidos determinados valores de tensão para as fases R, S e T. Para determinar as tensões trifásicas, é necessário verificar as diferenças de potencial entre as fases, tal que:

$$V_{RS} = V_R - V_S \quad (18)$$

$$V_{ST} = V_S - V_T \quad (19)$$

$$V_{TR} = V_T - V_R \quad (20)$$

Como os transistores trabalham como chaves, a forma de onda de saída é sempre quadrada. Para obter uma forma de onda de saída próxima à senoidal, é necessário utilizar uma modulação por largura de pulso, chamada modulação PWM. Existem diversas técnicas de modulação PWM, mas a mais utilizada é a modulação por largura de pulso senoidal (SPWM).

Para este tipo de modulação existem duas formas de onda: uma senoidal e outra triangular. Os pontos de chaveamento são determinados pelos pontos de intersecção entre as duas ondas.

A onda senoidal, denominada $v_R(t)$, é o sinal de referência, e possui uma amplitude V_M e uma frequência f_M , que é igual à frequência desejada na saída do inversor. Já a onda triangular, também conhecida como a onda portadora, é denominada como $v_C(t)$ e apresenta uma amplitude V_C e uma frequência f_C (frequência de chaveamento) [36].

Na Figura 31 estão representadas as formas de onda $v_R(t)$ e $v_C(t)$, assim como o sinal de saída do gerador de PWM. Este sinal de saída é o responsável pelo controle dos IGBTs do inversor. A figura ilustra apenas o semiciclo positivo da onda de referência. Para este semiciclo, o IGBT é ligado quando $v_R(t) > v_C(t)$. Para o caso do semiciclo negativo, o IGBT é ligado quando $v_R(t) < v_C(t)$.

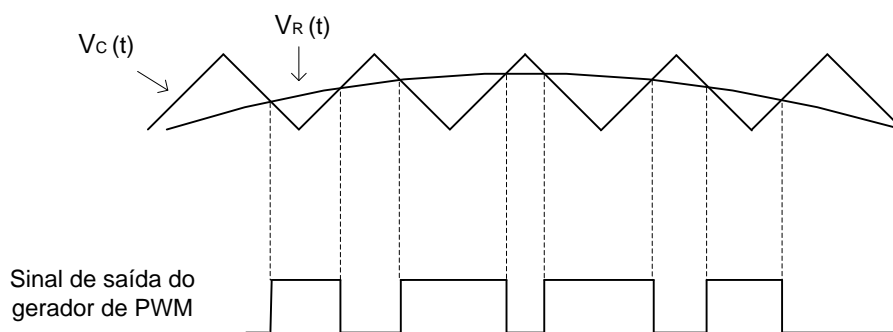


Figura 31 – Representação das formas de onda de um gerador de PWM

São dois os parâmetros de controle que regulam a tensão de saída:

- Relação N : responsável pela determinação do número de pulsos em cada semiciclo da tensão de saída do inversor.
- Índice de modulação m : responsável pela determinação da largura dos pulsos, e conseqüentemente, o valor da tensão eficaz na saída do inversor.

A relação N e o índice de modulação m são dados nas equações (21) e (22), respectivamente:

$$N = \frac{f_C}{f_M} \quad (21)$$

$$m = \frac{V_M}{V_C} \quad (22)$$

Na implementação do sistema fotovoltaico, dois parâmetros são importantes na definição do inversor PWM: a frequência de chaveamento f_c e o índice de modulação m .

Se N determina o número de pulsos em cada semiciclo da tensão de saída do inversor, e a frequência f_M não deve ser alterada já que a frequência de saída do inversor deve ser mantida constante, conclui-se que a frequência f_c influencia no número de pulsos na saída. Sendo assim, quanto maior for a frequência de chaveamento, mais senoidal é a forma de onda fornecida à carga.

Já no índice de modulação, é a tensão V_C que normalmente mantém-se fixa. O ajuste de m deve ser realizado pela variação da amplitude da onda de referência V_M . Por este motivo que a variação de m altera a largura do pulso e controla a tensão eficaz na saída do inversor [36].

O dimensionamento correto do inversor é de suma importância, pois este pode evitar os harmônicos nas formas de onda de tensão e corrente. Um grande problema causado por estes é o sobreaquecimento dos equipamentos, prejudicando seu desempenho e reduzindo a vida útil dos mesmos [37].

Para finalizar esta etapa, é conectado um filtro LC passa-baixa na saída do inversor, como é comum em situações reais. Este filtro tem como função atenuar as componentes de altas frequências ocasionadas pela modulação do inversor.

No sistema, utiliza-se um indutor em série com o inversor, com valor igual a 2mH e um capacitor em paralelo com um valor igual a 35,18 μ F.

Por fim, tem-se a representação do módulo correspondente ao inversor na Figura 32. Ressalta-se que neste trabalho não é simulado o comportamento do sistema fotovoltaico e do inversor na ocorrência de transitórios no sistema elétrico, somente em regime permanente. Por isso, não é considerado o controle em malha fechada do inversor de frequência, reservando esta tarefa para trabalhos futuros.

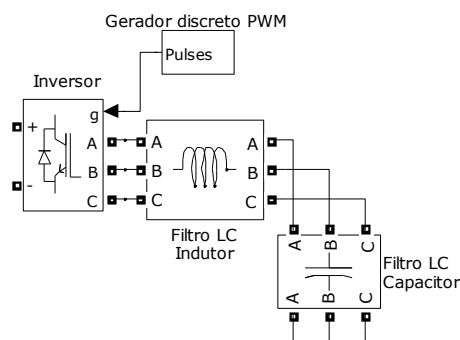


Figura 32 – Módulo do inversor PWM

3.2.3 Outros elementos do sistema

Após o filtro na saída do inversor PWM, tem-se um transformador trifásico. Este transformador possui uma relação de espiras 1:1 e tem a função de isolador.

As cargas CA utilizadas, nos dois modos de operação, são de natureza indutiva, já que estas são as mais típicas em redes de baixa tensão.

O restante dos componentes encontrados no sistema fotovoltaico, mas que não são descritos até aqui, são medidores e seus periféricos. Esses são os responsáveis pela geração das formas de onda de tensão e corrente em diversos pontos do circuito, e também para medições de valores como distorções harmônicas, potência ativa, potência reativa e valores eficazes. Alguns destes valores são coletados e utilizados no capítulo 4.

3.3 Representação de uma rede de distribuição de energia elétrica

Os elementos e módulos descritos até o momento compõem a representação do sistema fotovoltaico operando de modo isolado. Para implementar o sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica, basta conectar o sistema isolado a um circuito equivalente da rede desejada.

Neste trabalho, a modelagem aplicada para a rede elétrica é composta por:

- Rede ou subestação (SE);
- Transformadores;
- Linhas para distribuição da energia elétrica;
- Cargas.

A rede representa a SE da concessionária de distribuição de energia elétrica. Os transformadores são os responsáveis por converter a tensão para que seja atendida a necessidade de cada consumidor. As linhas transmitem a energia da SE até as cargas, os clientes da concessionária.

O circuito utilizado para representar a rede, nas simulações, encontra-se na Figura 33.

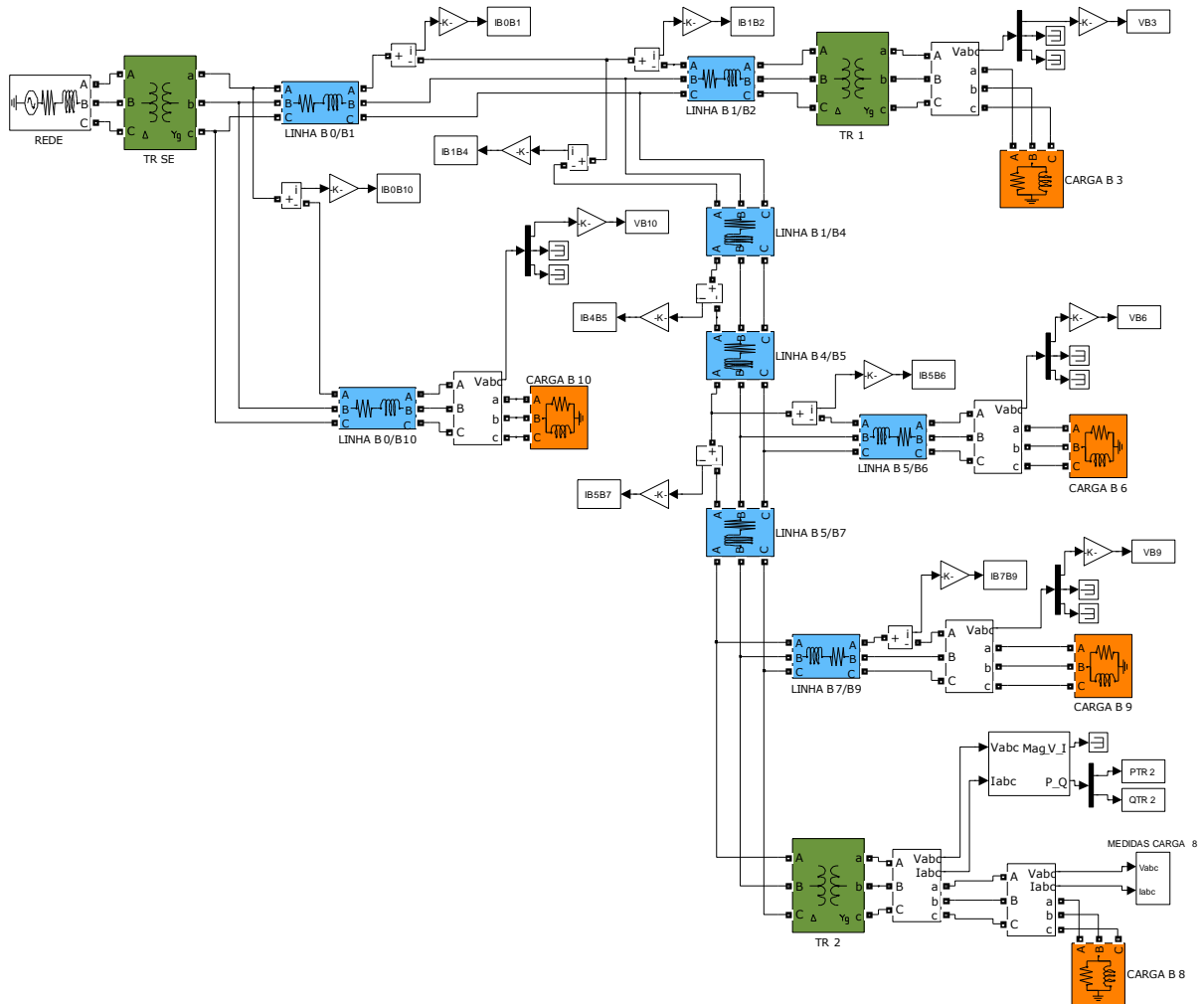


Figura 33 – Representação de uma rede de distribuição de energia elétrica

Os parâmetros elétricos dos componentes utilizados nesse circuito encontram-se no Apêndice.

3.4 Operação dos sistemas fotovoltaicos

Nesta seção, são apresentadas as modelagens dos dois modos de operação do sistema fotovoltaico utilizadas neste trabalho.

3.4.2 Modelagem do sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição

Em seguida, tem-se o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição. Para implementar este caso, utiliza-se a estrutura do sistema isolado conectada ao circuito equivalente à rede de distribuição.

Com o objetivo de obter uma potência de aproximadamente 100kW na saída do sistema fotovoltaico, algumas alterações são realizadas no caso base do sistema isolado. Para o sistema interligado à rede, são utilizadas 30x36 células conectadas em série (30 módulos em série) e 70 células conectadas em paralelo.

Neste caso, o inversor PWM, apresenta um índice de modulação $m = 0,95$ e uma frequência de chaveamento $f_c = 8000\text{Hz}$. Esses parâmetros definem o caso base para a operação do sistema fotovoltaico em paralelo com a rede de distribuição de energia elétrica.

A carga CA apresenta uma potência ativa de 180kW, uma potência reativa indutiva de 87kvar e uma frequência de operação igual a 60Hz.

É importante ressaltar que os parâmetros para esta operação foram determinados manualmente, devido à falta de um sistema de controle para o sistema fotovoltaico. As simulações são realizadas para um ponto de operação específico, mas que representa, de forma adequada, o sistema em regime permanente.

Na Figura 36 encontra-se a configuração do sistema fotovoltaico utilizado neste caso.

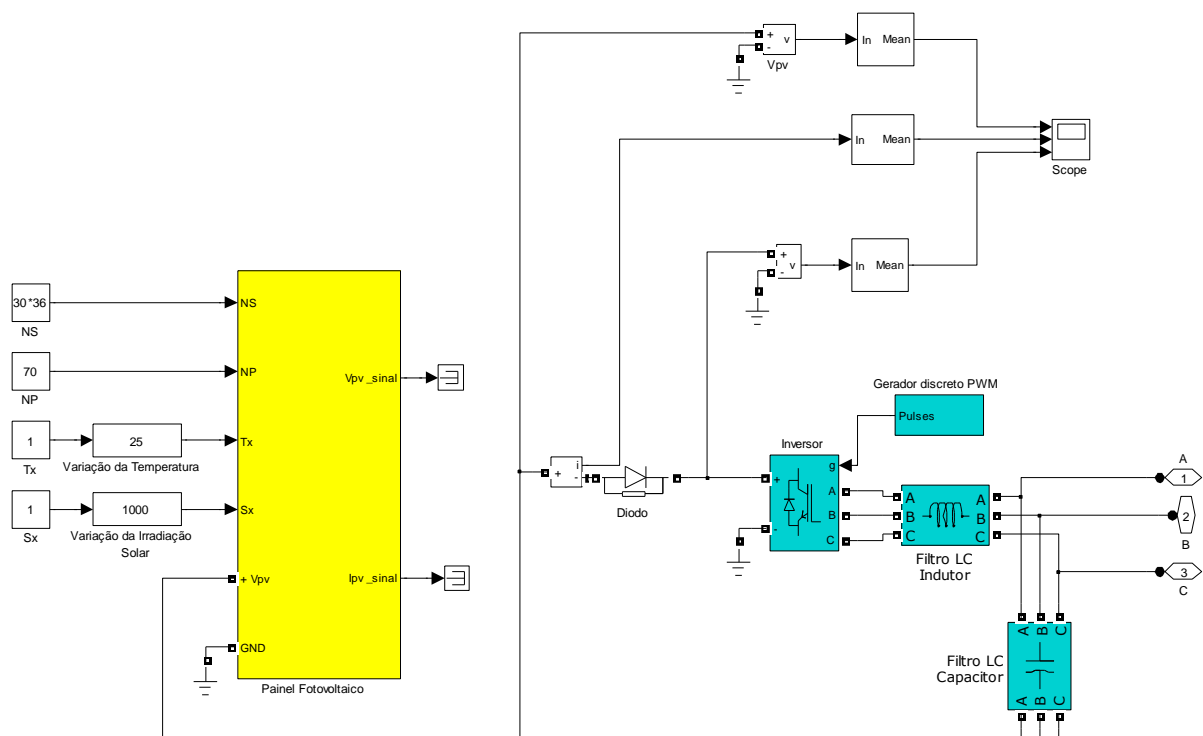


Figura 35 – Sistema fotovoltaico utilizado na operação de conexão com a rede elétrica

Na Figura 36 é apresentada a ilustração do sistema fotovoltaico interligado à rede. Para simplificar essa ilustração, o sistema fotovoltaico foi compactado em um subsistema.

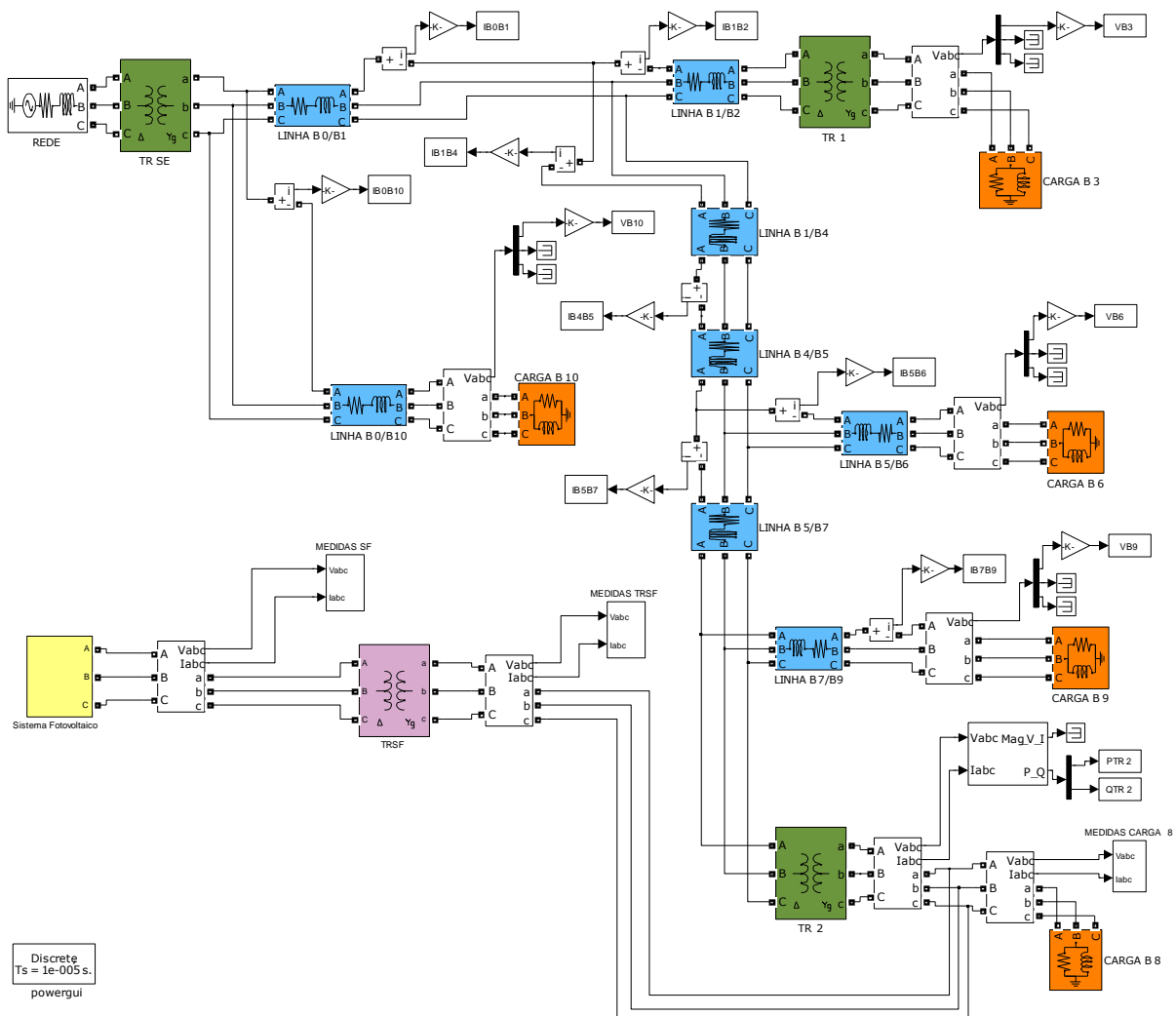


Figura 36 – Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica

Os parâmetros elétricos de todos os componentes apresentados na operação do sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica podem ser encontrados no Apêndice.

4 Simulações e análises dos desempenhos

A partir dos sistemas elétricos apresentados no capítulo 3 são realizadas as simulações para verificar os desempenhos dos mesmos. São simulados cinco casos para cada modo de operação do sistema fotovoltaico, e em seguida, são estudados os comportamentos e resultados destas situações. Os casos são:

- Caso base: parâmetros base de cada sistema, em condições normais;
- Caso 1: variação de $\pm 20\%$ na temperatura ambiente;
- Caso 2: variação de $\pm 10\%$ no nível de irradiação solar;
- Caso 3: variação na frequência de chaveamento do inversor PWM;
- Caso 4: variação no índice de modulação do inversor PWM.

Para cada caso do sistema isolado, são coletados os seguintes dados: valores eficazes de tensão e corrente, distorção harmônica de tensão e corrente, potência ativa e reativa e formas de onda de tensão e corrente na carga. Para o sistema interligado à rede, além destes, são analisados também: valores de potência ativa e reativa, na saída do transformador do sistema fotovoltaico e na saída do transformador conectado à rede elétrica, e corrente eficaz na saída do transformador do sistema fotovoltaico.

Para o cálculo das distorções harmônicas, são utilizadas as equações:

$$DHV_T = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{máx}} V_n^2}{V_1^2}} \cdot 100(\%) \quad (23)$$

$$DHI_T = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{n_{máx}} I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100(\%) \quad (24)$$

A simulação dos sistemas é realizada de forma discreta, com um tempo de amostragem (T_s) igual a $10\mu s$.

4.1 Simulação do sistema fotovoltaico isolado

Nesta subseção são apresentados os resultados do sistema fotovoltaico operando isolado, para cada um dos cinco casos.

4.1.1 Caso base

O sistema fotovoltaico isolado está representado na Figura 34. Inicialmente, é simulado o caso base, no qual se têm os seguintes parâmetros:

Tabela 2 – Parâmetros do caso base do sistema isolado

Parâmetros	Valores
T_x (°C)	25
S_x (W/m ²)	1000
m	0,86
f_c (Hz)	8000

Para este caso, são encontrados os resultados da Tabela 3:

Tabela 3 – Resultados do caso base do sistema isolado

Parâmetros	Valores
V_{RMS} (V)	225,0333
I_{RMS} (A)	1,4758
DHV _T (%)	5,9928
DHI _T (%)	7,3646
P (W)	516,7649
Q (var)	206,0900

As formas de onda de tensão e corrente na carga CA são ilustradas na Figura 37 e na Figura 38, respectivamente.

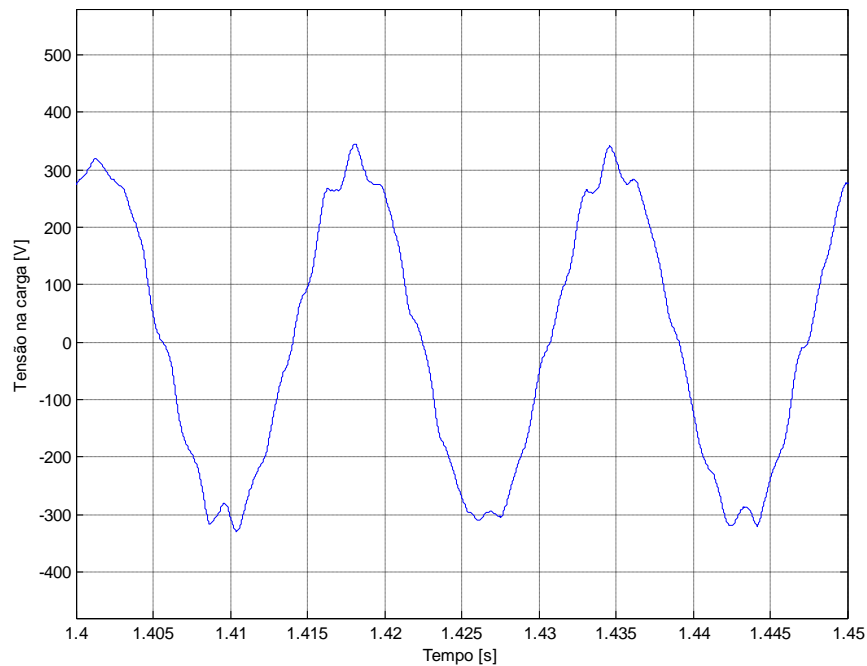


Figura 37 – Forma de onda da tensão na carga para o caso base do sistema isolado

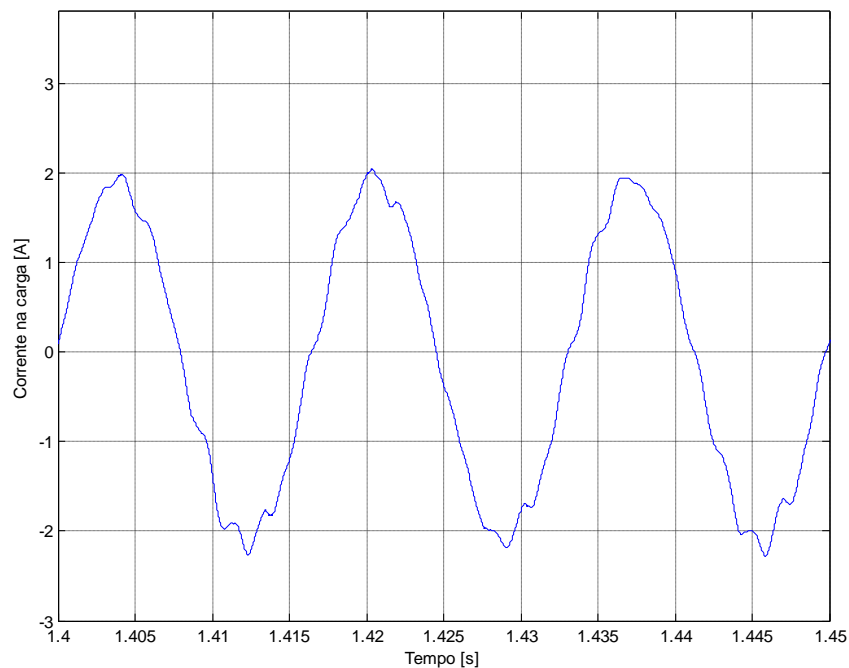


Figura 38 – Forma de onda da corrente na carga para o caso base do sistema isolado

O caso base foi desenvolvido de tal forma que os índices de distorções harmônicas encontrem-se abaixo do valor de referência e a potência exigida pela carga seja suprida. De acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [38], o valor de referência da distorção harmônica total de tensão, em

um barramento de tensão nominal abaixo de 1kV , é de 10%. Deste modo, a DHV_T do caso base é aceitável, preservando assim a qualidade da energia elétrica.

4.1.2 Caso 1

Para este primeiro caso, é variada a temperatura ambiente T_x em $\pm 20\%$.

Tabela 4 – Parâmetros do caso 1 do sistema isolado

Parâmetros	Valores
T_{x1} (°C)	30
T_{x2} (°C)	20
S_x (W/m ²)	1000
m	0,86
f_c (Hz)	8000

Para este caso, os resultados são divididos em duas tabelas. Na Tabela 5 são apresentados os resultados para um aumento de 20% na temperatura T_x . E na Tabela 6, são expostos os resultados para uma redução de 20% na temperatura T_x . A terceira coluna da Tabela 5 e da Tabela 6 representa a variação percentual entre os valores obtidos neste caso e os valores obtidos no caso base. Essas variações são obtidas através da seguinte expressão:

$$\Delta\% = \left(\frac{\text{Valor}_{\text{Caso } i}}{\text{Valor}_{\text{Caso base}}} - 1 \right) \cdot 100(\%) \quad (25)$$

Sendo i o número do caso considerado. Para este caso, tem-se $i = 1$.

Tabela 5 – Resultados do caso 1 para T_{x1} do sistema isolado

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	220,4295	-2,0458
I_{RMS} (A)	1,4461	-2,0125
DHV_T (%)	5,7595	-3,8930
DHI_T (%)	7,1180	-3,3485
P (W)	496,3545	-3,9496
Q (var)	197,8711	-3,9880

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 3)

Tabela 6 – Resultados do caso 1 para T_{x2} do sistema isolado

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	229,6025	2,0305
I_{RMS} (A)	1,5053	1,9989
DHV_T (%)	6,2193	3,7795
DHI_T (%)	7,6435	3,7870
P (W)	537,3951	3,9922
Q (var)	214,3974	4,0310

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 3)

As formas de onda de tensão e corrente na carga CA são ilustradas na Figura 39 e na Figura 40, respectivamente. Em cada gráfico, estão representadas as formas de onda do caso base, da variação de +20% em T_x e da variação de -20% em T_x .

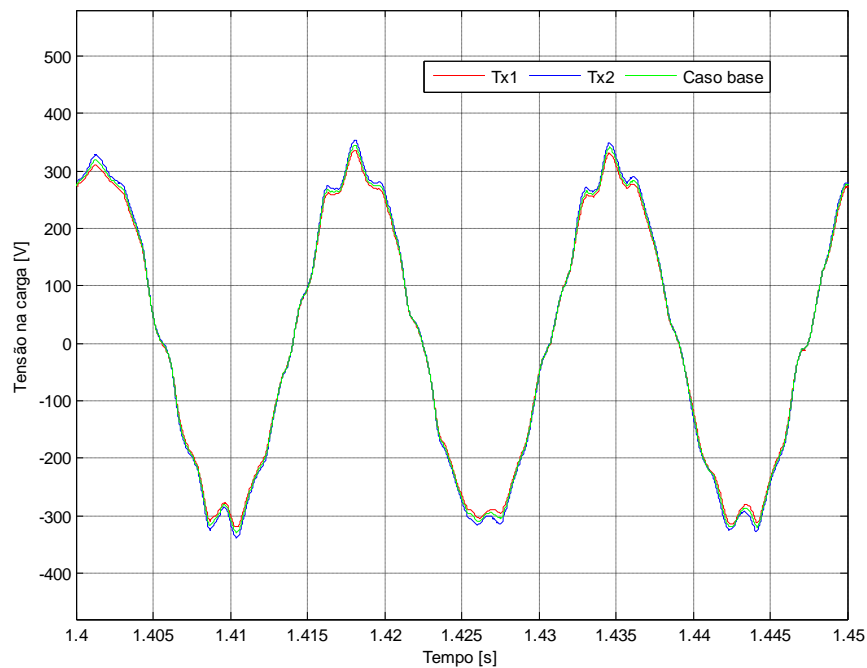


Figura 39 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 1 do sistema isolado

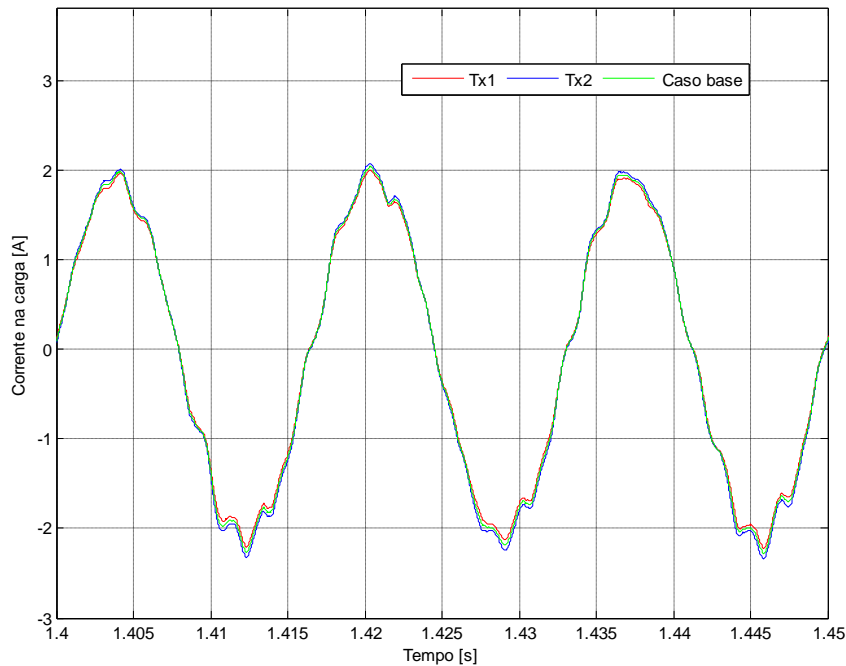


Figura 40 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 1 do sistema isolado

A mudança de $\pm 20\%$ da temperatura ambiente não afeta o sistema isolado de uma forma muito significativa. Os parâmetros que alimentam a carga apresentar, para as duas situações, uma variação de: $\pm 2\%$ para tensão eficaz, e $\pm 4\%$ para potências ativa e reativa.

O desempenho de uma célula fotovoltaica é inversamente proporcional à temperatura de operação da célula. A temperatura de operação da célula está relacionada à temperatura ambiente, como foi explicado anteriormente. Desta forma, pode-se observar que o comportamento do modelo implementado está coerente. Para um valor de T_x 20% maior, do que aquele utilizado no caso base, encontram-se reduções na tensão e na potência fornecidas. Já para uma diminuição de 20% na temperatura ambiente, há um aumento destes mesmos parâmetros.

4.1.3 Caso 2

Para o caso 2, é variado o nível de irradiação solar S_x em $\pm 10\%$. Os parâmetros utilizados neste caso são dados na Tabela 7:

Tabela 7 – Parâmetros do caso 2 do sistema isolado

Parâmetros	Valores
T_x (°C)	25
S_{x1} (W/m ²)	1100
S_{x2} (W/m ²)	900
m	0,86
f_c (Hz)	8000

Para este caso, os resultados também são divididos em duas tabelas. Na Tabela 8 são apresentados os resultados para um aumento de 10% no nível de irradiação solar S_x . E na Tabela 9, são expostos os resultados para uma redução de 10% de S_x .

Tabela 8 – Resultados do caso 2 para S_{x1} do sistema isolado

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	244,6423	8,7138
I_{RMS} (A)	1,6046	8,7275
DHV _T (%)	5,3468	-10,7796
DHI _T (%)	6,8202	-7,3921
P (W)	612,0850	18,4455
Q (var)	244,1643	18,4746

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 3)

Tabela 9 – Resultados do caso 2 para S_{x2} do sistema isolado

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	206,9578	-8,0324
I_{RMS} (A)	1,3514	-8,4293
DHV _T (%)	7,3315	22,3385
DHI _T (%)	8,9453	21,4635
P (W)	433,3377	-16,1441
Q (var)	173,1470	-15,9848

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 3)

As formas de onda de tensão e corrente na carga CA são ilustradas na Figura 41 e na Figura 42, respectivamente. Em cada gráfico, estão representadas as formas de onda do caso base, da variação de +10% em S_x e da variação de -10% em S_x .

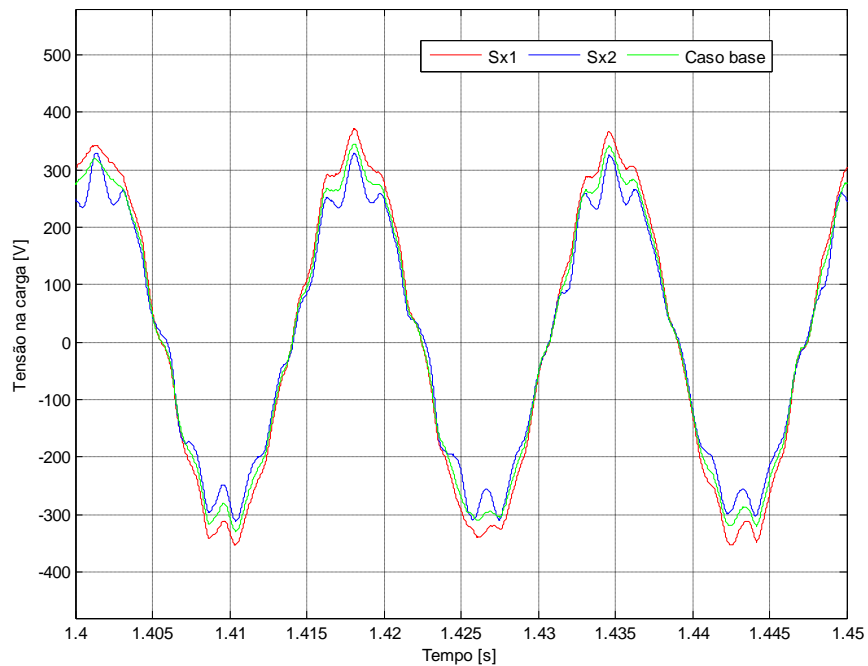


Figura 41 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 2 do sistema isolado

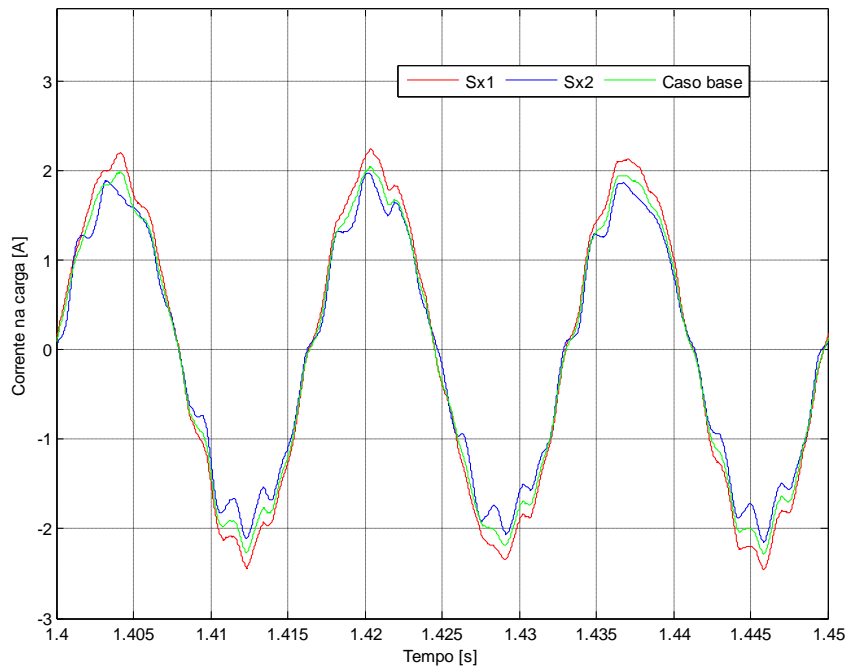


Figura 42 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 2 do sistema isolado

A alteração do nível de irradiação solar, em $\pm 10\%$, trouxe uma mudança aparente nas grandezas medidas na carga. As formas de onda de tensão e corrente expõem a variação nas amplitudes das ondas senoidais. Este comportamento é coerente, uma vez que o

desempenho de uma célula fotovoltaica é diretamente proporcional ao nível de irradiação solar.

Os valores de tensão e corrente eficaz, obtiveram uma elevação de 8,7%, com o aumento de S_x , e uma diminuição de aproximadamente 8%, com a redução do mesmo. Já as potências ativa e reativa, apresentaram um aumento de 18,4%, para a primeira situação, e um abaixamento de 16%, para a segunda.

Nota-se que com o aumento de S_x , há uma redução das distorções harmônicas de tensão e corrente. Já com a diminuição de S_x , ocorre o inverso, porém os valores se mantêm dentro dos limites recomendados por norma.

4.1.4 Caso 3

Neste caso, ocorre uma variação na frequência de chaveamento f_c do inversor. Os resultados deste são utilizados para indicar a influência de f_c nas formas de onda que alimentam a carga. Diferentemente dos outros casos, a f_c será variada apenas para valores inferiores àquele apresentado no caso base. Isso se justifica pelo fato que o valor de f_c escolhido para o caso base já apresenta índices de distorções harmônicas totais inferiores ao valor de referência. Dessa forma, é interessante verificar a forma como esses índices são afetados quando se diminui a frequência de chaveamento.

Os parâmetros do caso 3 são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros do caso 3 do sistema isolado

Parâmetros	Valores
T_x (°C)	25
S_x (W/m ²)	1000
m	0,86
f_{c1} (Hz)	1000
f_{c2} (Hz)	5000

Os resultados devido à variação de f_c encontram-se na Tabela 11, para f_{c1} , e na Tabela 12, para f_{c2} :

Tabela 11 – Resultados do caso 3 para f_{C1} do sistema isolado

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	266,4599	18,4091
I_{RMS} (A)	1,7741	20,2128
DHV_T (%)	28,1026	368,9394
DHI_T (%)	29,0801	294,8633
P (W)	672,5138	30,1392
Q (var)	267,5510	29,8224

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 3)

Tabela 12 – Resultados do caso 3 para f_{C2} do sistema isolado

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	231,0700	2,6826
I_{RMS} (A)	1,5037	1,8905
DHV_T (%)	6,7159	12,0661
DHI_T (%)	7,3949	0,4114
P (W)	551,9158	6,8021
Q (var)	220,1107	6,8032

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 3)

As formas de onda de tensão e corrente na carga CA são ilustradas na Figura 43 e na Figura 44, respectivamente. Nestes gráficos, estão apresentados o comportamento do caso base, do caso em que a frequência de chaveamento é f_{C1} e do caso em que a frequência de chaveamento é f_{C2} .

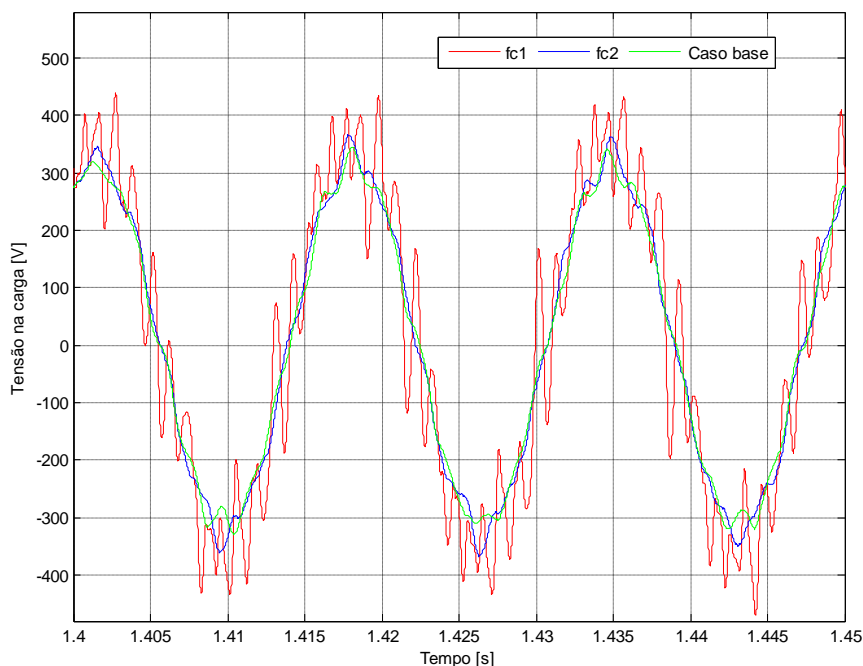


Figura 43 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 3 do sistema isolado

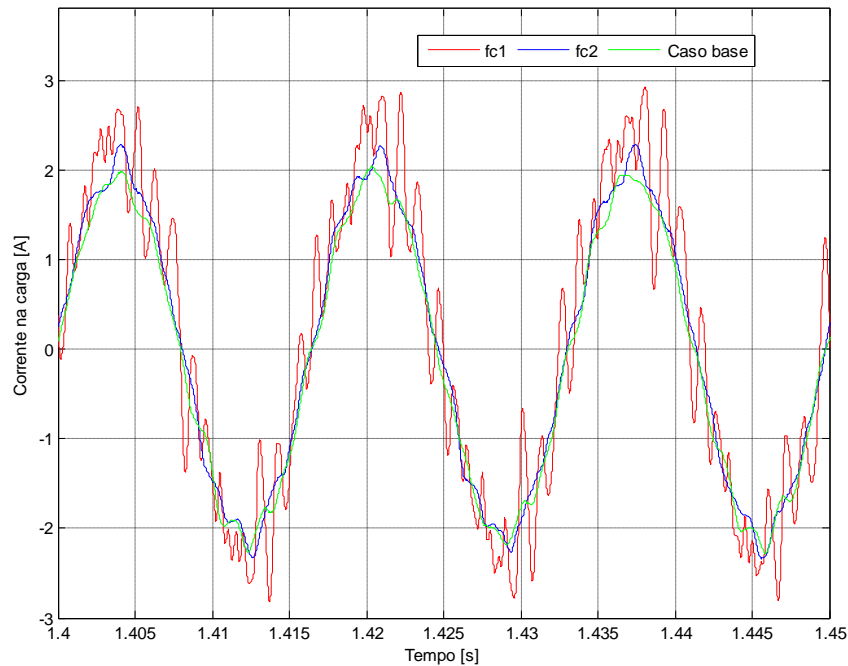


Figura 44 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 3 do sistema isolado

A influência que a frequência de chaveamento do inversor possui nas grandezas que alimentam a carga é comprovada através dos gráficos. Quanto maior o valor correspondente à f_c , mais próxima a uma senóide a onda se apresenta, como é explicado na subseção 3.2.2.

Nota-se que para o caso em que a frequência de chaveamento é 1000Hz, as distorções harmônicas de tensão e corrente totais, quase atingem 30%. Este valor é inaceitável em uma rede de distribuição de energia, devido à péssima qualidade do sinal fornecido, como pode ser observado nos gráficos.

Para a primeira situação, a corrente e tensão eficaz apresentam um aumento de aproximadamente 20% e 18%, respectivamente. Para as potências ativa e reativa, a variação é de aproximadamente 30%. Na segunda situação, as reduções para corrente, tensão e potências são de 2,7%, 1,9% e 6,8%, respectivamente. Como é possível observar, com o aumento de f_c na segunda situação, os valores mostram-se aceitáveis e mais próximos aos valores obtidos no caso base.

A elevação dos valores, de tensão, corrente e potências deve-se ao aumento das distorções harmônicas presentes nas formas de onda de tensão e corrente. Na primeira situação, pode-se observar que devido o aumento das distorções, elevaram-se as tensões de pico dessas formas de onda.

4.1.5 Caso 4

Neste caso, é verificada a influência que o índice de modulação do inversor apresenta sobre as grandezas que alimentam a carga CA. Para isso, é analisado o comportamento do sistema para dois valores diferentes de m . Os parâmetros utilizados nesse caso são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros do caso 4 do sistema isolado

Parâmetros	Valores
T_x (°C)	25
S_x (W/m ²)	1000
m_1	0,7
m_2	0,99
f_c (Hz)	8000

Os resultados desta simulação encontram-se na Tabela 14, para m_1 , e na Tabela 15, para m_2 :

Tabela 14 – Resultados do caso 4 para m_1 do sistema isolado

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	181,8497	-19,1899
I_{RMS} (A)	1,1987	-18,7763
DHV_T (%)	3,8746	-35,3457
DHI_T (%)	4,4848	-39,1033
P (W)	342,9851	-33,6284
Q (var)	136,2496	-33,8883

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 3)

Tabela 15 – Resultados do caso 4 para m_2 do sistema isolado

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	258,1126	14,6997
I_{RMS} (A)	1,7222	16,6960
DHV_T (%)	7,2719	21,3439
DHI_T (%)	7,7651	5,4382
P (W)	690,5429	33,6281
Q (var)	275,2642	33,5650

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 3)

As formas de onda de tensão e corrente na carga CA são ilustradas na Figura 45 e na Figura 46, respectivamente. Nos gráficos são apresentados os comportamentos do caso

base, do caso em que o índice de modulação é igual m_1 e do caso em que o índice de modulação é igual a m_2 .

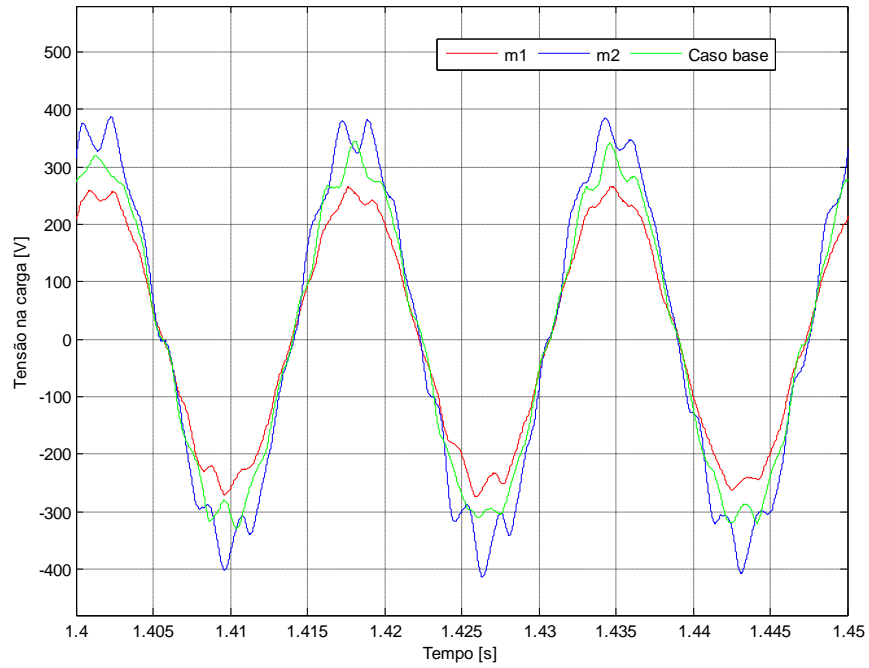


Figura 45 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 4 do sistema isolado

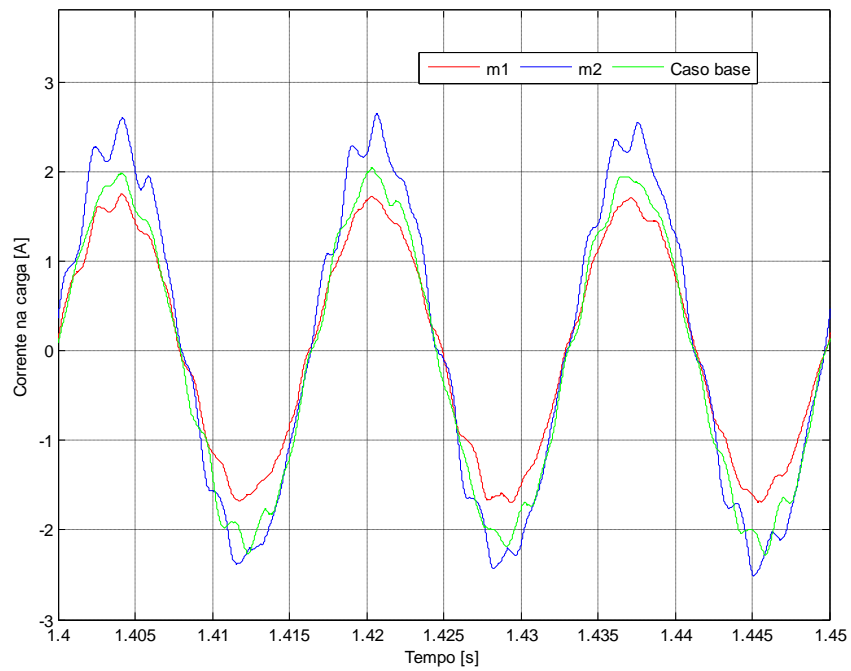


Figura 46 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 4 do sistema isolado

A influência do índice de modulação também é comprovada através dos resultados obtidos. Nota-se claramente que quanto mais elevado for o valor de m , maiores são os valores que alimentam a carga.

Para a primeira situação, tem-se uma redução de aproximadamente 19% nos valores de tensão e corrente eficaz. Já as potências, apresentam uma queda de 33% em seus valores. Observa-se também que, as distorções harmônicas totais, também têm seus valores quase 40% menores.

Já na segunda situação, a tensão eficaz tem seu valor elevado em 14,7%, a corrente em 16,7% e as potências em 33,6%. A distorção harmônica de tensão total tem um aumento de 21,3%, enquanto a distorção harmônica de corrente total tem um aumento de apenas 5,4%.

4.2 Análises do desempenho do sistema fotovoltaico isolado

Avaliando os resultados dos casos 1 e 2, observa-se que as variações da temperatura ambiente e do nível de irradiação solar apresentam uma influência significativa nas grandezas medidas na carga, como tensão, corrente, potência ativa e reativa. Nota-se também que mesmo com a variação desses parâmetros, os valores de distorções harmônicas de tensão e corrente totais encontram-se abaixo do valor de referência permitido. A comprovação deste fato é de extrema importância, pois mostra que a qualidade da energia fornecida pelo gerador fotovoltaico não é prejudicada devido às variações climáticas.

Os testes realizados são úteis para verificar a influência de cada parâmetro de forma isolada. Porém é importante ressaltar que isso seria difícil de ocorrer em uma situação real, já que, normalmente, quanto mais elevado é o nível de irradiação solar, maior é a temperatura ambiente. Através desses testes, é possível notar que a variação do nível de irradiação solar, acarreta um impacto maior que a variação da temperatura ambiente. Para uma variação de $\pm 10\%$ de S_x obtém-se uma alteração mais aparente nas grandezas medidas na carga, do que para uma variação de $\pm 20\%$ de T_x .

Nos casos 3 e 4, são realizados testes para verificar a influência dos parâmetros do inversor na carga. Os resultados esperados são obtidos verificando-se que a variação de f_c afeta principalmente os índices de distorções harmônicas enquanto que a variação de m possui maior influência nos valores de tensão, corrente e potências. Como foi explicado, esses parâmetros foram determinados manualmente, de modo a obter a característica desejada no caso base. É importante observar que estes parâmetros poderiam ser obtidos

de forma automática, através de um sistema de controle, para obter os melhores valores em qualquer situação. Porém, para este trabalho, optou-se por mantê-los constantes para verificar a influência de cada variável separadamente.

4.3 Simulação do sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição

O sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição de energia elétrica está representado na Figura 36. Para todos os casos, são armazenados os resultados dos seguintes parâmetros:

- V_{RMS} : Tensão eficaz na carga B8;
- I_{RMS} : Corrente eficaz na carga B8;
- P_{carga} : Potência ativa na carga B8;
- Q_{carga} : Potência reativa na carga B8;
- P_{TR2} : Potência ativa do transformador da rede elétrica de distribuição no lado de baixa tensão;
- Q_{TR2} : Potência reativa do transformador da rede elétrica de distribuição no lado de baixa tensão;
- P_{TRSF} : Potência ativa do transformador do sistema fotovoltaico no lado de baixa tensão;
- Q_{TRSF} : Potência reativa do transformador do sistema fotovoltaico no lado de baixa tensão;
- I_{TRSF_RMS} : Corrente eficaz do transformador do sistema fotovoltaico no lado de baixa tensão;
- DHV_T : Distorção harmônica total da tensão na carga B8;
- DHI_T : Distorção harmônica total da corrente na carga B8.

Neste modo de operação, são analisadas as formas de onda, de tensão e corrente, fornecidas pelo sistema fotovoltaico e as formas de onda, de tensão e corrente, que alimentam a carga B8. As formas de onda fornecidas pelo sistema fotovoltaico foram coletadas no transformador TRSF no lado de baixa tensão (lado da carga).

4.3.1 Caso base

Para o caso base são utilizados os seguintes parâmetros:

Tabela 16 – Parâmetros do caso base do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores
T_x (°C)	25
S_x (W/m ²)	1000
m	0,95
f_c (Hz)	8000

Os resultados deste caso encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados do caso base do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores
V_{RMS} (V)	212,3277
I_{RMS} (A)	506,2915
P_{carga} (kW)	167,4176
Q_{carga} (kvar)	80,9143
P_{TR2} (kW)	58,9092
Q_{TR2} (kvar)	133,6343
P_{TRSF} (kW)	108,5084
Q_{TRSF} (kvar)	-52,7200
I_{TRSF_RMS} (A)	334,0111
DHV _T (%)	4,7843
DHI _T (%)	4,3085

Como pode ser observado, no caso base o sistema fotovoltaico não consegue suprir a potência ativa exigida pela carga, como foi projetado. Desta forma, a potência faltante é fornecida pela rede elétrica. Quanto à potência reativa, tanto a carga quanto o sistema fotovoltaico estão consumindo-a da rede.

As formas de onda de tensão e corrente na saída do transformador do sistema fotovoltaico estão representadas na Figura 47 e na Figura 48, respectivamente.

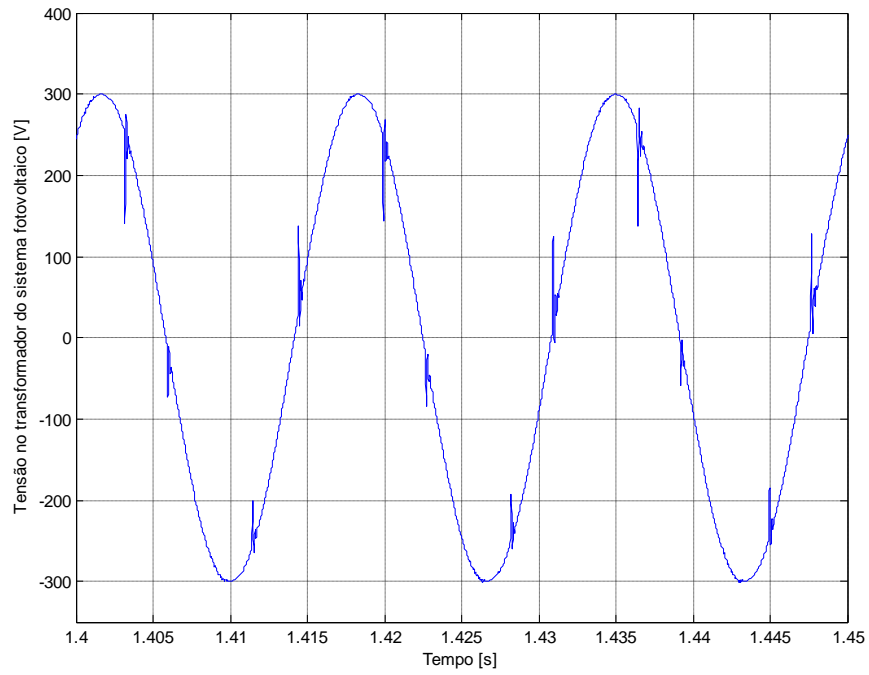


Figura 47 – Forma de onda da tensão do transformador do sistema fotovoltaico para o caso base do sistema conectado à rede de distribuição

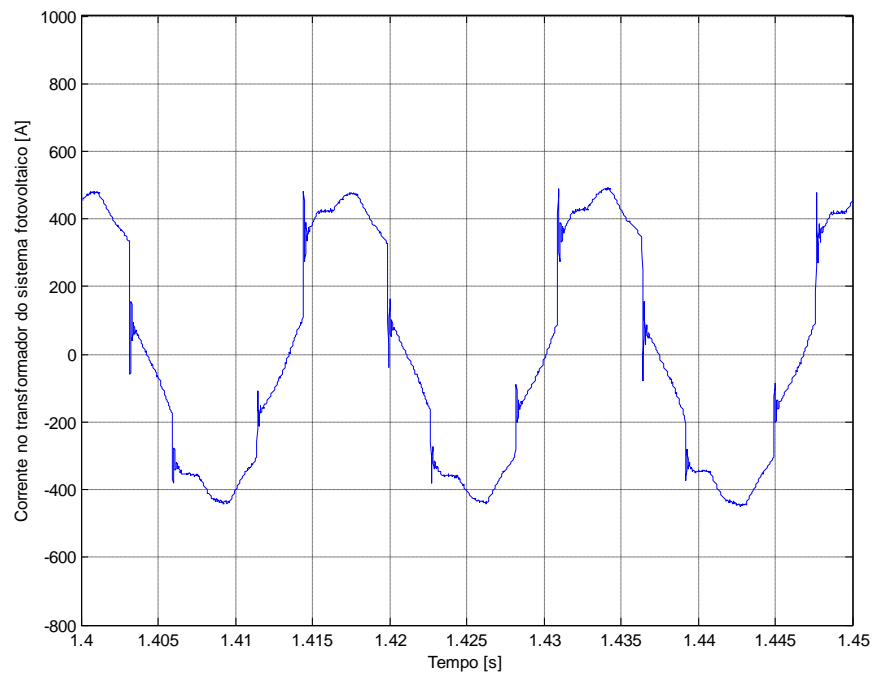


Figura 48 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso base do sistema conectado à rede de distribuição

As formas de onda de tensão e corrente na carga B8 são ilustradas na Figura 49 e na Figura 50, respectivamente.

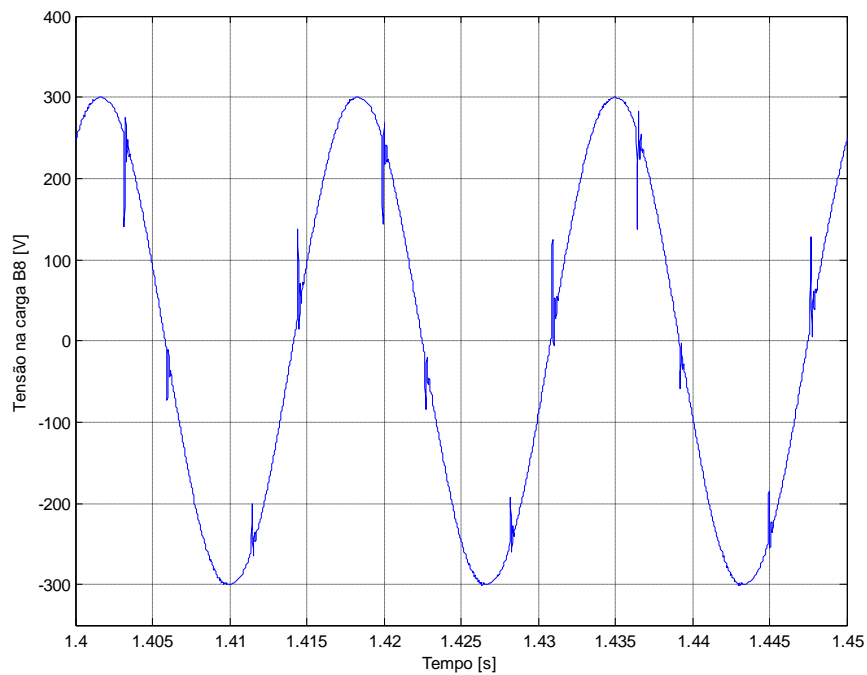


Figura 49 – Forma de onda da tensão na carga para o caso base do sistema conectado à rede de distribuição

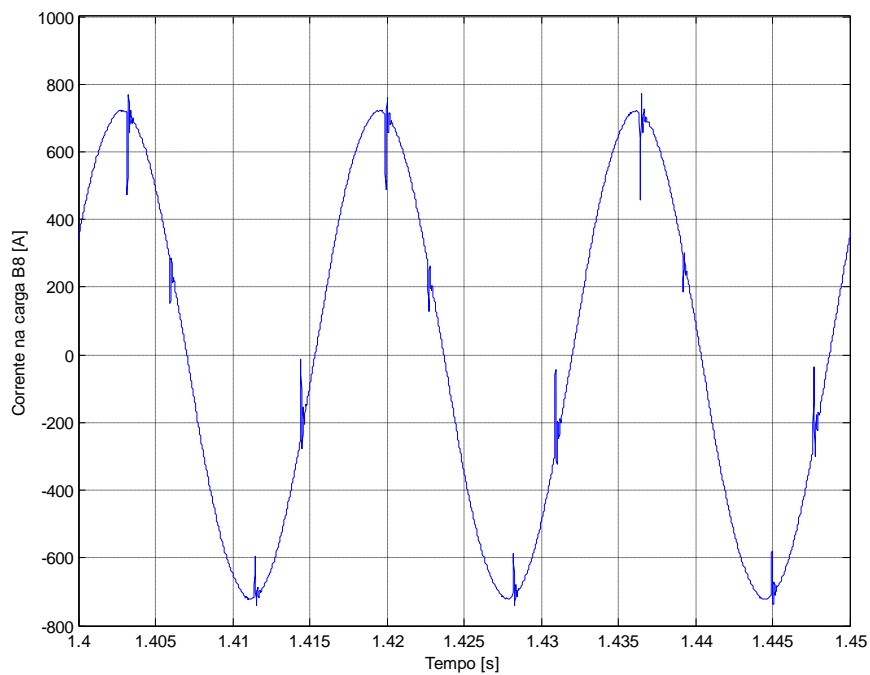


Figura 50 – Forma de onda da corrente na carga para o caso base do sistema conectado à rede de distribuição

Através dos gráficos, é possível observar a diferença entre a forma de onda da corrente que é fornecida pelo sistema fotovoltaico (Figura 48) e a que alimenta a carga (Figura 50). Essa última é praticamente senoidal. Este fato deve-se à corrente proveniente do sistema de distribuição, que para o sistema projetado é puramente senoidal, que acaba amenizando as distorções oriundas do sistema fotovoltaico.

Observa-se que tanto nas formas de onda das tensões como nas das correntes, ocorre o fenômeno denominado *notching*. O efeito *notching* é um distúrbio periódico que ocorre quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Durante esse período ocorre um súbito curto-circuito entre duas fases, que leva a tensão próxima à zero [37]. Sua existência é comum quando há o uso de dispositivos eletrônicos, como é o caso dos inversores. Nota-se que apesar da presença desse fenômeno, os índices de distorções harmônicas totais na carga apresentam baixos valores, conforme mostra a Tabela 17.

4.3.2 Caso 1

Como na operação do sistema isolado, neste primeiro caso, é variada a temperatura ambiente T_x em $\pm 20\%$.

Tabela 18 – Parâmetros do caso 1 do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores
T_{x1} (°C)	30
T_{x2} (°C)	20
S_x (W/m ²)	1000
m	0,95
f_c (Hz)	8000

Para este caso, os resultados são divididos em duas tabelas. Na Tabela 19 são apresentados os resultados para um aumento de 20% na temperatura T_x . E na Tabela 20, são expostos os resultados para uma redução de 20% na temperatura T_x .

Tabela 19 – Resultados do caso 1 para T_{x1} do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	212,3723	0,0210
I_{RMS} (A)	506,4359	0,0285
P_{carga} (kW)	167,6704	0,1510
Q_{carga} (kvar)	81,0351	0,1493
P_{TR2} (kW)	74,9094	27,1608
Q_{TR2} (kvar)	128,3733	-3,9369
P_{TRSF} (kW)	92,7610	-14,5126
Q_{TRSF} (kvar)	-47,3383	-10,2081
I_{TRSF_RMS} (A)	287,4721	-13,9334
DHV_T (%)	3,3721	-29,5174
DHI_T (%)	3,0373	-29,5045

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 17)

Tabela 20 – Resultados do caso 1 para T_{x2} do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	212,2325	-0,0448
I_{RMS} (A)	506,0075	-0,0561
P_{carga} (W)	167,1241	-0,1753
Q_{carga} (kvar)	80,7709	-0,1772
P_{TR2} (W)	49,4636	-16,0342
Q_{TR2} (kvar)	139,6645	4,5125
P_{TRSF} (W)	117,6605	8,4345
Q_{TRSF} (kvar)	-58,8936	11,7102
I_{TRSF_RMS} (A)	365,4309	9,4068
DHV_T (%)	5,6497	18,0883
DHI_T (%)	5,0884	18,1014

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 17)

Em ambas as situações, a rede de distribuição complementa a potência ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico. Nas duas situações, há o consumo de potência reativa tanto pela carga, quanto pelo sistema fotovoltaico.

O comportamento neste modo de operação continua como o esperado, uma vez que, a temperatura ambiente é inversamente proporcional ao desempenho de uma célula fotovoltaica. Com a elevação de T_x , as grandezas providas do sistema fotovoltaico apresentaram uma redução, em comparação com o caso base. A potência ativa fornecida pelo sistema solar apresenta uma redução de aproximadamente 14,5% e a corrente eficaz fornecida pelo mesmo uma queda de 13,93%.

Já para a situação em que há a diminuição de T_x , a potência ativa e a corrente eficaz fornecidas pelo sistema fotovoltaico têm seus valores aumentados em 8,43% e 9,4%, respectivamente.

As formas de onda de tensão e corrente no transformador do sistema fotovoltaico encontram-se na Figura 51 e na Figura 52. Já as curvas de tensão e corrente na carga CA estão ilustradas na Figura 53 e na Figura 54, respectivamente. Em cada gráfico, estão representadas as formas de onda do caso base, da variação de +20% em T_x e da variação de -20% em T_x .

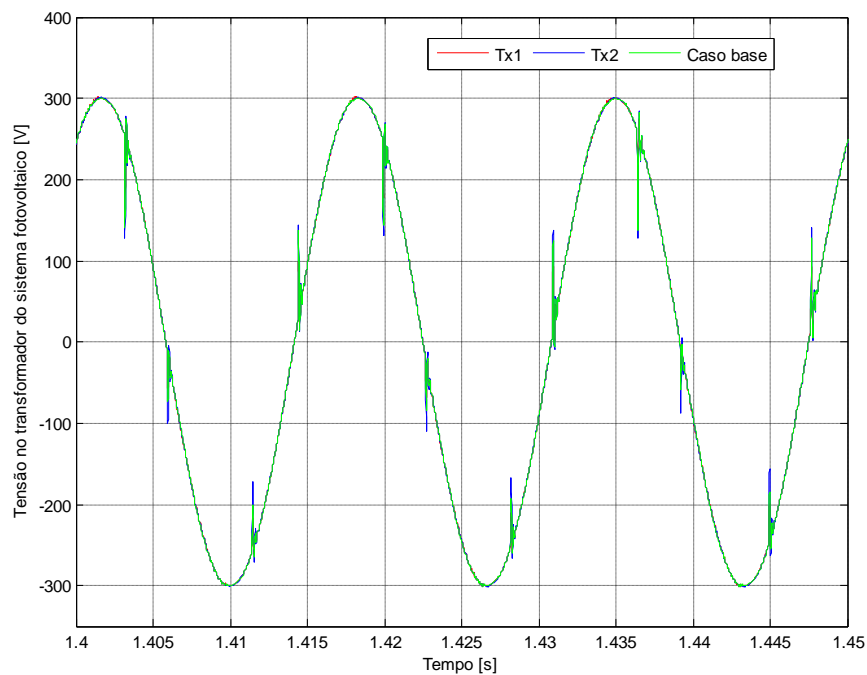


Figura 51 – Forma de onda da tensão no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 1 do sistema conectado à rede de distribuição

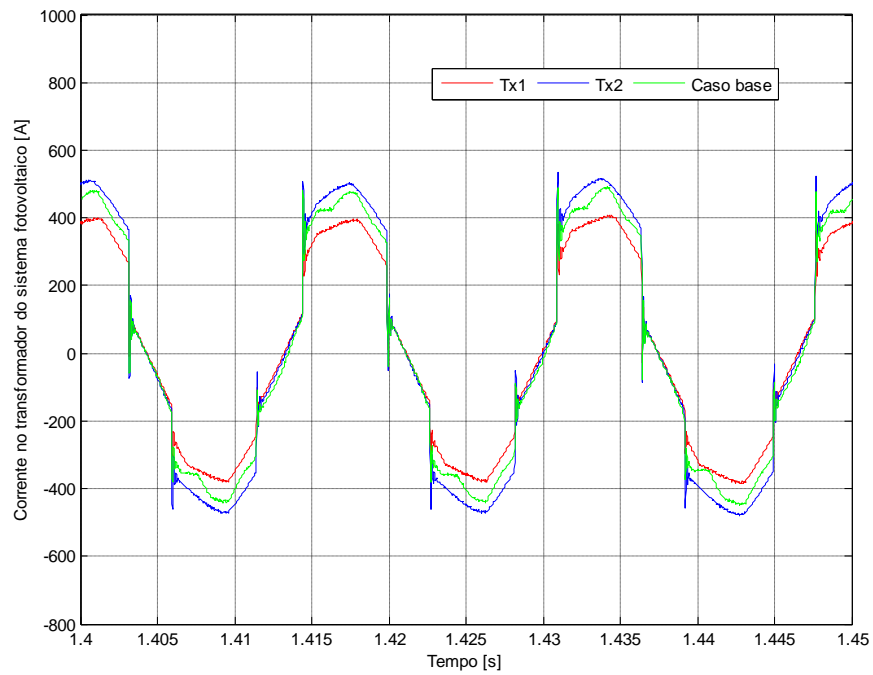


Figura 52 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 1 do sistema conectado à rede de distribuição

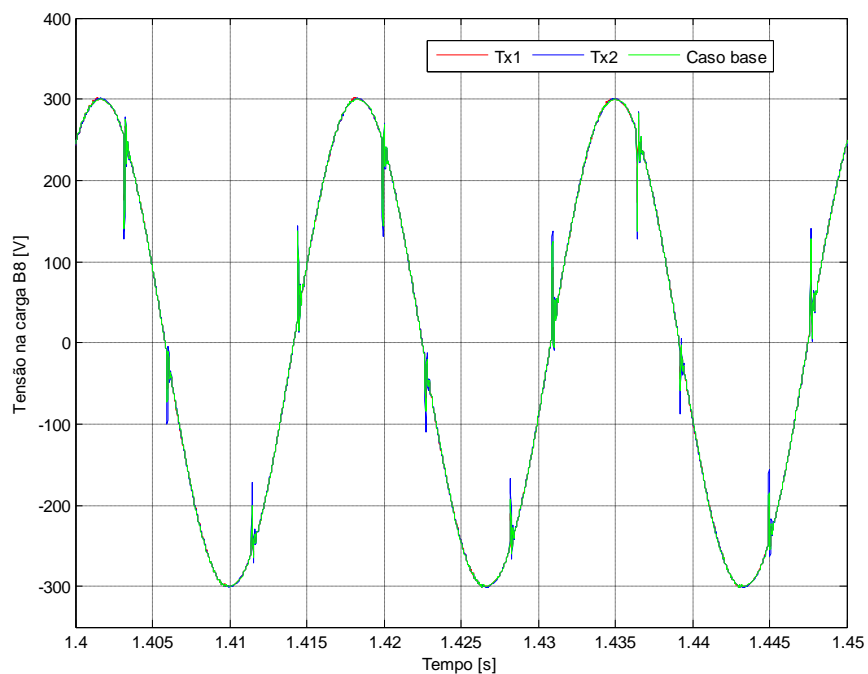


Figura 53 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 1 do sistema conectado à rede de distribuição

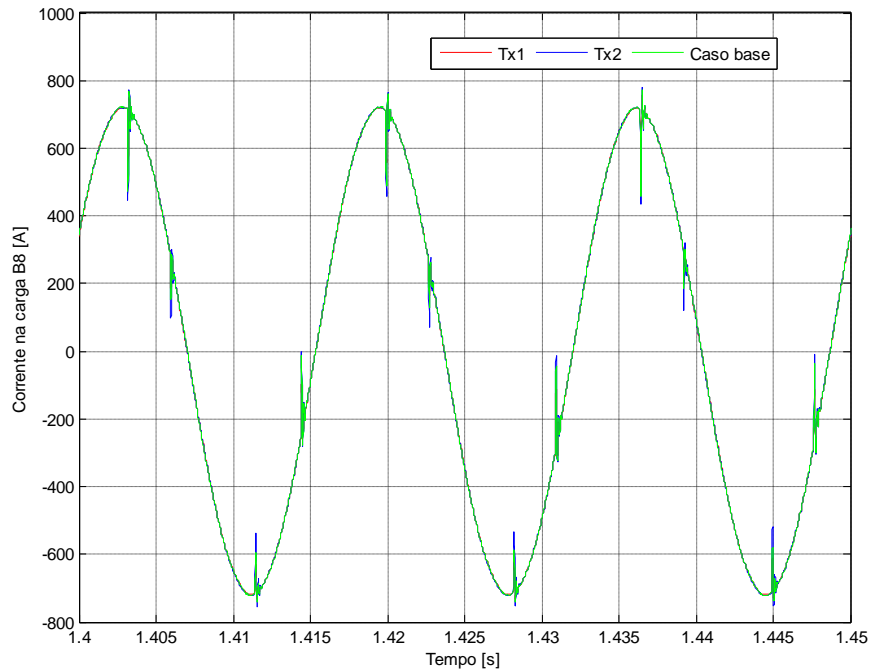


Figura 54 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 1 do conectado à rede de distribuição

Como pode ser observado, as variações das curvas de tensão não foram muito significativas, assim como ocorreu para o modo de operação isolado. No gráfico da corrente do transformador do sistema fotovoltaico (Figura 52), foi possível verificar uma alteração nos valores de pico das curvas. A correção desta variação, nos valores de pico, pode ser vista no gráfico da corrente fornecida à carga (Figura 54), devido à contribuição do sistema de distribuição de energia elétrica.

4.3.3 Caso 2

No caso 2, é variado o nível de irradiação solar S_x em $\pm 10\%$. Os parâmetros utilizados neste caso são dados na Tabela 21:

Tabela 21 – Parâmetros do caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores
T_x (°C)	25
S_{x1} (W/m ²)	1100
S_{x2} (W/m ²)	900
m	0,95
f_c (Hz)	8000

Para este caso, os resultados também são divididos em duas tabelas. Na Tabela 22 são apresentados os resultados para um aumento de 10% no nível de irradiação solar S_x . E na Tabela 23, são expostos os resultados para uma redução de 10% no nível de irradiação solar S_x .

Tabela 22 – Resultados do caso 2 para S_{x1} do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	212,2876	-0,0189
I_{RMS} (A)	505,9654	-0,0644
P_{carga} (kW)	166,6171	-0,4781
Q_{carga} (kvar)	80,5287	-0,4766
P_{TR2} (kW)	24,7414	-58,0008
Q_{TR2} (kvar)	149,9996	12,2463
P_{TRSF} (kW)	141,8757	30,7509
Q_{TRSF} (kvar)	-69,4709	31,7733
I_{TRSF_RMS} (A)	442,6969	32,5396
DHV_T (%)	8,0240	67,7152
DHI_T (%)	7,2274	67,7475

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 17)

Tabela 23 – Resultados do caso 2 para S_{x2} do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	212,5007	0,0815
I_{RMS} (A)	506,7872	0,0979
P_{carga} (kW)	168,0202	0,3599
Q_{carga} (kvar)	81,2055	0,3599
P_{TR2} (kW)	88,9860	51,0562
Q_{TR2} (kvar)	121,0238	-9,4366
P_{TRSF} (kW)	79,0342	-27,1631
Q_{TRSF} (kvar)	-39,8184	-24,4719
I_{TRSF_RMS} (A)	244,9255	-26,6714
DHV_T (%)	2,3401	-51,0879
DHI_T (%)	2,1085	-51,0619

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 17)

Em ambas as circunstâncias, a potência ativa consumida pela carga é fornecida pelo sistema fotovoltaico e pela rede de distribuição. As potências reativas consumidas pela carga e pelo sistema fotovoltaico são provenientes da rede elétrica.

Na primeira situação, na qual foi elevado o índice de irradiação solar, nota-se que ocorrem aumentos de 30,75%, da potência ativa, e 32,54%, da corrente eficaz, fornecidas

pelo sistema fotovoltaico. Na segunda situação deste caso, em que o índice S_x foi reduzido, percebe-se a diminuição da potência ativa, em 27,16%, e da corrente eficaz, em 26,67%.

Com base nas conclusões citadas, este caso também apresenta o comportamento esperado, já que o índice de irradiação solar é diretamente proporcional ao desempenho de um painel fotovoltaico.

As formas de onda de tensão e corrente na saída do transformador do sistema fotovoltaico encontram-se na Figura 55 e na Figura 56, respectivamente. Já as curvas na carga CA são ilustradas na Figura 57, tensão, e na Figura 58, corrente. Em cada gráfico, estão representadas as formas de onda do caso base, da variação de +10% em S_x e da variação de -10% em S_x .

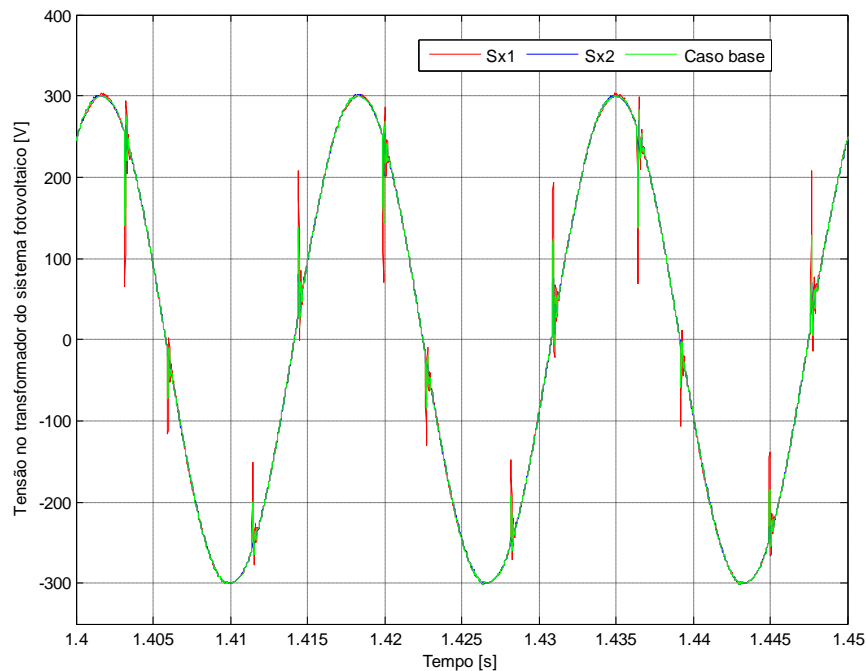


Figura 55 – Forma de onda da tensão no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição

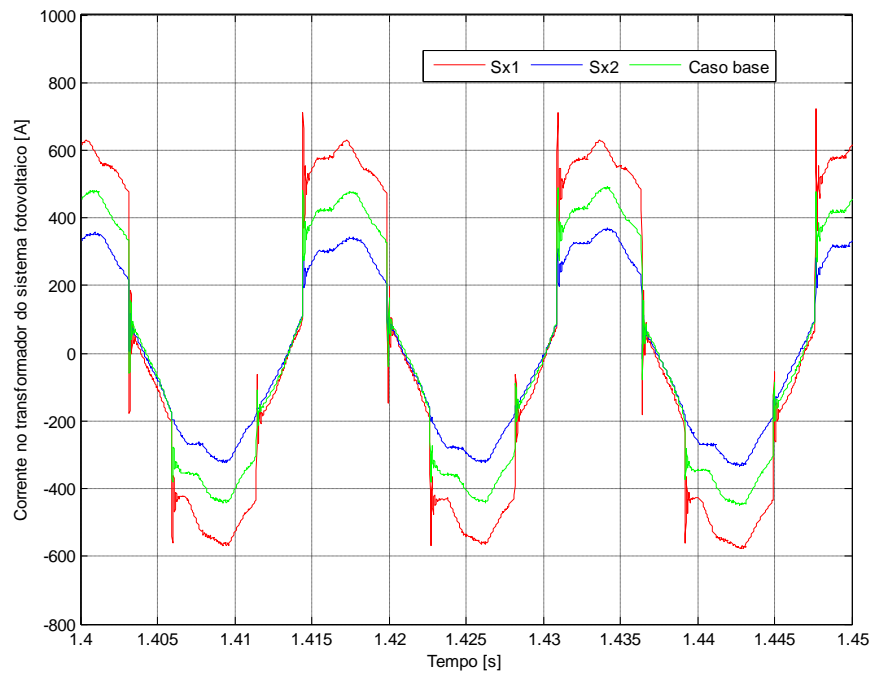


Figura 56 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição

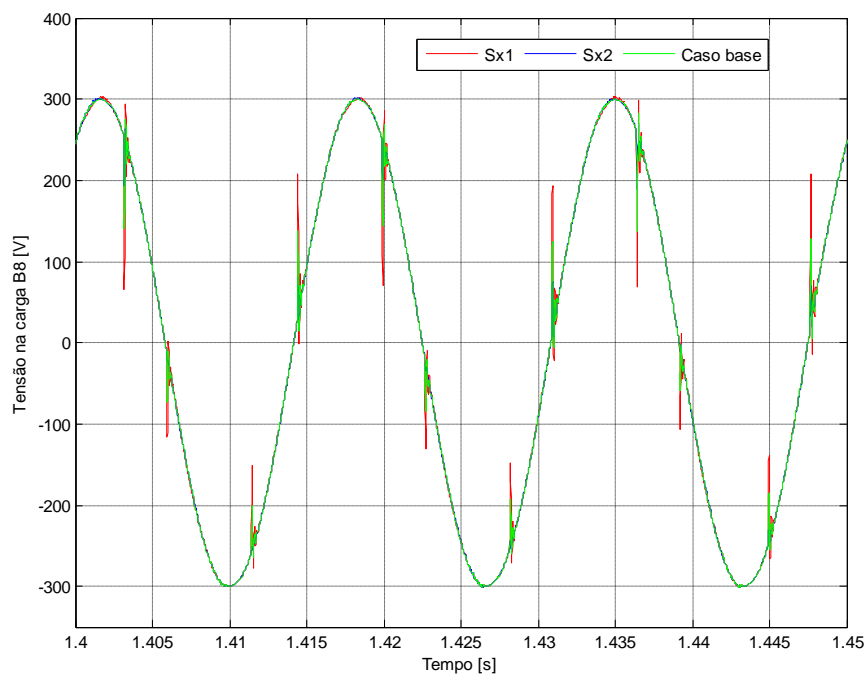


Figura 57 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição

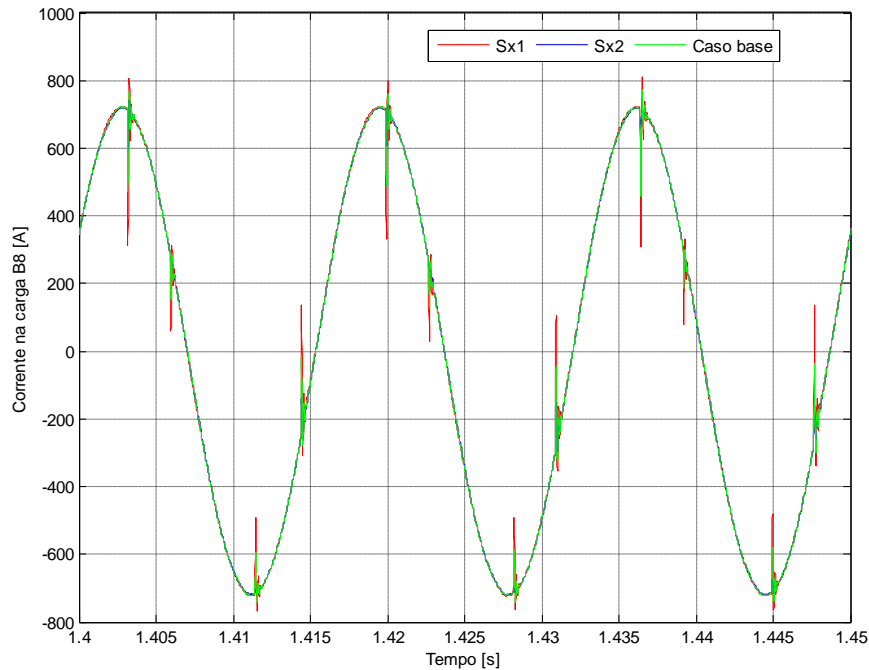


Figura 58 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 2 do sistema conectado à rede de distribuição

Na Figura 56 é possível verificar a diferença entre os valores de pico das correntes, na saída do transformador do sistema fotovoltaico, e as distorções presentes nas formas de onda. Nessa mesma figura, pode-se observar uma manifestação maior do efeito *notching* para o caso em que S_x teve seu valor elevado. Este comportamento pode justificar o pequeno aumento que os índices de distorções harmônicas totais apresentaram para esta situação. No entanto, esses índices ainda encontram-se abaixo do valor de referência, sendo assim aceitáveis.

Na Figura 58 é apresentada a forma de onda da corrente fornecida à carga para as três situações analisadas. Observa-se que não ocorrem diferenças significativas entre as mesmas, uma vez que não houve alterações na potência demandada pela carga. As variações de corrente e de potência do sistema fotovoltaico são compensadas pela rede elétrica, como é esperado. Além disso, observa-se o baixo nível de distorções harmônicas na forma de onda da corrente da carga. Esse baixo nível é resultante da soma da corrente proveniente da rede, a qual é puramente senoidal, com a corrente proveniente do sistema fotovoltaico, que é distorcida.

4.3.4 Caso 3

No caso 3, é realizada uma variação na frequência de chaveamento f_c do inversor. Os resultados deste são utilizados para indicar a influência de f_c nas formas de onda de saída do sistema fotovoltaico e nas formas de onda que alimentam a carga. Os parâmetros do caso 3 são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Parâmetros do caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores
T_x (°C)	25
S_x (W/m ²)	1000
m	0,95
f_{c1} (Hz)	1000
f_{c2} (Hz)	5000

Os resultados devido à variação de f_c encontram-se na Tabela 25, para f_{c1} , e na Tabela 26, para f_{c2} :

Tabela 25 – Resultados do caso 3 para f_{c1} do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	212,3823	0,0257
I_{RMS} (A)	506,5185	0,0448
P_{carga} (kW)	168,1192	0,4191
Q_{carga} (kvar)	81,2584	0,4253
P_{TR2} (kW)	66,9354	13,6247
Q_{TR2} (kvar)	119,4974	-10,5788
P_{TRSF} (kW)	101,1837	-6,7504
Q_{TRSF} (kvar)	-38,2390	-27,4678
I_{TRSF_RMS} (A)	306,7842	-8,1515
DHV _T (%)	3,9373	-17,7037
DHI _T (%)	3,5464	-17,6883

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 17)

Tabela 26 – Resultados do caso 3 para f_{c2} do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	212,6562	0,1547
I_{RMS} (A)	507,0375	0,1473
P_{carga} (kW)	167,7590	0,2039
Q_{carga} (kvar)	81,0920	0,2196
P_{TR2} (kW)	62,5480	6,1770
Q_{TR2} (kvar)	126,6179	-5,2504
P_{TRSF} (kW)	105,2110	-3,0388
Q_{TRSF} (kvar)	-45,5259	-13,6459
I_{TRSF_RMS} (A)	314,5000	-5,8415
DHV_T (%)	3,7713	-21,1734
DHI_T (%)	3,3971	-21,1535

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 17)

Em ambas as situações, o sistema fotovoltaico e a rede elétrica fornecem potência ativa à carga. Em relação à potência reativa, o sistema fotovoltaico e a carga consomem a potência fornecida pela rede.

A forma de onda da tensão, do transformador do sistema fotovoltaico, encontra-se na Figura 59. Na Figura 60, tem-se a forma de onda de sua corrente. Já as curvas da carga CA são ilustradas na Figura 61, tensão, e na Figura 62, corrente.

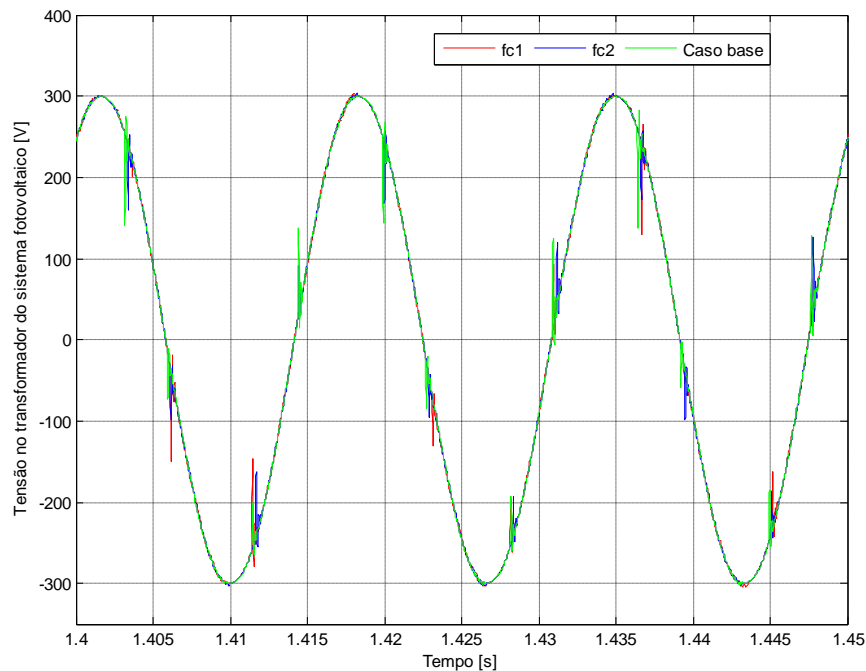


Figura 59 – Forma de onda da tensão no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição

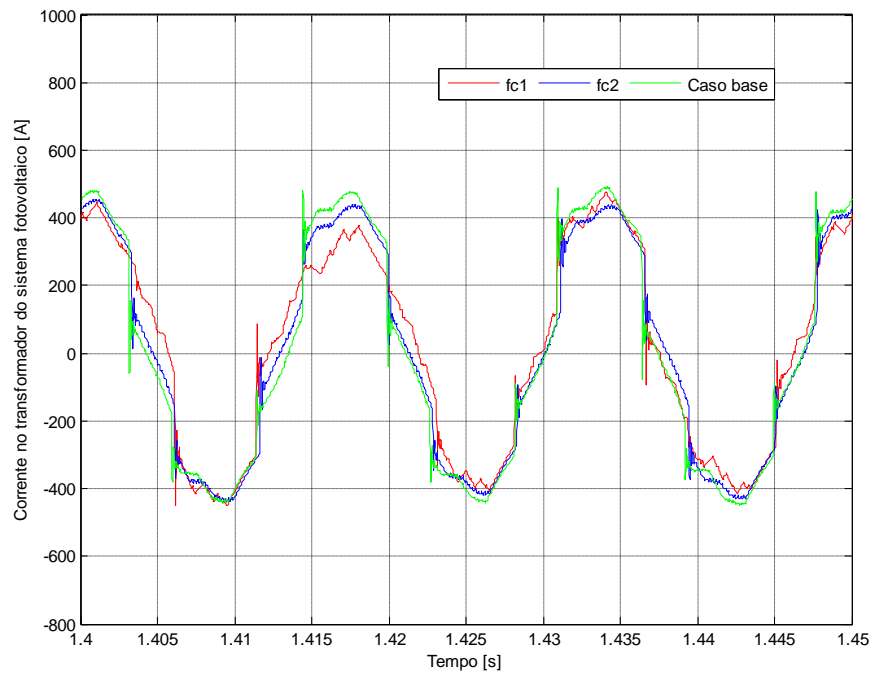


Figura 60 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição

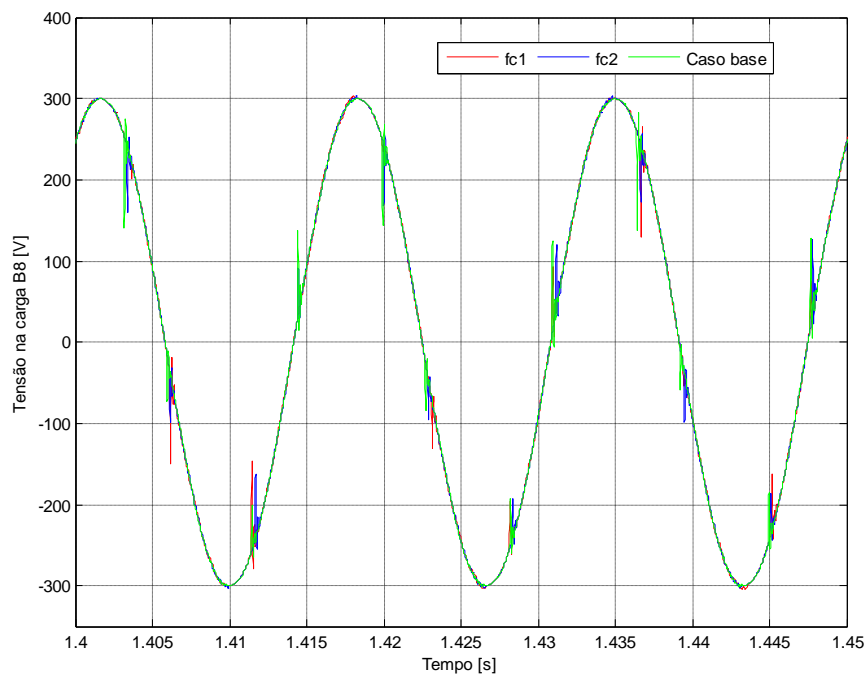


Figura 61 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição

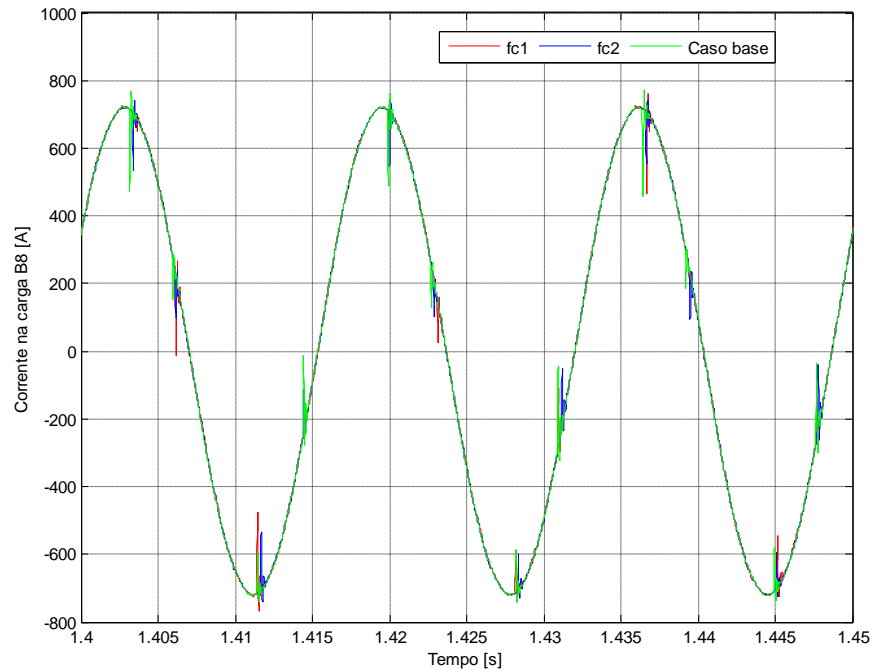


Figura 62 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 3 do sistema conectado à rede de distribuição

Nos gráficos apresentados, têm-se o comportamento do caso base, do caso em que a frequência de chaveamento é f_{c1} e do caso em que a frequência de chaveamento é f_{c2} .

Como pode ser avaliado na Figura 60, as formas de onda fornecidas pelo sistema fotovoltaico apresentam consideráveis distorções, devido à variação da frequência de chaveamento do inversor. Porém, ao contrário do que ocorreu na simulação do sistema fotovoltaico operando de modo isolado, a diminuição de f_c não prejudicou as formas de onda que alimentam a carga, como é ilustrado na Figura 61 e na Figura 62. Este resultado se deve ao sistema de distribuição de energia, que acaba amenizando as distorções provenientes do sistema fotovoltaico.

4.3.5 Caso 4

Neste caso, é verificada a influência que o índice de modulação do inversor apresenta sobre as grandezas na saída do sistema fotovoltaico e as que alimentam a carga CA. Para isso, é analisado o comportamento do sistema para dois valores diferentes de m . Os parâmetros utilizados nesse caso são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Parâmetros do caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores
T_x (°C)	25
S_x (W/m ²)	1000
m_1	0,7
m_2	0,99
f_c (Hz)	8000

Os resultados desta simulação encontram-se na Tabela 28, para m_1 , e na Tabela 29, para m_2 :

Tabela 28 – Resultados do caso 4 para m_1 do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	212,6435	0,1487
I_{RMS} (A)	507,1190	0,1634
P_{carga} (kW)	168,1683	0,4484
Q_{carga} (kvar)	81,2820	0,4544
P_{TR2} (kW)	90,9522	54,3939
Q_{TR2} (kvar)	117,9229	-11,7570
P_{TRSF} (kW)	77,2161	-28,8386
Q_{TRSF} (kvar)	-36,6409	-30,4991
I_{TRSF_RMS} (A)	234,3139	-29,8485
DHV_T (%)	1,9176	-59,9189
DHI_T (%)	1,7272	-59,9118

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 17)

Tabela 29 – Resultados do caso 4 para m_2 do sistema conectado à rede de distribuição

Parâmetros	Valores	Variações Percentuais* (%)
V_{RMS} (V)	212,4404	0,0531
I_{RMS} (A)	506,5431	0,0497
P_{carga} (kW)	167,3075	-0,0658
Q_{carga} (kvar)	80,8752	-0,0483
P_{TR2} (kW)	46,2962	-21,4109
Q_{TR2} (kvar)	135,2205	1,1870
P_{TRSF} (kW)	121,0112	11,5224
Q_{TRSF} (kvar)	-54,3453	3,0829
I_{TRSF_RMS} (A)	366,8939	9,8448
DHV_T (%)	5,2946	10,6661
DHI_T (%)	4,7683	10,6719

* Valores calculado em relação ao caso base (Tabela 17)

Para a primeira situação, em que o índice de modulação é igual a 0,7, a potência ativa fornecida pelo sistema fotovoltaico apresenta uma queda de 28,84% e sua corrente eficaz uma redução de 29,85%, em relação ao caso base. Já na segunda situação, na qual m é superior ao utilizado no caso base, a potência ativa tem um aumento de 11,52% e a corrente eficaz uma elevação de 9,84%.

Esse comportamento é esperado, uma vez que o índice de modulação interfere na largura do pulso de saída do inversor, que afeta o valor eficaz da corrente do sistema fotovoltaico.

As formas de onda de tensão e corrente no transformador do sistema fotovoltaico encontram-se na Figura 63 e na Figura 64, respectivamente. Já as curvas na carga CA são ilustradas na Figura 65 e na Figura 66. Nos gráficos está apresentado o comportamento do caso base, do caso em que o índice de modulação é m_1 e do caso em que o índice de modulação é m_2 .

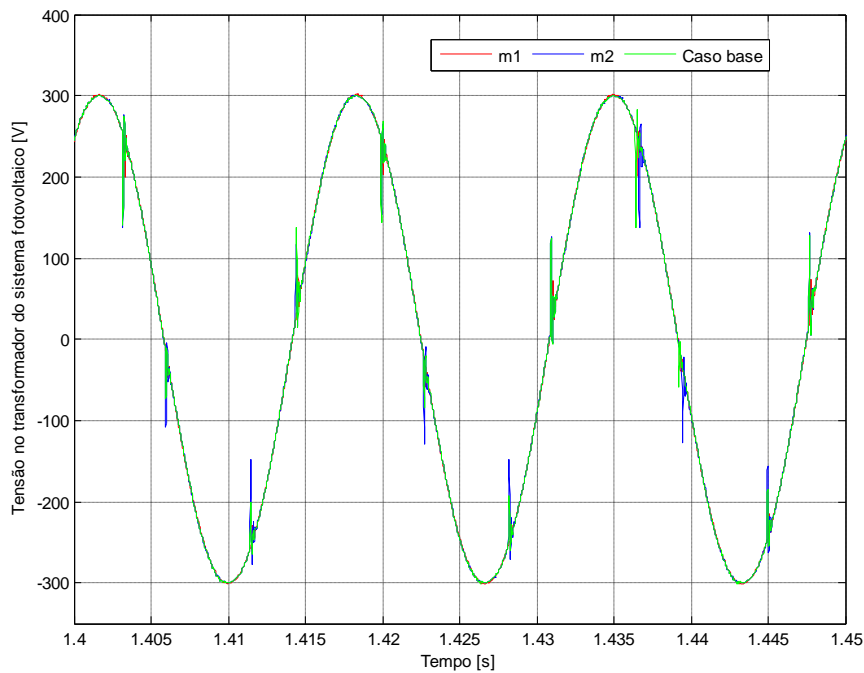


Figura 63 – Forma de onda da tensão no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição

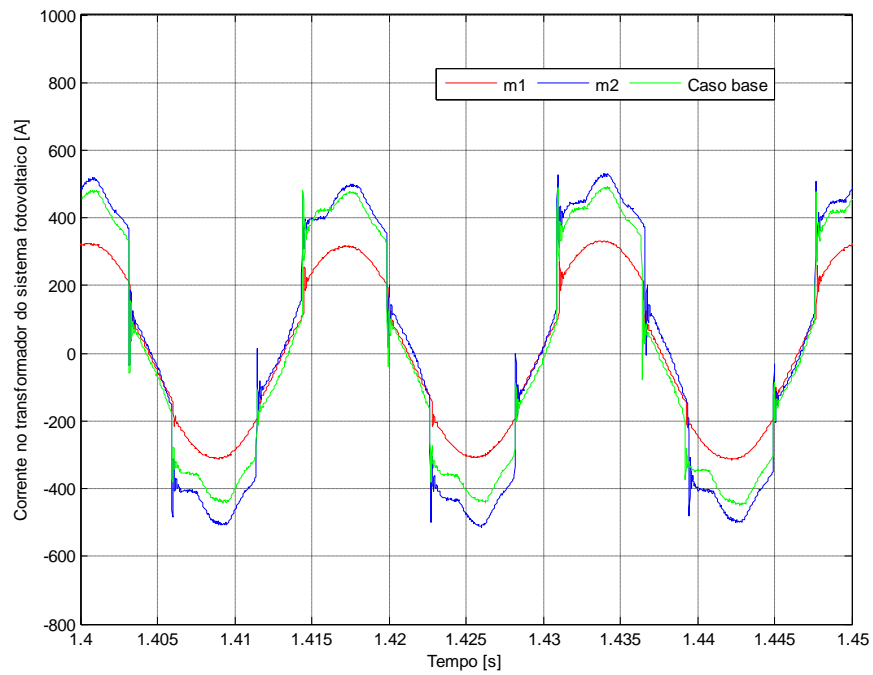


Figura 64 – Forma de onda da corrente no transformador do sistema fotovoltaico para o caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição

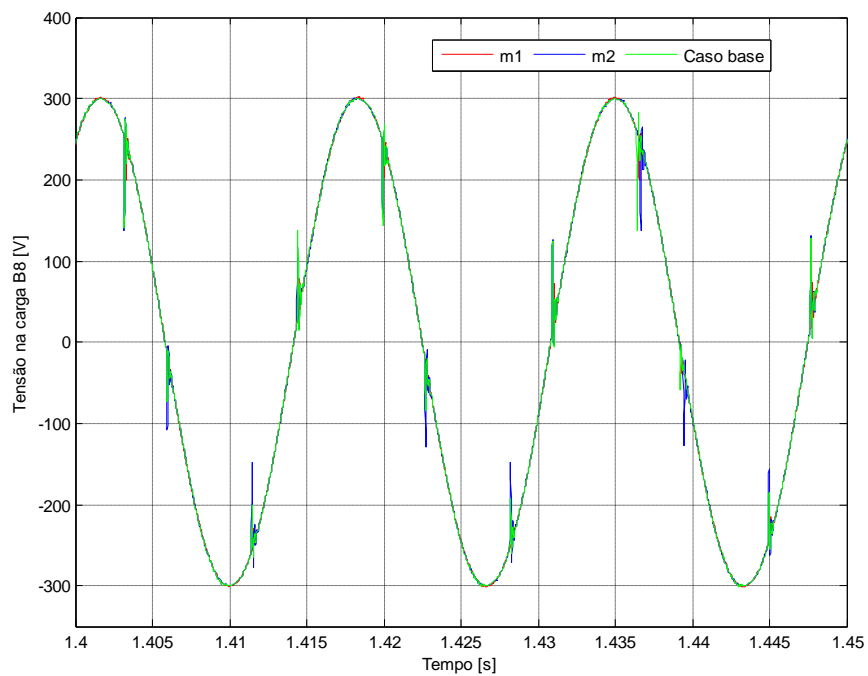


Figura 65 – Forma de onda da tensão na carga para o caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição

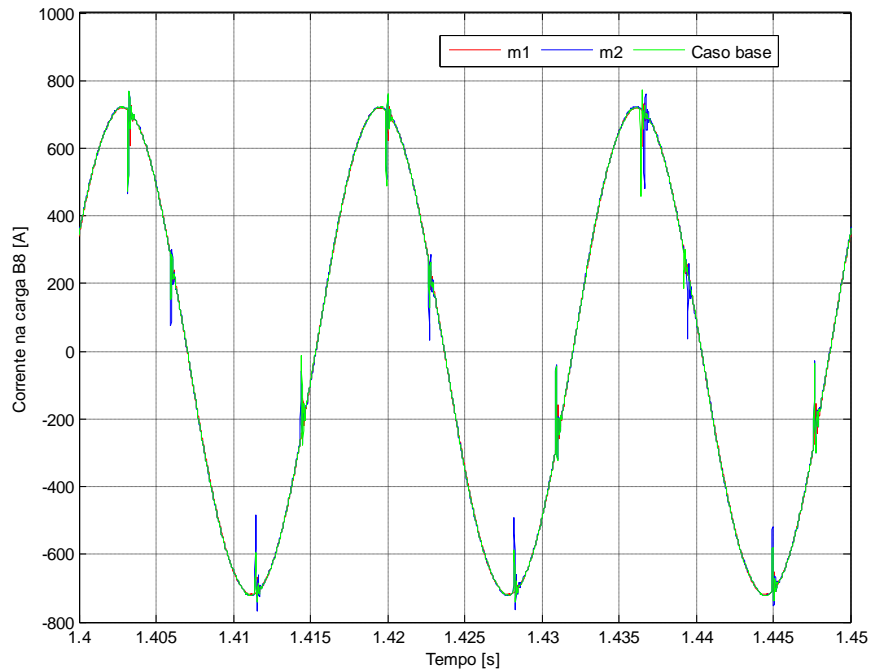


Figura 66 – Forma de onda da corrente na carga para o caso 4 do sistema conectado à rede de distribuição

No gráfico que apresenta a forma de onda da corrente na carga (Figura 66), é possível observar a forma como a rede elétrica complementa o fornecimento de energia para a carga. A diferença entre as formas de onda das três situações é praticamente imperceptível.

4.4 Análises do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição

As simulações do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de distribuição apresentam resultados coerentes. Em todos os casos, a rede elétrica complementa a potência ativa fornecida à carga B8, já que o sistema fotovoltaico não é suficiente para suprir a necessidade da carga.

Como pode ser verificado nas tabelas, os índices de distorções harmônicas totais na carga são pequenos e aceitáveis, não prejudicando a qualidade da energia elétrica. O fenômeno *notching* não apresenta interferência nesses índices, assim como as distorções das formas de onda geradas pelo sistema fotovoltaico. Essas distorções provenientes do painel solar são suavizadas pela rede de distribuição de energia, que, neste trabalho, foi projetada para fornecer um sinal puramente senoidal em sua saída. Dessa forma, a carga é

alimentada por formas de ondas praticamente senoidais em todos os casos deste modo de operação.

Em relação ao desempenho devido à variação dos parâmetros, pode-se dizer que o resultado é o mesmo apresentado para o sistema operando de modo isolado. As variações de T_x e S_x apresentam a resposta esperada na saída do sistema fotovoltaico, assim como as alterações de f_c e m . Entretanto, diferentemente do caso isolado, os parâmetros que mais influenciaram nos índices de distorções harmônicas, na carga, foram os parâmetros S_x e m . A situação em que S_x teve um valor igual a 1100W/m^2 , foi a que apresentou maiores índices de distorção. Já a situação em que $m = 0,7$, os índices obtidos foram os menores, inferiores a 2%. Para este modo de operação, também foi observado que a variação de f_c não afetou os índices de distorções harmônicas totais na carga, como ocorreu no modo de operação do sistema isolado. Mas é importante salientar que a alteração deste parâmetro possui maior influência nas formas de onda fornecidas pelo sistema fotovoltaico.

Um ponto importante a ser ressaltado é que para todos os casos, os valores de tensão e corrente eficazes e potências ativas e reativas da carga foram muito próximos. Desse modo, conclui-se que esta forma de operação é mais confiável que a operação isolada, do ponto de vista da carga, já que a mesma sempre receberá a energia necessária independentemente da situação.

5 Conclusões

A geração de energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma forma de geração de energia promissora. Atualmente existem diversas linhas de pesquisa para a geração de energia solar, com o objetivo de elevar seu desempenho e reduzir seu custo. Devido a esses dois fatores, custo e desempenho, a geração fotovoltaica não é competitiva em relação às fontes de energia convencionais. É utópico pensar em substituir integralmente a geração de energia térmica ou hidráulica pela geração solar. Entretanto, as aplicações em locais remotos, em dispositivos eletrônicos e como cogeração, estão sendo desenvolvidas e ampliadas.

O Brasil, com elevado potencial para a utilização deste tipo de conversão, não possui muitas pesquisas na área. Países com um nível de irradiação solar inferior, como os europeus, têm aplicações e investimentos bem maiores.

O objetivo deste trabalho, além de incentivar as linhas de pesquisas relacionadas às fontes alternativas de energia, foi modelar o sistema fotovoltaico operando em dois modos diferentes. Pode-se dizer que foi alcançado o que se esperava para este projeto. O comportamento do sistema nos dois modos de operação foi coerente e os resultados esperados foram obtidos.

As variações de temperatura ambiente e nível de irradiação solar afetam de forma mais significativa os valores de tensão, corrente e potência fornecidas pelo sistema fotovoltaico. Os índices de distorções harmônicas, durante a variação desses parâmetros, apresentaram valores inferiores àquele permitido pelo PRODIST. Esse é um resultado importante, pois indica que a qualidade da energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico não é prejudicada devido às variações das condições climáticas.

A variação da frequência de chaveamento do inversor modulado via PWM apresentou grande influência na geração de harmônicos nas formas de onda de saída do sistema fotovoltaico. Já a variação do índice de modulação do inversor apresentou maiores interferências nos valores de tensão, corrente e potência fornecidas pelo sistema fotovoltaico.

Através das curvas e dos valores fornecidos à carga, conclui-se que o modo de operação do sistema fotovoltaico interligado à rede é mais confiável que o modo de operação isolado, do ponto de vista da carga. Isso porque a carga receberia a potência necessária independente do período do dia ou de variações climáticas. No entanto, uma vantagem do sistema operando de forma isolada é a atuação em locais remotos, com auxílio de uma bateria para armazenamento de energia. Como foi possível observar no modo conectado à rede, o sistema fotovoltaico é capaz de fornecer grandes quantidades de

potência ativa, tensão e corrente, sendo este capaz de alimentar cargas relativamente elevadas.

Uma dificuldade encontrada, durante a realização dos testes, foi a determinação e introdução de alguns parâmetros de forma manual. Os valores adotados foram aqueles que se enquadraram melhor na maioria dos casos. Este problema poderia ser resolvido utilizando um sistema de controle para o sistema fotovoltaico. Desse modo, a escolha destes parâmetros seria de forma automática, aprimorando a qualidade dos resultados.

Este trabalho de conclusão de curso abordou um ponto específico deste vasto tema. O objetivo é utilizar este trabalho como base para outras pesquisas relacionadas à geração de energia solar fotovoltaica. Como por exemplo: implementação de outros tipos de células, comparação destas com a desenvolvida neste trabalho, variação de outros parâmetros, atuação deste sistema fotovoltaico com outra geração alternativa, implementação de laços de controle de tensão, potência ativa e potência reativa, implementação do regulador de tensão e banco de baterias.

Referências Bibliográficas

- [1] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Legislação**. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=legislacao.index&tipo=4>> Acesso em: 21 set. 2010.
- [2] EDP BANDEIRANTE. **Geração e renováveis**. 2007. Disponível em: <<http://www.bandeirante.com.br/energia/index.asp>> Acesso em: 22 set. 2010.
- [3] ELETROBRAS. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL. 1993. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?View={EE50CFB3-CA51-415F-A861-E49BD2A2C6FE}>> Acesso em: 22 set. 2010.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de informações da geração**. Brasília, DF. 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 19 mar. 2010.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica**. Brasília, DF. 2009. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/nreh2009772.pdf>>. Acesso em 19 mar. 2010.
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica**. Brasília, DF. 2002. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>>. Acesso em 19 mar. 2010.
- [7] BRASIL. Departamento Nacional de Aquecimento Solar da ABRAVA - DASOL. **Sobre Aquecimento solar**. 2010. Disponível em: <<http://www.dasolabrava.org.br/>> Acesso em: 21 set. 2010.
- [8] BRASIL. Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento - ABRAVA. Departamento Nacional de Aquecimento Solar - DASOL. **Manual de capacitação em projetos de sistemas de aquecimento solar**. São Paulo. 2008. 138 p.
- [9] International Energy Agency – IEA. Solar photovoltaic energy. **Technology Roadmap**. 2010. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/free_all_papers.asp> Acesso em: 1 out. 2010.

- [10] Solarbuzz: Solar Energy Research and Consultancy. **Marketbuzz 2010: Global PV Industry Report**. 2010. Disponível em: <<http://www.solarbuzz.com/Marketbuzz2010-intro.htm>> Acesso em: 2 nov. 2010.
- [11] MINTS, P. Europe gains PV pole position. **Renewable Energy Focus**, Oxford, v. 9, p. 30-33, mar./abr. 2008.
- [12] Meta Efficient. **The World's Largest Solar Stadium: 1.3 Megawatts**. Agosto de 2007. Disponível em: <<http://www.metaefficient.com>> Acesso em: 05 out. 2010.
- [13] BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM. 2003.
- [14] CUNHA, J. L. P. A. **Eletrificação de edificações rurais isoladas utilizando energia solar fotovoltaica**. 2006. 49 f. Monografia (Pós Graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- [15] OSIS, L. R. **Alimentação de motores para refrigeração doméstica utilizando energia solar fotovoltaica**. 2007. 81 f. Tese (Curso de Pós-graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia para a obtenção do título de especialista) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- [16] Solenerg Engenharia e Comércio Ltda. **Sistema de iluminação pública solar**. Disponível em < <http://www.solenerg.com.br/>>. Acesso em: 15 out. 2010.
- [17] Inovação Tecnológica. Funil solar: antenas de nanotubos concentram luz em células solares. Setembro de 2010. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br>> Acesso em: 22 set. 2010.
- [18] BRASIL. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 19 set. 2010.
- [19] GHENSEV, A. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. 2006. 154 f. Monografia (Pós Graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- [20] Enerwise: Soluções de energia. Disponível em: <<http://www.enerwise.pt/index.php>>. Acesso em: 29 set. 2010.
- [21] Imec. Powering a sustainable world. Disponível em: <http://www2.imec.be/be_en/research/photovoltaics-energy.html>. Acesso em: 29 set. 2010.

- [22] Bosch. Disponível em: <<http://www.bosch-solarenergy.com/>>. Acesso em: 05 out. 2010.
- [23] Portal das Energias Renováveis. Disponível em: <http://www.energiasrenovaveis.com/Area.asp?ID_area=8> Acesso em: 20 out. 2010.
- [24] PRIEB, C. W. M. **Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos**. 2002. 54f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [25] PATEL, M. R. **Wind and solar power systems**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [26] Kyocera. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.br/site/produtos.php>> Acesso em: 05 out. 2010.
- [27] OLIVEIRA, C. A. A. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- [28] MONTEIRO, F. A. M. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar**. 2007. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- [29] GreenField Solar. Disponível em: <http://greenfieldsolar.com/our_technology.php> Acesso em: 06 out. 2010.
- [30] Solenerg Engenharia e Comércio Ltda. Disponível em <www.solenerg.com.br>. Acesso em 11 de mar. 2009.
- [31] ALTAS I. H.; SHARAF A. M. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab – Simulink GUI Environment. **In: International Conference on Clean Electrical Power**, 2007, p. 341-345.
- [32] THE MATHWORKS. **MATLAB and Simulink for Technical Computing**. Version R2009a. [S.l], 2010. Disponível em: <www.mathworks.com>. Acesso em: 19 mar. 2010.

- [33] CABRAL C. V. T.; MACHADO NETO L. V. B.; OLIVEIRA FILHO D.; DINIZ A. S. A. C. Modelagem e simulação de gerador fotovoltaico In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Proceedings online...** Campinas: 2004. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022004000200019&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 21 out. 2010.
- [34] BURESCH M. Photovoltaic Energy Systems Design and Installation. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [35] FRANCHI C. M. **Inversores de frequência**: Teoria e aplicações. 1ª edição. São Paulo: Érica, 2008. 192p.
- [36] AHMED A. **Eletrônica de Potência**. 2ª reimpressão. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000. 479p.
- [37] OLESKOVICZ, M. **Qualidade da energia elétrica**. São Carlos: EESC – USP, 2007. 77p.
- [38] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 1. Brasília, DF. 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82> > Acesso em: 25 out. 2010

Apêndice – Parâmetros elétricos dos sistemas

Neste Apêndice serão apresentados os parâmetros de cada item utilizado na simulação das operações dos sistemas fotovoltaicos. As simulações foram realizadas no modo discreto, com um tempo de amostragem (T_s) igual a $10\mu s$.

Na Figura 28 estão presentes: a fonte de tensão controlada e o atraso. Os parâmetros destes são apresentados nas tabelas Tabela 30 e Tabela 31, respectivamente:

Tabela 30 – Parâmetros da fonte de tensão controlada

Parâmetros	
Tipo de fonte	DC
Amplitude inicial (V)	250

Tabela 31 – Parâmetros do atraso

Parâmetros	
Tempo de atraso (s)	10^{-3}
Saída inicial	0
Tamanho do buffer inicial	1024

Na Figura 32 é apresentada uma parte do sistema que representa a operação do sistema fotovoltaico. Nessa ilustração têm-se o inversor, o gerador discreto PWM e o Filtro LC (indutor e capacitor). Os parâmetros desses componentes são mostrados na Tabela 32, na Tabela 33, na Tabela 34 e na Tabela 35, respectivamente.

Tabela 32 – Parâmetros do inversor

Parâmetros	
Número de braços da ponte	3
Resistência Snubber R_s (Ω)	10^5
Capacitância Snubber C_s (F)	inf
Dispositivo de eletrônica de potência	IGBT/diodos
Resistência R_{on}	10^{-3}
Dispositivo V_f (V)	0
Diodo V_{fd} (V)	0
T_f (s)	10^{-6}
T_t (s)	2×10^{-6}

Tabela 33 – Parâmetros do gerador discreto PWM

Parâmetros	
Modo do gerador	Ponte de três braços (6 pulsos)
Frequência de chaveamento (Hz) - Caso base	8000
Tempo de amostragem (s)	Ts
Índice de modulação – Caso base	0,86
Frequência da tensão de saída (Hz)	60
Fase da tensão de saída (°)	0

Tabela 34 – Parâmetros do filtro LC indutor

Parâmetros	
Tipo de ramo	Indutor
Indutância (H)	2×10^{-3}

Tabela 35 – Parâmetros do filtro LC capacitor

Parâmetros	
Tipo de ramo	Capacitor
Capacitância (F)	$35,18 \times 10^{-6}$

Na Figura 33 tem-se o circuito que representa a rede elétrica durante as simulações. Na Tabela 36 encontram-se os dados da rede, na Tabela 37 os dados do transformador da SE, na Tabela 38 e na Tabela 39, os dados das linhas. Para esta modelagem, os cabos das linhas são compostos de alumínio. Na Tabela 40 e na Tabela 41 apresentam-se as características dos transformadores de cargas e na Tabela 42 estão os dados das cargas.

Tabela 36 – Parâmetros da Rede da Concessionária.

Parâmetros	
Tensão na rede (kV)	138
Frequência (Hz)	60
Nível de curto-circuito (MVA)	449,9
Corrente de curto-circuito (kA)	1,88
Zpositiva(+)/Znegativa(-)	1
Xzero(o)/Xpositiva(+)	3,4653
Rzero(o)/Xzero(o)	0,1763

Tabela 37 – Parâmetros do Transformador da Subestação.

Parâmetros	
Potência nominal (MVA)	25
Frequência nominal: (Hz)	60
Tensão do lado de alta: (kV)	138 com ligação em Δ (delta)
Tensão do lado de baixa: (kV)	11,9 com ligação em Yg (estrela aterrada)
Impedância de seqüência (+) / (-) (%)	14,75
Impedância de seqüência (o) (%)	12,54

O transformador da SE tem um ajuste no tap para proporcionar uma tensão maior na saída. Para esta modelagem, considerou-se um tap igual a 1,05%.

Tabela 38 – Impedâncias de Seqüência (+) / (-) e (o) dos cabos.

Impedância	Ohm/km
$R_+ = R_-$	0,1876
R_o	0,3639
$X_+ = X_-$	0,4034
X_o	2,0658

Tabela 39 – Comprimento das Linhas do Sistema da rede elétrica em Km.

Linha	Comprimento (Km)
B1/B4	0,75
B1/B2	1,50
B4/B5	0,50
B5/B6	1,00
B5/B7	0,25
B7/B9	1,00
SEBT/B1	1,00
SEBT/B10	1,00

Tabela 40 – Parâmetros do Transformador TR1

Parâmetros	
Potência nominal (kVA)	125
Frequência nominal: (Hz)	60
Tensão do lado de alta: (kV)	11,9 com ligação em Δ (delta)
Tensão do lado de baixa: (kV)	0,22 com ligação em Yg (estrela aterrada)
Impedância de seqüência (+) / (-) (%)	3,25
Impedância de seqüência (o) (%)	2,60

Tabela 41 – Parâmetros do Transformador TR2

Parâmetros	
Potência nominal (kVA)	250
Frequência nominal: (Hz)	60
Tensão do lado de alta: (kV)	11,9 com ligação em Δ (delta)
Tensão do lado de baixa: (kV)	0,22 com ligação em Yg (estrela aterrada)
Impedância de seqüência (+) / (-) (%)	3,25
Impedância de seqüência (o) (%)	2,60

Tabela 42 – Valores das Cargas do Sistema da rede elétrica.

Carga	MVA
Carga B3	0,1
Carga B6	4
Carga B8	0,2
Carga B9	3
Carga B10	5

Todas as cargas apresentam fator de potência igual a 0,94 indutivo.

Na Figura 34 encontra-se o circuito completo para a operação do sistema fotovoltaico no modo isolado. Alguns dos itens dessa ilustração já tiveram seus parâmetros especificados. Portanto, na Tabela 43 e na Tabela 44, têm-se os parâmetros do transformador trifásico e da carga CA, respectivamente.

Tabela 43 – Parâmetros do transformador trifásico

Parâmetro	
Potência nominal Pn (VA)	1000
Frequencia fn (Hz)	60
Tensão de linha – Bobina 1 V1 (Vrms)	220 com ligação em Δ (delta)
Resistência – Bobina 1 R1 (pu)	0,002
Indutância – Bobina 1 L1 (pu)	0,015
Tensão de linha – Bobina 2 V2 (Vrms)	220 com ligação em Yg (estrela aterrada)
Resistência – Bobina 2 R2 (pu)	0,002
Indutância – Bobina 2 L2 (pu)	0,015
Resistência de magnetização Rm (pu)	500
Indutância de magnetização Lm (pu)	500

Tabela 44 – Parâmetros da carga CA

Parâmetro	
Configuração	Yg (estrela aterrada)
Tensão de linha nominal Vn (Vrms)	220
Frequência nominal fn (Hz)	60
Potência ativa P (W)	500
Potência reativa indutiva QL (var positivo)	200
Potência reativa capacitiva Qc (var negativo)	0

Na simulação do sistema fotovoltaico interligado à rede, ocorreram algumas modificações nos parâmetros do gerador de pulsos discreto PWM, do transformador trifásico (TRSF) e da carga CA. Na Tabela 45, na Tabela 46 e na Tabela 47 encontram-se os parâmetros destes elementos. O restante dos componentes apresenta a mesma configuração da simulação do sistema no modo isolado.

Tabela 45 – Parâmetros do gerador discreto PWM no sistema interligado

Parâmetros	
Modo do gerador	Ponte de três braços (6 pulsos)
Frequencia de chaveamento (Hz) - Caso base	8000
Tempo de amostragem (s)	Ts
Índice de modulação – Caso base	0,95
Frequencia da tensão de saída (Hz)	60
Fase da tensão de saída (°)	85

Tabela 46 – Parâmetros do transformador do sistema fotovoltaico (TRSF)

Parâmetros	
Potência nominal Pn (kVA)	300
Frequencia fn (Hz)	60
Tensão de linha – Bobina 1 V1 (Vrms)	220 com ligação em Δ (delta)
Resistência – Bobina 1 R1 (pu)	0,002
Indutância – Bobina 1 L1 (pu)	0,015
Tensão de linha – Bobina 2 V2 (Vrms)	220 com ligação em Yg (estrela aterrada)
Resistência – Bobina 2 R2 (pu)	0,002
Indutância – Bobina 2 L2 (pu)	0,015
Resistência de magnetização Rm (pu)	500
Indutância de magnetização Lm (pu)	500

Tabela 47 – Parâmetros da carga CA no sistema interligado

Parâmetro	
Configuração	Yg (estrela aterrada)
Tensão de linha nominal Vn (Vrms)	220
Frequência nominal fn (Hz)	60
Potência ativa P (kW)	180
Potência reativa indutiva QL (kvar positivo)	87
Potência reativa capacitiva Qc (kvar negativo)	0