

LAURO DE VILHENA BRANDÃO MACHADO NETO

**CARACTERIZAÇÃO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS E
DESENVOLVIMENTO DE SEGUIDOR DE POTÊNCIA MÁXIMA
PARA SISTEMAS AUTÔNOMOS APLICADOS À
ELETRIFICAÇÃO RURAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de ***Doctor Scientiae***.

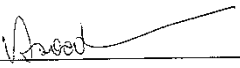
VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2006

LAURO DE VILHENA BRANDÃO MACHADO NETO

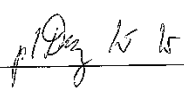
**CARACTERIZAÇÃO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS E
DESENVOLVIMENTO DE SEGUIDOR DE POTÊNCIA MÁXIMA
PARA SISTEMAS AUTÔNOMOS APLICADOS À
ELETRIFICAÇÃO RURAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de **Doctor Scientiae**.


APROVADA: 31 de julho de 2006.



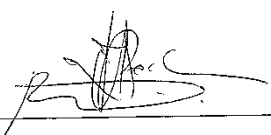
Profª. Antônia Sônia Alves C. Diniz
(Co-Orientadora)



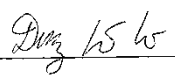
Prof. Paulo Marcos de B. Monteiro



Prof. Porfírio Cabaleiro Cortizo



Prof. Agnaldo José da Rocha Reis



Prof. Delly Oliveira Filho
(Orientador)

“De resto, a alma pode ter os seus prazeres à parte; mas, quanto aos que lhe são comuns com o corpo, dependem inteiramente das paixões: de modo que os homens que elas podem mais emocionar são capazes de apreciar mais doçura nesta vida. É verdade que também podem encontrar nela mais amargura, quando não sabem bem empregá-las e quando a fortuna lhes é contrária; mas a sabedoria é principalmente útil neste ponto, porque ensina a gente a tornar-se de tal forma seu senhor e a manejá-la com tal destreza que os males que causam são muito suportáveis, tirando-se mesmo certa alegria de todos.”

As Paixões da Alma
René Descartes
(1596-1650)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

À minha família e amigos.

Aos Conselheiros deste trabalho da Universidade Federal de Viçosa, UFV e da Companhia Energética de Minas Gerais, CEMIG.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas e à Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, pelo suporte financeiro deste trabalho.

Aos meus amigos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Aos meus amigos e alunos do Grupo de Estudos em Energia Solar - GREEN SOLAR e do Instituto Politécnico - IPUC da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas.

BIOGRAFIA

LAURO DE VILHENA BRANDÃO MACHADO NETO, filho de Eliezer Cantanhede de Albuquerque Neto e Maria Celeste de Albuquerque, nasceu em 04 de novembro de 1960, em Parnaíba, Piauí, Brasil.

Graduou-se em Engenharia Elétrica e recebeu o título de Mestre em Ciências – Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, em 1985 e 1989, respectivamente.

Em 1986 entrou para o Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas, onde é Professor Adjunto III e leciona disciplinas na área de Eletrônica de Potência. É Coordenador de Estágio do Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicação desde 1994.

Em 1996 trabalhou como professor visitante no Centro de Pesquisa Automotiva da FIAT Automóveis S.A. em Turim, Itália.

Em julho de 2006 recebeu o título de Doutor em Ciências – Engenharia Agrícola – Energia, pela Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Atualmente coordena os Laboratórios de Eletrônica de Potência e Sistemas Fotovoltaicos do Instituto Politécnico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas e tem projetos nas áreas de sistemas de energia híbridos e veiculares.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURA.....	ix
LISTA DE QUADROS.....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvii
RESUMO.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS APLICADOS À ELETTRIFICAÇÃO RURAL.....	1
1.2 ESTRUTURA DA TESE.....	5
CAPÍTULO 2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS.....	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 MATERIAIS E MÉTODO.....	9
2.2.1 O Estado da Arte.....	9
2.2.2 Modelagem de Células Solares.....	10
2.2.3 Modelagem de Geradores Fotovoltaicos.....	12
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
2.3.1 Programas de Simulação.....	31
2.3.2 Simulação dos Modelos Desenvolvidos.....	34
2.3.3 Simulação de Gerador Fotovoltaico Acoplado a Carga Resistiva...	50

2.4 CONCLUSÃO.....	55
CAPÍTULO 3 LEVANTAMENTO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE GERADORES FOTOVOLTAICOS.....	
3.1 INTRODUÇÃO.....	57
3.2 MATERIAIS E MÉTODO.....	59
3.2.1 Estudo das Normas para Ensaios de Geradores Fotovoltaicos.....	59
3.2.2 Desenvolvimento de Procedimentos para Levantamento de Curvas Características.....	61
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
3.3.1 Procedimento para Levantamento das Curvas Características.....	63
3.3.2 Bancada de Ensaios.....	64
3.3.3 Coleta de Dados.....	68
3.4 CONCLUSÃO.....	79
CAPÍTULO 4 ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELOS DE GERADORES FOTOVOLTAICOS.....	
4.1 INTRODUÇÃO.....	80
4.2 MATERIAIS E MÉTODO.....	82
4.2.1 Coeficientes de Temperatura.....	82
4.2.2 Técnicas de Estimação de Parâmetros.....	83
4.2.3 Aplicação da Técnica de Estimação de Parâmetros ao Modelo.....	87
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
4.3.1 Determinação dos Coeficientes de Temperatura.....	93
4.3.2 Estimação de Parâmetros do Modelo.....	101
4.3.3 Validação do Estudo.....	106
4.4 CONCLUSÃO.....	117
CAPÍTULO 5 CONVERSOR ELETRÔNICO PARA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA.....	
5.1 INTRODUÇÃO.....	118
5.2 MATERIAIS E MÉTODO.....	121
5.2.1 Seguidor de Potência Máxima.....	121

5.2.2 Conversor cc/cc Abaixador de Tensão.....	124
5.2.3 Sistema de Desenvolvimento Digital.....	131
5.2.4 Algoritmos de Máxima Transferência de Potência.....	134
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	144
5.3.1 Gerador Fotovoltaico sem e com Seguidor de Potência Máxima....	144
5.3.2 Protótipo do Seguidor de Potência Máxima.....	150
5.3.3 Monitoramento e Análise.....	153
5.4 CONCLUSÃO.....	160
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO GERAL	161
BIBLIOGRAFIA.....	164

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 2.1	Circuitos elétricos equivalentes de geradores fotovoltaicos: a) modelo ideal; b) modelo com resistência série; c) modelo com resistência série e paralela; e d) modelo com resistências e diodo de recombinação.....	13
Figura 2.2	Fluxograma do programa para simulação do modelo ideal de geradores fotovoltaicos.....	32
Figura 2.3	Fluxograma do programa para simulação do modelo ideal de geradores fotovoltaicos com coeficientes de temperatura.....	33
Figura 2.4	Curvas características tensão versus corrente parametrizadas em função da irradiação solar, temperatura de 25 °C e para a Condição Padrão de Teste - CPT fornecidas pelo fabricante (KYOCERA, 2006).....	35
Figura 2.5	Curvas características tensão versus corrente parametrizadas em função da temperatura, irradiação solar igual a 1.000 W/m ² e para a Condição Padrão de Teste - CPT fornecidas pelo fabricante (KYOCERA, 2006).....	35
Figura 2.6	Curvas características tensão versus corrente dos modelos para R _S =0,1 Ω e R _P =2.000 Ω.....	38
Figura 2.7	Curvas características tensão versus potência dos modelos para R _S =0,1 Ω e R _P =2.000 Ω.....	38
Figura 2.8	Figura 2.8 Curvas características tensão versus corrente dos modelos para R _S =3,0 Ω e R _P =2.000 Ω.....	39
Figura 2.9	Figura 2.9 Curvas características tensão versus potência dos modelos para R _S =3,0 Ω e R _P =2.000 Ω.....	39
Figura 2.10	Curvas características tensão versus corrente dos modelos para R _S =0,1 Ω e R _P =100 Ω.....	40
Figura 2.11	Curvas características tensão versus potência dos modelos para R _S =0,1 Ω e R _P =100 Ω.....	40

Figura 2.12	Curvas características tensão versus corrente dos modelos para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$	41
Figura 2.13	Curvas características tensão versus potência dos modelos para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$	41
Figura 2.14	Curvas características tensão–corrente parametrizadas em função da irradiação (W/m^2), para temperatura de 25 °C.....	44
Figura 2.15	Curvas características tensão–potência parametrizadas em função da irradiação (W/m^2), para temperatura de 25 °C.....	44
Figura 2.16	Eficiência em função da irradiação (W/m^2) para uma temperatura de 25° C.....	45
Figura 2.17	Fator de preenchimento em função da irradiação (W/m^2) para uma temperatura de 25 °C.....	45
Figura 2.18	Curvas Características tensão–corrente parametrizadas em função da temperatura e com uma irradiação de 1.000 W/m^2	46
Figura 2.19	Curvas características tensão–potência parametrizadas em função da temperatura e com uma irradiação de 1.000 W/m^2	46
Figura 2.20	Eficiência em função da temperatura para uma irradiação de 1.000 W/m^2	47
Figura 2.21	Fator de preenchimento em função da temperatura para uma irradiação de 1000 W/m^2	47
Figura 2.22	Curvas características tensão–corrente em condição nominal de operação para uma temperatura ambiente de 30 °C.....	48
Figura 2.23	Curvas características tensão–potência em condição nominal de operação para uma temperatura ambiente de 30 °C.....	48
Figura 2.24	Eficiência em função da irradiação e condição nominal de operação para uma temperatura ambiente de 30 °C.....	49
Figura 2.25	Fator de preenchimento em função da irradiação - condição nominal de operação - temperatura ambiente de 30 °C.....	49
Figura 2.26	Perfil de irradiação solar utilizado na simulação.....	50
Figura 2.27	Perfil de temperatura ambiente utilizado na simulação.....	51
Figura 2.28	Tensão no gerador fotovoltaico ou na carga.....	52
Figura 2.29	Corrente no gerador fotovoltaico ou na carga.....	52
Figura 2.30	Potência no gerador fotovoltaico ou na carga.....	53
Figura 2.31	Eficiência em relação aos pontos de máxima potência.....	53

Figura 2.32	Temperatura do gerador fotovoltaico.....	54
Figura 3.1	Janela do programa SunPlot 3D [®] da Maui Software [®]	64
Figura 3.2	Área de ensaios de geradores fotovoltaicos (Fonte: acervo do Grupo de Estudos em Energia - GREEN da PUC Minas).....	67
Figura 3.3	Diagrama da bancada de ensaios.....	67
Figura 3.4	Janela do programa para o cálculo da hora do ensaio e disposição dos geradores.....	69
Figura 3.5	Curvas características tensão versus corrente do Gerador Padrão - GP.....	72
Figura 3.6	Curvas características tensão versus corrente do Gerador Sob Ensaio - GSE.....	72
Figura 3.7	Curvas características tensão – corrente parametrizadas em função da temperatura do Gerador Padrão – GP.....	73
Figura 3.8	Curvas características tensão – corrente parametrizadas em função da temperatura do Gerador Sob Ensaio – GSE.....	73
Figura 3.9	Janela do programa para o cálculo da hora do ensaio e disposição dos geradores.....	74
Figura 3.10	Curvas características tensão versus corrente do Gerador Padrão – GP.....	77
Figura 3.11	Curvas características tensão versus corrente do Gerador Sob Ensaio – GSE.....	78
Figura 4.1	Conjunto de dados tensão – corrente M60 – GP.....	95
Figura 4.2	Conjunto de dados tensão – potência M60 - GP.....	95
Figura 4.3	Conjunto de dados tensão – corrente M60 - GSE.....	96
Figura 4.4	Conjunto de dados tensão – potência M60 – GSE.....	96
Figura 4.5	Conjunto de dados tensão – corrente M570 - GP.....	97
Figura 4.6	Conjunto de dados tensão – potência M570 - GP.....	97
Figura 4.7	Conjunto de dados tensão – corrente M570 - GSE.....	98
Figura 4.8	Conjunto de dados tensão – potência M570 – GSE.....	98
Figura 4.9	Conjunto de dados corrigidos tensão – corrente M60 – GP.....	99
Figura 4.10	Conjunto de dados corrigidos tensão – potência M60 – GP.....	99
Figura 4.11	Conjunto de dados corrigidos tensão – corrente M60 – GSE.....	100
Figura 4.12	Conjunto de dados corrigidos tensão – potência M60 – GSE.....	100

Figura 4.13	Modelo c estimado para o conjunto de dado M60 de GP e GSE.....	103
Figura 4.14	Resíduos do modelo c estimado para o conjunto de dado M60 de GP e GSE.....	103
Figura 4.15	Modelo c estimado para o conjunto de dado M570 de GP e GSE.....	104
Figura 4.16	Resíduos do modelo c estimado para o conjunto de dado M570 de GP e GSE.....	104
Figura 4.17	Curvas características tensão - corrente do GP e do fabricante parametrizadas em função da irradiação e para uma temperatura de 25 °C.....	107
Figura 4.18	Curvas características tensão - corrente do GP e do fabricante parametrizadas em função da temperatura e para uma irradiação de 1.000 W/m ²	107
Figura 4.19	Curvas características tensão - corrente do GSE e do fabricante parametrizadas em função da irradiação e para uma temperatura de 25 °C.....	108
Figura 4.20	Curvas características tensão - corrente do GSE e do fabricante parametrizadas em função da temperatura e para uma irradiação de 1.000 W/m ²	108
Figura 4.21	Curvas características do fabricante, do GP e de dois ensaios externos realizados no NREL para o GP.....	112
Figura 4.22	Curvas características do fabricante, do GP e de dois ensaios internos realizados no NREL para o GP.....	112
Figura 4.23	Curvas características do fabricante, do GP e de dois ensaios externos realizados no CEPEL.....	113
Figura 4.24	Curvas características do fabricante, do GSE e de dois ensaios externos realizados no NREL para o GP.....	113
Figura 4.25	Curvas características do fabricante, do GSE e de dois ensaios internos realizados no NREL para o GP.....	114
Figura 4.26	Curvas características do fabricante, do GSE e de dois ensaios externos realizados no CEPEL.....	114
Figura 5.1	Curvas características tensão-corrente parametrizadas em função da irradiação e reta de carga para uma resistência igual a 3 Ω.....	123
Figura 5.2	Curvas características tensão-potência parametrizadas em função da irradiação e curva de potência da carga para uma resistência igual a 3 Ω.....	123
Figura 5.3	Diagrama de blocos do Seguidor de Potência Máxima – SPM.....	124
Figura 5.4	Estrutura do conversor abaixador de tensão.....	125
Figura 5.5	Resultados da simulação (de cima para baixo): tensão na carga, corrente no indutor do filtro, tensão no chaveador, tensão do potencial positivo da carga em relação ao	

	terra, sinal de modulação (MLP) e tensão de alimentação.....	126
Figura 5.6	Detalhe das formas de ondas da Figura 5.5.....	126
Figura 5.7	Pinagem do MC68HC908QT4 (FREESCALE, 2006).....	132
Figura 5.8	Arquitetura do MC68HC908QT4 (FREESCALE, 2006).....	132
Figura 5.9	Ambiente de desenvolvimento Codewarrior® (FREESCALE, 2006).....	133
Figura 5.10	Gravador do microcontrolador (FREESCALE, 2006).....	133
Figura 5.11	Fluxograma do algoritmo Perturbação e Observação - P&O.....	136
Figura 5.12	Fluxograma do algoritmo P&O variante I.....	137
Figura 5.13	Fluxograma do algoritmo P&O variante II.....	138
Figura 5.14	Fluxograma do algoritmo Condutância incremental - CI....	139
Figura 5.15	Fluxograma do algoritmo Tensão Constante - TC.....	140
Figura 5.16	Fluxograma do algoritmo Corrente Constante - CC.....	141
Figura 5.17	Fluxograma do algoritmo implementado.....	142
Figura 5.18	Tensão do gerador sem e com SPM.....	144
Figura 5.19	Corrente do gerador sem e com SPM.....	145
Figura 5.20	Potência no gerador sem e com SPM.....	146
Figura 5.21	Eficiência em relação aos pontos de máxima potência sem e com SPM.....	146
Figura 5.22	Ganho de potência com o SPM.....	147
Figura 5.23	Curvas características tensão-corrente parametrizadas em função da irradiação e pontos de funcionamento sem e com SPM para a Condição Padrão de Teste – CPT.....	147
Figura 5.24	Curvas características tensão-potência parametrizadas em função da irradiação e pontos de funcionamento sem e com SPM para Condição Padrão de Teste - CPT.....	148
Figura 5.25	Curvas características tensão-corrente parametrizadas em função da irradiação e pontos de funcionamento sem e com SPM para Condição Nominal de Operação – CNO.	149
Figura 5.26	Curvas características tensão-potência parametrizadas em função da irradiação e pontos de funcionamento sem e com SPM para Condição Nominal de Operação – CNO.	149
Figura 5.27	Diagrama elétrico do seguidor de potência máxima.....	152
Figura 5.28	Fotografia do protótipo do seguidor de potência máxima...	152
Figura 5.29	Diagrama da bancada de monitoramento e análise de desempenho do seguidor de potência máxima.....	153
Figura 5.30	Perfis de irradiação solar monitorados.....	155
Figura 5.31	Formas de onda da corrente do gerador fotovoltaico.....	155

Figura 5.32	Formas de onda da tensão do gerador fotovoltaico.....	156
Figura 5.33	Formas de onda da potência do gerador fotovoltaico.....	157
Figura 5.34	Curvas de eficiências em relação aos pontos de potência máxima.....	157
Figura 5.35	Curvas características tensão versus corrente e pontos de funcionamento com seguidor de potência máxima.....	158
Figura 5.36	Curvas características tensão versus potência e pontos de funcionamento com seguidor de potência máxima.....	159

LISTA DE QUADROS

		Página
Quadro 2.1	Dados Módulo Fotovoltaico KC50 para CPT (KYOCERA, 2006).....	34
Quadro 2.2	Valores típicos dos parâmetros do Silício (GREEN, 2001).....	34
Quadro 2.3	Simbologia utilizada para apresentação dos resultados....	36
Quadro 2.4	Resultados da simulação para $R_S=0,1 \Omega$ e $R_P=2000 \Omega$	42
Quadro 2.5	Resultados da simulação para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=2000 \Omega$	42
Quadro 2.6	Resultados da simulação para $R_S=0,1 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$	42
Quadro 2.7	Resultados da simulação para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$	43
Quadro 3.1	Localização – cidade de Belo Horizonte.....	68
Quadro 3.2	Dados solares do primeiro ensaio.....	68
Quadro 3.3	Condições ambientais do primeiro ensaio.....	70
Quadro 3.4	Parâmetros dos geradores no primeiro ensaio.....	71
Quadro 3.5	Dados solares do segundo ensaio.....	75
Quadro 3.6	Condições ambientais do segundo ensaio.....	76
Quadro 3.7	Parâmetros dos geradores no segundo ensaio.....	77
Quadro 4.1	Condições de ensaio.....	93
Quadro 4.2	Parâmetros dos geradores.....	94
Quadro 4.3	Parâmetros corrigidos.....	94
Quadro 4.4	Resultados da estimação de parâmetros.....	105
Quadro 4.5	Translação dos dados para a Condição Padrão de Teste - CPT.....	105
Quadro 4.6	Análise de Erro 1 – GP.....	109
Quadro 4.7	Análise de Erro 2 – GP.....	109
Quadro 4.8	Análise de Erro 1 – GSE.....	109
Quadro 4.9	Análise de Erro 2 – GSE.....	109

Quadro 4.10	Condições de ensaios e principais parâmetros para os diversos ensaios realizados.....	115
Quadro 4.11	Análise de erros dos diversos ensaios realizados.....	116
Quadro 5.1	Parâmetros da carga e gerador fotovoltaico.....	154

LISTA DE SÍMBOLOS

J	- densidade de corrente total (A/cm^2);
J_{CC}	- densidade de corrente de curto-circuito (A/cm^2);
J_{escura}	- densidade de corrente escura total (A/cm^2);
J_0	- densidade de corrente de saturação reversa (A/cm^2);
V	- tensão nos terminais da célula solar (V);
v_T	- tensão térmica (eV);
λ	- comprimento de onda (μm);
η_{QI}	- eficiência quântica interna (%);
η_{QE}	- eficiência quântica externa (%);
ϕ_0	- fluxo espectral de fótons na superfície do emissor ($fóton/cm^2 \mu m$ s);
R	- coeficiente de reflectância – adimensional;
q	- carga do elétron = $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb;
λ	- comprimento de onda (μm);
R_{EI}	- resposta espectral interna (A/W);
R_{EE}	- resposta espectral externa (A/W);
I_λ	- irradiância espectral ($W/m^2 \mu m$);
K	- constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ joule/K);
T	- temperatura (K);
A	- área total da célula (cm^2);
I_{CC}	- corrente de curto-circuito em Condição Padrão de Teste – CPT (A);
I_{01}	- corrente de saturação reversa do diodo de difusão em Condição Padrão de Teste – CPT (A);
I_{CCa}	- corrente de curto-circuito ou corrente foto-gerada normalizada do

	gerador fotovoltaico (A);
n_P	- número de células em paralelo do gerador fotovoltaico;
G	- irradiação solar (W/m^2);
i	- corrente do gerador fotovoltaico (A);
n_S	- número de células em série do gerador fotovoltaico;
n_1	- fator de idealidade do diodo de difusão – adimensional;
v	- tensão do gerador fotovoltaico (V);
V_{CAa}	- tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico (V);
p	- potência do gerador fotovoltaico (W);
V_M	- tensão no ponto de máxima potência (V);
I_M	- corrente no ponto de máxima potência (A);
P_M	- potência no ponto de máxima potência (W);
I_L	- corrente foto-gerada (A);
I_{Lnom}	- corrente foto-gerada em Condição Padrão de Teste - CPT (A);
K_0	- coeficiente da corrente foto-gerada – adimensional;
K_1	- coeficiente da corrente de saturação reversa do diodo de difusão – adimensional;
T_C	- temperatura da célula (K);
V_g	- tensão da banda proibida (V);
T_{AMB}	- temperatura ambiente ($^{\circ}C$);
TONC	- temperatura de operação nominal da célula;
KT_{ICCR}	- coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito ($A/^{\circ}C$);
KT_{VCAR}	- coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto ($V/^{\circ}C$);
I_{CCR}	- corrente de curto-circuito – CPT (A);
V_{CAR}	- tensão de circuito aberto - CPT (V);
T_R	- temperatura de referência - CPT ($^{\circ}C$);
n_{MS}	- número de módulos em série do gerador;
n_{MP}	- número de módulos em paralelo do gerador;
R_{SM}	- resistência série do módulo (Ω);
R_S	- resistência série do gerador (Ω);
R_{Snom}	- resistência série do gerador - CPT (Ω);
K_3	- coeficiente da resistência série do gerador – adimensional;
R_{PM}	- resistência série do módulo (Ω);

- R_P - resistência série do gerador (Ω);
- R_{Pnom} - resistência paralela do gerador - CPT (Ω);
- K_4 - coeficiente da resistência paralela do gerador – adimensional;
- n_2 - fator de idealidade do diodo de recombinação – adimensional;
- I_{02} - corrente de saturação reversa do diodo de recombinação (A);
- K_2 - coeficiente da corrente de saturação reversa do diodo de recombinação – adimensional;
- b - razão da corrente de curto-circuito normalizada pela corrente de saturação reversa do gerador – adimensional;
- V_{M1} - tensão no ponto de máxima potência (V) – aproximação 1;
- I_{M1} - corrente no ponto de máxima potência (A) – aproximação 1;
- V_{M2} - tensão no ponto de máxima potência (V) – aproximação 2;
- F_{PR} - fator de preenchimento do gerador fotovoltaico –adimensional;
- η_{GF} - eficiência do gerador fotovoltaico (%);
- E - energia produzida pelo gerador (Wh);
- P_i - potência do gerador no instante i de amostragem (W);
- Δt - intervalo de amostragem (h);
- P - potência de saída do gerador (W);
- a e b - parâmetros de ajuste – (a – adimensional e b (W));
- P_{max} - potência máxima para uma dada irradiação e temperatura (W);
- I_{fv} - corrente de saída do ponto de tensão fixa para uma dada irradiação e temperatura (A);
- j - índice do maior valor de irradiação obtido;
- k - índice do maior valor de temperatura obtido;
- t - fração de interpolação da irradiação;
- u - fração de interpolação da temperatura;
- I - corrente de saída do gerador (A);
- V - tensão de saída do gerador (V);
- α - coeficiente de temperatura da corrente ($1/^\circ\text{C}$);
- β - coeficiente de temperatura da tensão ($1/^\circ\text{C}$);
- δ - coeficiente da irradiação para a tensão – adimensional;
- i_n - corrente normalizada - adimensional;
- v_n - tensão normalizada – adimensional;

r_i	- resíduo do dado i ;
y_i	- dado real i ;
\hat{y}_i	- dado estimado i ;
n	- número de dados;
SQE	- soma quadrática dos erros;
y	- vetor de resposta $n \times 1$;
X	- matriz do modelo $n \times m$;
β	- vetor de parâmetros $m \times 1$;
ϵ	- vetor de erros $n \times 1$;
f	- função de X e β ;
SQR	- soma quadrática da regressão;
SQT	- soma quadrática total;
\bar{y}	- vetor de resposta médio $n \times 1$;
RQ	- quadrado dos coeficientes de correlação múltipla;
m	- número de parâmetros a serem estimados;
v	- grau de liberdade do resíduo;
ARQ	- ajuste de RQ;
RQME	- raiz quadrada média do erro;
EQM	- erro quadrático médio;
$KT_{VCA_{PADRÃO}}$	- coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto do Gerador Padrão – GP ($V/^\circ C$);
$KT_{ICC_{PADRÃO}}$	- coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito do Gerador Padrão – GP ($A/^\circ C$);
$KT_{VCA_{ENSAIO}}$	- coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto do Gerador Sob Ensaio – GSE ($V/^\circ C$);
$KT_{ICC_{ENSAIO}}$	- coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito do Gerador Sob Ensaio – GSE ($A/^\circ C$);
Z_e	- impedância estática do gerador fotovoltaico;
Z_d	- impedância dinâmica do gerador fotovoltaico;
t_1	- tempo que o transistor conecta a fonte à carga e filtro (s);
t_2	- tempo de condução do diodo de roda livre (s);
t_3	- tempo em que nenhum cheveador está conduzindo (s);

T_C	- período de chaveamento (s);
f_C	- frequência de chaveamento;
D_C	- ciclo de trabalho;
V_S	- tensão de saída (V);
V_E	- tensão de entrada (V);
I_S	- corrente de saída (A);
I_E	- corrente de entrada (A);
R_{DSon}	- resistência de condução do chaveador (Ω);
V_d	- queda de tensão no diodo de roda livre (V);
L	- indutor do filtro de saída (H);
C	- capacitor do filtro de saída (F);
V_{RDS}	- queda de tensão na resistência de condução do chaveador (V);
I_P	- valor de pico da corrente no indutor (A);
d_1	- ciclo de trabalho da condução;
d_2	- ciclo de trabalho do bloqueio;
$i_{m\acute{e}dia}$	- corrente média do indutor em um período de chaveamento (A);
$I_{m\acute{e}dia}$	- corrente média do indutor em regime permanente (A);
$\hat{i}_{m\acute{e}dia}$	- perturbação com pequena amplitude na corrente média do indutor em regime permanente (A);
Z	- impedância de saída (Ω);
\hat{V}_S	- perturbação com pequena amplitude na tensão de saída em regime permanente (V);
\hat{V}_E	- perturbação com pequena amplitude na tensão de entrada em regime permanente (V);
s	- operador laplaciano;
R_C	- resistência série do capacitor do filtro de saída (Ω);
C	- capacitor do filtro de saída (F);
L	- indutor do filtro de saída (H);
R	- resistência de carga (Ω);
\hat{d}_1	- perturbação com pequena amplitude no ciclo de trabalho da condução (s);
η_{mtp}	- eficiência do conversor com máxima transferência de potência;
$P_{saída}$	- potência de saída do gerador fotovoltaico para uma determinada

irradiação e temperatura;

$P_{\text{máxima}}$ - potência máxima de saída para uma determinada irradiação e temperatura.

RESUMO

MACHADO NETO, Lauro de Vilhena Brandão, Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2006. **Caracterização de geradores fotovoltaicos e desenvolvimento de seguidor de potência máxima para sistemas autônomos aplicados à eletrificação rural.** Orientador: Delly Oliveira Filho. Co-Orientadores: Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz e José Helvecio Martins.

A maximização da eficiência na conversão de energia elétrica é essencial para o desenvolvimento da viabilidade técnica e econômica dos sistemas de energia solar fotovoltaica. Este trabalho apresenta a caracterização de geradores fotovoltaicos e o desenvolvimento de conversor eletrônico para máxima transferência de potência em um sistema autônomo aplicado à eletrificação rural. O sistema fotovoltaico utilizado é similar aos sistemas instalados pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG nas residências de comunidades isoladas dentro dos programas *Luz Solar* e *Luz Para Todos*. Inicialmente foram desenvolvidos modelos e procedimentos de ensaios de geradores fotovoltaicos, cobrindo requisitos mínimos de desempenho e com adequações às normas nacionais e internacionais. A partir da coleta de dados foi realizada a estimação de parâmetros do modelo do gerador fotovoltaico. A validação do procedimento de ensaios e da estimação foi realizada por meio da comparação com ensaios realizados no Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos da América - NREL. Os erros percentuais obtidos foram menores que 6,0%. O conversor para máxima transferência de potência consiste de um conversor de corrente contínua na configuração abaixadora e o algoritmo de controle foi implementado utilizando um microcontrolador. O sistema foi simulado com o objetivo de otimizar o projeto e realizar um estudo comparativo com os resultados do monitoramento

do sistema. Os resultados do monitoramento do protótipo do conversor para máxima transferência de potência apresentaram uma eficiência na faixa de 80 a 90%. Estas iniciativas estão dando suporte às ações governamentais no controle da qualidade de equipamentos e promovendo o desenvolvimento de tecnologia nacional.

ABSTRACT

MACHADO NETO, Lauro de Vilhena Brandão, Universidade Federal de Viçosa, July, 2006. **Characterization of photovoltaic generators and development of a maximum power point tracking for stand-alone systems applied to rural electrification.** Adviser: Delly Oliveira Filho. Co-Advisers: Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz and José Helvecio Martins.

The maximization of efficiency in energy conversion systems is crucial for the development of technical and economical viability of photovoltaic systems. This work presents the characterization of photovoltaic generators and the development of an electronic converter with Maximum Power Point Tracking - MPPT for stand-alone systems applied to rural electrification. The stand-alone photovoltaic system used is similar to the systems installed by Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG in residences of isolated communities, inside the programs *Luz Solar* and *Luz Para Todos*. Initially, models and test procedures for photovoltaic generators were developed, attending the minimum performance requirements in compliance with national and international standards. The models parameters were estimated from the data collection. The test procedure's validation and the parameters estimation were implemented using a comparative study with test results done in the National Renewable Laboratory – NREL from United States of America. The maximum error was less than 6.0%. The converter with Maximum Power Point Tracking - MPPT consists of a direct current converter in buck configuration and the control algorithm was implemented in a microcontroller. A system simulation was implemented and the aims were to optimize the project and carry out a comparative study with the monitoring results. The results of the MPPT prototype presented efficiency around 80 to 90%. These initiatives are

supporting the government actions in the quality control of equipments and promoting the development of national technology.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS APLICADOS À ELETRIFICAÇÃO RURAL

Os sistemas de energia solar fotovoltaica têm se tornado, cada vez mais, uma opção viável técnica e economicamente para a geração de energia elétrica no meio rural – eletrificação rural. A sua natureza como fonte renovável, a modularidade, a minimização de custos dos equipamentos proporcionados pela microeletrônica e eletrônica de potência e as exigências sociais, ambientais e de órgãos reguladores contribuem para este avanço. O crescimento médio anual da produção mundial de geradores fotovoltaicos na última década foi de 20%, com previsão para a primeira década do século XXI de 30%, alcançando a ordem de 10 GW_P (GWatt_{Pico}) de potência instalada. Nas últimas três décadas ocorreu uma redução de custo de 50 US\$/W_P para 5 US\$/W_P e com previsão de 2 US\$/W_P até 2010. Os maiores produtores mundiais são o Japão, os Estados Unidos e a União Européia, sendo os sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica o segmento de mercado predominante (RENEWABLE ENERGY WORLD, 2003).

No Brasil, o segmento de mercado predominante é o de sistemas autônomos para eletrificação rural. Tem-se no país cerca de 2,5 milhões de domicílios rurais sem acesso à eletricidade. Na tentativa de minimizar este déficit foram instalados nos últimos anos mais de 40 mil sistemas fotovoltaicos (DINIZ et al., 2002; SANTOS, 2002; WINROCK INTERNATIONAL, 2002; ANEEL, 2002).

O mercado brasileiro de geradores fotovoltaicos possui uma capacidade total instalada de cerca de 12 MW_p, sendo 2 MW_p produzidos no Brasil e o restante, importado. Também a produção brasileira de outros equipamentos para sistemas fotovoltaicos é incipiente, sendo a maioria importada. As principais barreiras para o desenvolvimento do mercado brasileiro constituem-se de: elevados custos iniciais de implantação, precariedade dos programas de sustentabilidade e a não coordenação conjunta de esforços (WINROCK INTERNATIONAL, 2002; ANEEL, 2002).

As pesquisas sobre sistemas fotovoltaicos têm se concentrado nas seguintes áreas: (i) novos materiais e tecnologias na produção de células fotovoltaicas (GOETZBERG et al., 2002), (ii) modelos de irradiação solar para o dimensionamento de sistemas (YAMAMOTO et al., 2003), (iii) modelos de demanda e autonomia de sistemas (CASTAÑER e SILVESTRE, 2002; MORANTE, 2000), (iv) adequação e gerenciamento de cargas (CASTAÑER e SILVESTRE, 2002), (v) modelos de componentes para sistemas fotovoltaicos (ARAKI e YAMAGUCHI, 2003), (vi) rastreamento solar (PATEL, 1999), (vii) monitoramento, avaliação econômica e programas de qualidade (KOUTROULIS e KALAITZAKIS, 2003), (viii) algoritmos de carga de baterias, avaliação e adequação de baterias e novos materiais (POTTEAU et al., 2003), (ix) novas arquiteturas para equipamentos de balanço de sistemas (KUSAKAWA et al., 2001) e (x) técnicas de máxima transferência de potência (HUA e LIN, 2003; HOHM e ROPP, 2003).

Em todas estas iniciativas, um ponto a se destacar é a análise da viabilidade técnica e econômica. A incorporação ao sistema fotovoltaico de técnicas de máxima transferência de potência possui, atualmente, viabilidade técnica com a utilização de equipamentos eletrônicos, como conversores e microcontroladores. Com a tendência à diminuição de custos verificados na eletrônica e com o ganho no desempenho dos sistemas fotovoltaicos com máxima transferência de potência, a viabilidade econômica pode vir a ser atingida.

O desenvolvimento da sustentabilidade técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos autônomos aplicados à eletrificação rural exigem maximização no aproveitamento da energia solar, otimização no armazenamento da energia de reserva, perfis de demanda conhecidos,

programas de qualidade de equipamentos e periféricos e programas de treinamento de recursos humanos para operação e manutenção. Atualmente, no Brasil várias iniciativas encontram-se em processo de desenvolvimento, tais como a regulamentação para implantação de sistemas fotovoltaicos dentro do programa Luz Para Todos do Ministério de Minas e Energia e a implantação do programa de qualidade para componentes de sistemas fotovoltaicos, Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior do Governo Brasileiro. A estratégia básica a ser utilizada para a implantação do programa é o desenvolvimento de ensaios cobrindo requisitos mínimos de desempenho dos equipamentos (POPPE, 2002).

A Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG tem trabalhado na viabilização da utilização da energia solar fotovoltaica para eletrificação rural desde 1986. A partir de parcerias com entidades nacionais e internacionais foram instalados 140 sistemas experimentais e de demonstração, com potência instalada da ordem de 100 kW_P, em 30 municípios de Minas Gerais. Em 1999, a CEMIG implantou o programa Luz Solar que culminou, em 2002, com a instalação de aproximadamente 1.000 sistemas fotovoltaicos, sendo 700 residenciais e 300 sistemas tipo poder público, escolas e centros comunitários, no interior de Minas Gerais. O grande parceiro desta iniciativa foi o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM do Ministério de Minas e Energia do Governo Federal (DINIZ et al., 2002). Com a implantação do programa Luz Para Todos no Estado de Minas Gerais, está prevista pela CEMIG a instalação de 7.000 sistemas fotovoltaicos.

Neste contexto, a CEMIG propôs no ano de 2001 a realização de projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado Avaliação Tecnológica da Energia Solar Fotovoltaica dentro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. As instituições parceiras para a viabilização deste projeto foram: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas, Universidade Federal de Viçosa – UFV e Universidade de São Paulo – USP.

As metas definidas para o projeto foram: certificação de equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos autônomos, avaliação de tecnologias de

geradores fotovoltaicos, desenvolvimento de protótipos de equipamentos, otimização do dimensionamento e estabelecimento de padrões para a implantação de sistemas, desenvolvimento de modelos de sustentabilidade tecnológica, formação de recursos humanos na área e desenvolvimento de mecanismos de transferência tecnológica para a indústria.

O trabalho aqui apresentado, Caracterização de Geradores Fotovoltaicos e Desenvolvimento de Seguidor de Potência Máxima para Sistemas Autônomos Aplicados à Eletrificação Rural, é parte deste projeto. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de caracterizar geradores fotovoltaicos e de projetar um conversor eletrônico para máxima transferência de potência em sistemas fotovoltaicos, visando atingir as seguintes metas: modelagem, simulação, levantamento de curvas características e estimação de parâmetros de geradores fotovoltaicos e desenvolvimento de protótipo de seguidor de potência máxima.

Na caracterização de geradores fotovoltaicos foi desenvolvido um novo procedimento de teste externo levando em consideração o ambiente brasileiro. Novo modelos de desempenho foram estabelecidos, tendo como base os ensaios externos que utilizaram um simulador de carga eletrônico e rastreador solar. Uma plataforma de desenvolvimento de aplicação específica, com base em microcontrolador, permitiu uma maior agilidade nos ensaios externos e por conseguinte, uma melhor confiabilidade dos dados obtidos com os ensaios. A partir da base de dados obtida e dos modelos de desempenho, foram desenvolvidas ferramentas matemáticas para a estimação de parâmetros dos modelos e para a simulação de geradores e sistemas fotovoltaicos.

No desenvolvimento do seguidor de potência máxima foram utilizados os resultados obtidos com a caracterização dos geradores fotovoltaicos. A partir da modelagem e estimação dos parâmetros, foram desenvolvidos algoritmos para máxima transferência de potência. Para subsidiar o desenvolvimento do seguidor de potência máxima foram projetadas e simuladas novas estruturas de conversores. Para isto, foram utilizadas técnicas de projeto, otimizando os parâmetros estabelecidos em um conjunto de especificações e como ferramentas de projeto foram utilizados programas de automação de projetos eletrônicos.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi estruturada em 6 (seis) capítulos, sendo eles: introdução geral, modelagem e simulação de geradores fotovoltaicos, levantamento de curvas características de geradores fotovoltaicos, estimação de parâmetros de modelos de geradores fotovoltaicos, conversor eletrônico para máxima transferência de potência e conclusão geral.

O Capítulo 1, Introdução Geral, contém uma visão geral de sistemas fotovoltaicos autônomos aplicados à eletrificação rural e a estrutura da tese. Apresenta, inicialmente, um panorama mundial da energia solar fotovoltaica, destacando o crescimento da produção mundial e a redução drástica de custos nestes últimos anos. Estabelece os segmentos de mercado predominantes no Brasil e no mundo, destacando o segmento de mercado da eletrificação rural no Brasil e suas carências. A seguir são apresentados os estudos, pesquisas e desenvolvimentos na área de energia solar fotovoltaica que, atualmente, encontra-se em desenvolvimento no Brasil e no mundo. Neste contexto, é apresentado o projeto Caracterização de Geradores Fotovoltaicos e Desenvolvimento de Seguidor de Potência máxima para Sistemas Autônomos Aplicados à Eletrificação Rural. São destacadas as contribuições mais significativas do trabalho no que tange ao desenvolvimento de tecnologia nacional por meio do desenvolvimento de certificação de equipamentos e de protótipo de equipamento.

A caracterização de Geradores Fotovoltaicos consistiu da modelagem, simulação, levantamento de curvas características e estimação de parâmetros apresentados nos Capítulos 2, 3 e 4, respectivamente. Esta caracterização subsidiou o desenvolvimento do seguidor de potência máxima, apresentado no Capítulo 5.

No Capítulo 2 são apresentadas a modelagem e simulação de geradores fotovoltaicos. A metodologia consistiu, inicialmente, na modelagem do gerador fotovoltaico, desde a sua menor porção, célula solar, passando pelo módulo fotovoltaico, painel fotovoltaico e, finalmente, o arranjo fotovoltaico ou gerador fotovoltaico. A partir da modelagem implementada, foram desenvolvidos os programas de simulação. A modelagem foi iniciada pelo estudo do circuito equivalente ideal e não-ideal, com a incorporação das perdas resistivas, em

série e em paralelo, das propriedades do diodo de difusão e da corrente de recombinação. A seguir, foram estudadas as influências da resistência em série na corrente de curto-circuito, na tensão de circuito aberto e no fator de preenchimento e os efeitos da resistência em paralelo, do diodo de recombinação, da radiação e da temperatura.

No Capítulo 3 é realizado o levantamento das curvas características de geradores fotovoltaicos. As etapas para o levantamento das curvas consistiram do estudo das normas e procedimentos, desenvolvimento dos procedimentos de ensaios, aferição dos sensores, montagem do sistema de aquisição de dados, desenvolvimento do programa de aquisição de dados, montagem da bancada e coleta e tratamento dos dados.

No Capítulo 4 é realizada a estimação de parâmetros do modelo do gerador fotovoltaico. Com a modelagem e o levantamento de curvas implementado, foi realizada a estimação dos parâmetros dos modelos desenvolvidos utilizando técnicas clássicas de identificação de sistemas. Com os dados coletados foram estimados os parâmetros dos modelos desenvolvidos e foi realizado um estudo comparativo com os dados do fabricante e com ensaios realizados em laboratórios nacionais e internacionais.

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento do protótipo do seguidor de potência máxima. Inicialmente foi estabelecido o mecanismo para máxima transferência de potência em sistemas fotovoltaicos e o conversor eletrônico cc/cc abaixador de tensão. A partir deste estudo foram apresentados os algoritmos de máxima transferência de potência. Um programa de simulação foi desenvolvido para a análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos sem e com seguidor de potência máxima. Finalmente, foram apresentados a bancada de monitoramento e a análise dos resultados do protótipo do seguidor de potência máxima.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais, contendo os principais resultados obtidos com a caracterização de geradores fotovoltaicos e a análise do ganho de energia obtido com o protótipo do seguidor de potência máxima. Apresenta, também, as sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS

2.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sustentabilidade técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos aplicados à eletrificação rural exigem maximização no aproveitamento da energia solar, otimização no armazenamento da energia de reserva, perfis de demanda conhecidos e programas de qualidade de equipamentos e periféricos. Para a maximização do aproveitamento da energia solar, os projetos de componentes de balanço de sistemas, tais como, seguidor de potência máxima, controladores de carga e inversores, devem obedecer a uma metodologia que permita a otimização da eficiência. Para a implementação desta metodologia é essencial a caracterização da fonte de alimentação, neste caso, do gerador fotovoltaico. Esta caracterização passa, inicialmente, pelo desenvolvimento de modelos e de programas de simulação.

Para subsidiar o desenvolvimento do protótipo do conversor eletrônico seguidor de potência máxima, proposto neste trabalho, e programas de sustentabilidade de sistemas e qualidade de equipamentos, desenvolveu-se uma metodologia para a caracterização de geradores fotovoltaicos. A metodologia consiste, inicialmente, na modelagem do gerador fotovoltaico, desde a sua menor porção, ou seja, a célula solar, passando pelo módulo fotovoltaico, painel fotovoltaico e, finalmente, o arranjo fotovoltaico ou gerador

fotovoltaico. A partir da modelagem implementada, foram desenvolvidos os programas de simulação.

Os modelos de geradores fotovoltaicos analisados baseiam-se no estudo da foto-condutividade de células solares e dos principais parâmetros que influenciam as características de resposta espectral e elétrica, tais como: coeficiente de absorção, reflectância, difusão, deslocamento, recombinação, corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, ponto de máxima potência, fator de preenchimento e eficiência. A modelagem foi iniciada pelo estudo do circuito equivalente ideal e não-ideal, com a incorporação das perdas resistivas, em série e em paralelo e do diodo de recombinação. A seguir, foram estudadas as influências da resistência em série na corrente de curto-circuito, na tensão de circuito aberto e no fator de preenchimento e os efeitos da resistência em paralelo, do diodo de recombinação, da radiação e da temperatura.

A partir do estudo realizado, foram desenvolvidos, inicialmente, os modelos estáticos para as tecnologias de geradores fotovoltaicos com base no silício cristalino. Em seguida, foi realizado o estudo dos modelos dinâmicos, considerando a variação dos parâmetros do modelo em relação a irradiância e temperatura. A descrição dos geradores pode ser realizada por meio de caracterização de parâmetros do gerador, tais como, tensão e corrente de saída em função da irradiância e temperatura, foto-corrente e corrente de saturação; ou caracterização por interpolação na qual os parâmetros não são disponíveis. Neste caso, há a necessidade da realização de ensaios em condições padrão para a estimação das constantes e parâmetros do modelo.

Com a modelagem dos geradores, desenvolveu-se programa para a simulação de modo a obter a resposta dinâmica para variações da irradiação, da temperatura e da carga. Este estudo subsidiou o desenvolvimento do protótipo do seguidor de máxima potência. Como, geralmente, parte dos parâmetros do gerador não é fornecida pelos fabricantes e mesmo para a confirmação dos parâmetros fornecidos, foi realizada a modelagem dos geradores, simulação dos modelos e estudo comparativo. Foi realizado, então, os ensaios obedecendo-se a normas e procedimentos nacionais e internacionais. A partir dos resultados dos ensaios, foi feita a estimação dos parâmetros dos modelos desenvolvidos.

2.2 MATERIAIS E MÉTODO

2.2.1 O Estado da Arte

Passa-se aqui a apresentar os estudos dos principais fenômenos relacionados ao processo de geração fotovoltaica de energia elétrica por meio de células solares semicondutoras, como a modelagem matemática e simulação de células solares e geradores fotovoltaicos. Inicialmente, é apresentada uma visão geral dos modelos de geradores fotovoltaicos. Os modelos geralmente incluem as diversas tecnologias de geradores existentes, diferentes aspectos das tecnologias e os diversos parâmetros que influenciam o desempenho dos geradores fotovoltaicos.

Os modelos matemáticos podem ser classificados em duas grandes categorias. Os modelos utilizados para a análise de desempenho de células solares, em conexão série ou paralela, nos quais as variáveis independentes são, geralmente, o comprimento de onda, a irradiação e a temperatura. Existem, também, os modelos utilizados para o dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos isolados ou interligados à rede elétrica, nos quais as variáveis independentes são, geralmente, o tempo, a irradiação e a temperatura (BLAS et. al, 2002).

Os modelos para análise de desempenho se baseiam nas leis que regem os fenômenos físicos que ocorrem nas células solares e modelam o transporte de portadores elétron-lacuna e mecanismos de recombinação de portadores e podem utilizar ferramentas de simulação como o Programa de Simulação com ênfase em Circuitos Integrados – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis - SPICE (CASTAÑER e SILVESTRE, 2002, MÖLLER, 1993).

Os modelos para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos descrevem a característica elétrica de células ou geradores, por meio de circuitos equivalentes, em um menor ou maior grau de complexidade, utilizando parâmetros concentrados ou distribuídos (ARAKI e YAMAGUCHI, 2003, GOW e MANNING, 1999).

Os principais fatores que influenciam o desempenho de geradores fotovoltaicos ou a produção de energia são: irradiação, incluindo os dados

meteorológicos e orientação do gerador, respostas ótica, espectral e térmica, características elétricas e carga demandada.

2.2.2 Modelagem de Células Solares

Na modelagem com base nos fenômenos físicos, as células solares cristalinas são descritas como dispositivos semicondutores nos quais ocorre o efeito fotovoltaico, convertendo a energia de fótons em pares elétrons – lacunas, que ao se deslocarem são coletados por um campo elétrico localizado em uma junção homogênea ou heterogênea. Para que a conversão fotovoltaica ocorra é necessário separar os elétrons e lacunas gerados pela luz e coletá-los em contatos externos. Isto requer um campo elétrico interno, que pode ser gerado em semicondutores, por exemplo, por junções homogêneas ou junções heterogêneas. Quando se forma uma junção homogênea com materiais dos tipos p e n, haverá uma região de depleção onde não existem elétrons nem lacunas livres para a condução. Nos semicondutores a absorção de luz é um processo não-homogêneo, com aumento da condutividade, e a geração de pares elétrons - lacunas é um processo não-equilibrado. Os modelos de células solares, formadas por junção p-n (campo elétrico interno), desenvolvidos com base no estudo da foto-condutividade fornecem informações sobre as propriedades óticas do semicondutor, tais como, processo de recombinação e eficiência quântica (MÖLLER, 1993).

A modelagem matemática de uma célula solar homogênea por meio do estudo das equações de transporte de portadores é descrita a seguir (CASTAÑER e SILVESTRE, 2002). As equações de transporte das concentrações de portadores consistem de 5 equações diferenciais, sendo: 2 equações de corrente dos portadores majoritários e minoritários, 2 equações de continuidade dos portadores majoritários e minoritários e a equação de Poisson. Estas equações são acopladas não possuindo solução analítica. Estas equações e sua solução são apresentadas no Anexo 1. Considerando o regime permanente, campo elétrico diferente de zero apenas na junção (Região de Carga Espacial - RCE), concentração de portadores minoritários bem menor do que a concentração de portadores majoritários e concentrações de dopagem constante de aceitadores (N_A – base - p) e de doadores (N_D – emissor – n), as

equações diferenciais para os portadores minoritários nas regiões do emissor e base podem ser escritas, e a corrente total é a soma destas correntes na fronteira da Região de Carga Espacial - RCE. Deve-se destacar que o fluxo de fótons na superfície do semiconductor tipo n (ϕ_0) e o coeficiente de absorção do material (α) são função do comprimento de onda (λ). Considerando-se o processo linear, ou seja, aplicando-se o princípio da superposição, a resposta da célula solar é a soma de duas densidades de corrente, cuja expressão é apresentada a seguir.

$$J(\lambda) = J_{cc}(\lambda) - J_{escura}(\lambda) = J_{cc}(\lambda) - J_0(\lambda) \left[e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right] \quad [2.1]$$

Sendo a densidade de corrente total (A/cm^2) dada por:

$$J = \int_0^{\infty} J(\lambda) d\lambda \quad [2.2]$$

em que

J - densidade de corrente total (A/cm^2);

J_{cc} - densidade de corrente de curto-circuito (A/cm^2);

J_{escura} - densidade de corrente escura total (A/cm^2);

J_0 - densidade de corrente de saturação reversa (A/cm^2);

V - tensão nos terminais da célula solar (V);

V_T - tensão térmica (eV);

λ - comprimento de onda (μm);

Um parâmetro importante para mensurar a eficiência da conversão é denominado eficiência quântica, que é definida como o número de elétrons produzidos pela célula solar no circuito externo para o fluxo de fótons do espectro incidente. Pode-se definir duas eficiências quânticas, a interna, considerando-se apenas a irradiância espectral não refletida, e a externa, considerando-se toda a irradiância espectral. As equações para as eficiências quântica interna e externa são apresentadas a seguir:

$$\eta_{qi} = \frac{J_{cc}}{q \phi_0 (1 - R)} \quad [2.3]$$

$$\eta_{QE} = \frac{J_{CC}}{q \phi_0} \quad [2.4]$$

em que

- η_{QI} - eficiência quântica interna (%);
- η_{QE} - eficiência quântica externa (%);
- ϕ_0 - fluxo espectral de fótons na superfície do emissor (fótons/cm² μm s);
- R - coeficiente de reflectância – adimensional;
- q - carga do elétron = 1,602x10⁻¹⁹ Coulomb;
- λ - comprimento de onda (μm);

A resposta espectral de uma célula solar, interna e externa, é definida pela razão da densidade de corrente espectral de curto-circuito e da irradiância espectral, não refletida e total, sendo dadas por:

$$R_{EI} = \frac{J_{CC}}{I_\lambda (1-R)} = 0,808 \eta_{QI} \lambda \quad [2.5]$$

$$R_{EE} = \frac{J_{CC}}{I_\lambda} = 0,808 \eta_{QE} \lambda \quad [2.6]$$

em que

- R_{EI} - resposta espectral interna (A/W);
- R_{EE} - resposta espectral externa (A/W);
- I_λ - irradiância espectral (W/m² μm);

2.2.3 Modelagem de Geradores Fotovoltaicos

A modelagem das características elétricas do gerador é obtida da irradiação no plano do gerador, levando-se em conta os efeitos do ângulo de incidência e do modelo espectral. Geralmente, a potência de saída é estimada nas condições de operação em máxima potência e com tensão fixa de operação. A seguir são investigados cinco modelos, sendo eles: modelo analítico a parâmetros concentrados, modelo linear de Myers, modelo por interpolação, modelo de Anderson e modelo de Blaesser (KING et. al, 1997).

Inicialmente o modelo analítico a parâmetros concentrados é obtido a partir do modelo elétrico, ou circuito equivalente, de uma única célula solar. Os

parâmetros concentrados são a corrente foto-gerada, corrente de saturação reversa dos diodos de difusão e recombinação, fatores de idealidade dos diodos, resistência série e resistência paralela. Podem ser incluídos na modelagem os efeitos de diodos de bloqueio e derivação nos geradores e variância estatística dos parâmetros.

Os modelos de geradores fotovoltaicos na forma de circuitos elétricos equivalentes são apresentados a seguir. A Figura 2.1 apresenta os quatro modelos a parâmetros concentrados investigados neste trabalho. O primeiro modelo apresentado é o ideal, considerando apenas a corrente foto-gerada e a corrente de saturação reversa do diodo de difusão. O segundo e terceiro modelos já incorporam a resistência série e a resistência paralela, respectivamente. E, finalmente, o quarto modelo apresentado incorpora a corrente de saturação reversa do diodo de recombinação.

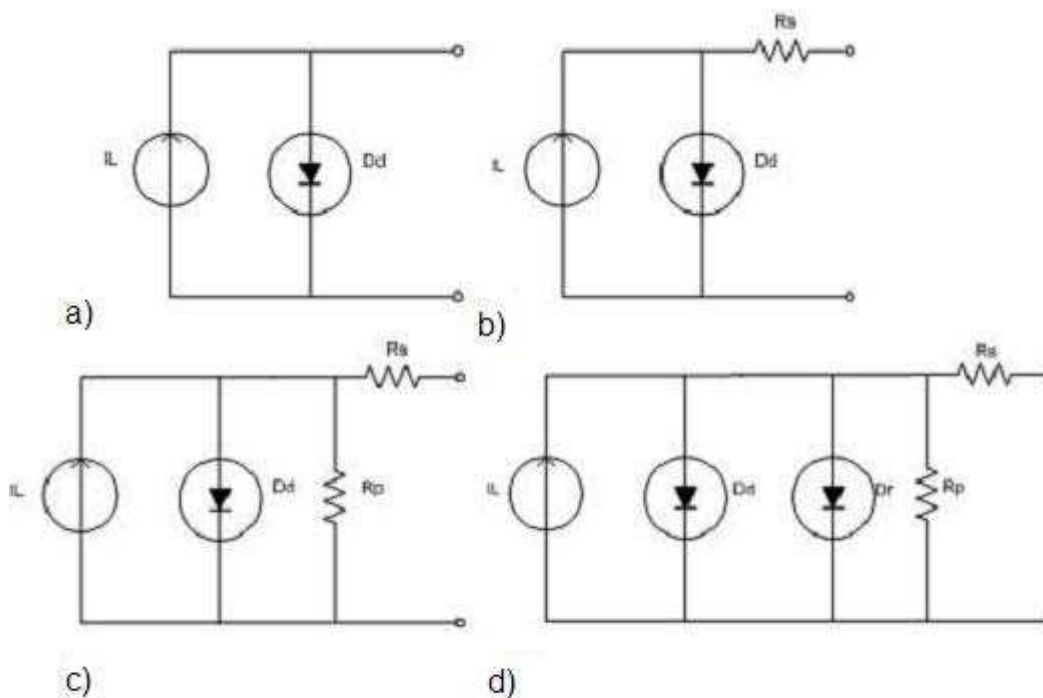


Figura 2.1 Circuitos elétricos equivalentes de geradores fotovoltaicos: a) modelo ideal; b) modelo com resistência série; c) modelo com resistência série e paralela; e d) modelo com resistências e diodo de recombinação.

São apresentadas a seguir as expressões para o modelo ideal, Figura 2.1a, considerando-se a corrente foto-gerada e a corrente de saturação reversa do diodo de difusão.

Considerando-se a equação [2.1] e que a tensão térmica é igual a:

$$V_T = \frac{K T}{q} \quad [2.7]$$

em que

K - constante de Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ joule/K);

T - temperatura (K);

As expressões da corrente de curto-circuito e da corrente de saturação reversa para uma célula solar são:

$$I_{CC} = A J_{CC} \quad [2.8]$$

$$I_{01} = A J_0 \quad [2.9]$$

em que

A - área total da célula (cm^2);

I_{CC} - corrente de curto-circuito em Condição Padrão de Teste – CPT (A);

I_{01} - corrente de saturação reversa do diodo de difusão em Condição Padrão de Teste – CPT (A);

A Condição Padrão de Teste – CPT, é: irradiação solar de 1.000 W/m^2 , temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e a massa de ar igual a 1,5, sendo esta definida como a razão do comprimento do caminho atual da luz através da atmosfera pelo seu valor mínimo (MÖLLER, 1993).

Desta forma, a corrente de curto-circuito, ou corrente foto-gerada, de um gerador fotovoltaico com células em série e paralelo, normalizada em relação à irradiação, é dada por:

$$I_{CCa} = \frac{n_P G I_{CC}}{1000} \quad [2.10]$$

em que

I_{CCa} - corrente de curto-circuito ou corrente foto-gerada normalizada do gerador fotovoltaico (A);

n_P - número de células em paralelo do gerador fotovoltaico;

G - irradiação solar (W/m^2);

Da expressão [2.1], a corrente do gerador fotovoltaico é:

$$i = \frac{n_p G I_{CC}}{1000} - n_p I_{01} \left(e^{\frac{v}{n_1 n_s v_T}} - 1 \right) \quad [2.11]$$

Ou:

$$i = I_{CCa} - n_p I_{01} \left(e^{\frac{v}{n_1 n_s v_T}} - 1 \right) \quad [2.12]$$

em que

- I - corrente do gerador fotovoltaico (A);
- n_s - número de células em série do gerador fotovoltaico;
- n_1 - fator de idealidade do diodo de difusão - adimensional;
- V - tensão do gerador fotovoltaico (V);

Explicitando a tensão do gerador na expressão [2.11], tem-se:

$$v = n_1 n_s v_T \ln \left(\frac{\frac{n_p G I_{CC}}{1000} + n_p I_{01} - i}{n_p I_{01}} \right) \quad [2.13]$$

ou

$$v = n_1 n_s v_T \ln \left(\frac{I_{CCa} + n_p I_{01} - i}{n_p I_{01}} \right) \quad [2.14]$$

A tensão de circuito aberto do gerador é obtida igualando-se a corrente do gerador a zero e é dada por:

$$V_{CAa} = n_1 n_s v_T \ln \left(1 + \frac{G I_{CC}}{1000 I_{01}} \right) \quad [2.15]$$

em que

- V_{CAa} - tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico (V);

A expressão da potência do gerador fotovoltaico é obtida por meio das equações [2.12] e [2.14] e é dada por:

$$p = v i \quad [2.16]$$

em que

- P - potência do gerador fotovoltaico (W);

Pode-se obter a expressão da potência máxima do gerador fotovoltaico derivando-se a potência em relação à tensão e igualando a zero. No ponto de máxima potência, têm-se:

$$\frac{dp}{dv} = \frac{dv}{dv} i + v \frac{di}{dv} = 0 \quad [2.17]$$

Desta forma a expressão da tensão no ponto de máxima potência é:

$$V_M = V_{CAa} - n_1 n_s v_T \ln \left(1 + \frac{V_M}{n_1 n_s v_T} \right) \quad [2.18]$$

Esta equação é transcendente e para a sua resolução deve-se aplicar um método numérico, como por exemplo o método de Newton-Raphson. Desta forma encontra-se o valor da tensão no ponto de máxima potência. A expressão da corrente no ponto de máxima potência é:

$$I_M = I_{CCa} - n_P I_{01} \left(e^{\frac{V_M}{n_1 n_s v_T}} - 1 \right) \quad [2.19]$$

Sendo a expressão da potência máxima:

$$P_M = V_M I_M \quad [2.20]$$

em que

- V_M - tensão no ponto de máxima potência (V);
- I_M - corrente no ponto de máxima potência (A);
- P_M - potência no ponto de máxima potência (W);

Na modelagem apresentada os parâmetros corrente foto-gerada e corrente de saturação reversa do diodo de difusão são função da temperatura. Para um nível de irradiação constante, a corrente foto-gerada e a corrente de saturação reversa em função da temperatura são dadas por (GOW & MANNING, 1999):

$$I_{CCa} = I_L = I_{Lnom} (1 + K_0 (T_C - 300)) \quad [2.21]$$

$$I_{01} = K_1 T_C^3 e^{-\frac{V_g}{v_T}} \quad [2.22]$$

em que

- I_L - corrente foto-gerada (A);
- I_{Lnom} - corrente foto-gerada em Condição Padrão de Teste - CPT (A);
- K_0 - coeficiente da corrente foto-gerada;
- K_1 - coeficiente da corrente de saturação reversa do diodo de difusão;
- T_C - temperatura da célula (K);
- V_g - tensão da banda proibida (V);

As constantes K0 e K1 são específicas para um determinado gerador. As expressões [2.21] e [2.22] são obtidas da física de semicondutores da junção p-n.

Os fabricantes de módulos fotovoltaicos geralmente fornecem a Temperatura de Operação Nominal da Célula - TONC, para Condição Nominal de Operação - CNO. Por meio deste parâmetro calcula-se a temperatura de operação da célula:

$$T_C = T_{AMB} + \left(\frac{G (TONC - 20)}{800} \right) + 273,15 \quad [2.23]$$

em que

T_{AMB} - temperatura ambiente (°C);

TONC - temperatura de operação nominal da célula;

Alguns fabricantes fornecem, também, os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto. A variação da corrente de curto-circuito em relação à temperatura é menos significativa do que a variação da tensão de circuito aberto, tendo coeficientes de sinais opostos entre si, sendo o da corrente positivo e o da tensão negativo. Desta forma as expressões para a corrente de curto-circuito e para a tensão de circuito aberto tornam-se (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002):

$$I_{CCa} = \left(\frac{n_p G}{1000} \right) (I_{CCR} + (KT_{ICCR} (T_C - T_R))) \quad [2.24]$$

$$V_{CAa} = V_{CAR} + KT_{VCAR} (T_C - T_R) + \left(\frac{K T_C}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{CCa}}{I_{CCR}} \right) \quad [2.25]$$

em que

KT_{ICCR} - coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito (A/°C);

KT_{VCAR} - coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto (V/°C);

I_{CCR} - corrente de curto-circuito - CPT (A);

V_{CAR} - tensão de circuito aberto - CPT (V);

T_R - temperatura de referência - CPT (°C);

Das expressões [2.15] e [2.25], obtém-se a corrente de saturação reversa do diodo de difusão:

$$I_{01} = \frac{I_{CCa}}{(e^{V_{CAa1}} - 1)} \quad [2.26]$$

considerando V_{CAa1} igual a:

$$V_{CAa1} = \left(V_{CAR} + K T_{V_{CAR}} (T_C - T_R) + \left(\left(\frac{K T_C}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{CCa}}{I_{CC}} \right) \right) \right) \frac{q}{n_1 n_s K T_C} \quad [2.27]$$

A expressão da corrente do gerador fotovoltaico é dada por:

$$i = I_{CCa} - \frac{I_{CCa}}{\left(e^{V_{CAa1}} - 1 \right)} \left(e^{\frac{v q}{n_1 n_s K T_C}} - 1 \right) \quad [2.28]$$

A expressão da tensão de circuito aberto é dada por:

$$V_{CAa} = n_1 n_s \left(\frac{K T_C}{q} \right) V_{CAa1} \quad [2.29]$$

Pode-se obter a expressão da potência máxima do gerador fotovoltaico realizando o seguinte equacionamento. No ponto de máxima potência, tem-se:

$$\frac{dp}{dv} = \frac{dv}{dv} i + v \frac{di}{dv} = 0 \quad [2.30]$$

Desta forma, obtém-se:

$$0 = I_{CCa} - \left(\left(\frac{I_{CCa}}{\left(e^{V_{CAa1}} - 1 \right)} \right) \left(e^{\frac{V_M q}{n_1 n_s K T_C}} - 1 \right) \right) + V_M \left(- \frac{I_{CCa} q e^{\frac{V_M q}{n_1 n_s K T_C}}}{\left(e^{V_{CAa1}} - 1 \right) n_1 n_s K T_C} \right) \quad [2.31]$$

Esta equação é transcendente e para a sua resolução deve-se aplica um método numérico, como por exemplo o método de Newton-Raphson. Desta forma encontra-se o valor de V_M . A expressão da corrente no ponto de potência máxima é:

$$I_M = I_{CCa} - \left(\left(\frac{I_{CCa}}{\left(e^{V_{CAa1}} - 1 \right)} \right) \left(e^{\frac{V_M q}{n_1 n_s K T_C}} - 1 \right) \right) \quad [2.32]$$

Apresenta-se, agora, o desenvolvimento do modelo considerando a resistência série, Figura 2.1b. Aplicando o mesmo procedimento e considerando que os fabricantes geralmente fornecem a resistência série do módulo fotovoltaico, tem-se o seguinte conjunto de expressões:

$$R_S = \frac{n_{MS}}{n_{MP}} R_{SM} \quad [2.33]$$

$$i = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(v+iR_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \quad [2.34]$$

$$v = n_1 n_S v_T \ln \left(\frac{n_P I_L + n_P I_{01} - i}{n_P I_{01}} \right) - i R_S \quad [2.35]$$

$$I_L = \frac{I_{CCa} + n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(I_{CCa} R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right)}{n_P} \quad [2.36]$$

$$V_{CAa} = n_1 n_S v_T \ln \left(\frac{I_L + I_{01}}{I_{01}} \right) \quad [2.37]$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V_M n_P I_{01} e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)}}{n_1 n_S v_T} \right) \quad [2.38]$$

em que

- n_{MS} - número de módulos em série do gerador;
- n_{MP} - número de módulos em paralelo do gerador;
- R_{SM} - resistência série do módulo (Ω);
- R_S - resistência série do gerador (Ω);

Na modelagem apresentada, assim como a corrente foto-gerada e corrente de saturação reversa do diodo de difusão são função da temperatura, a resistência série é, também, função da temperatura. Para um nível de irradiação constante, a resistência série em função da temperatura é dada por (GOW & MANNING, 1999):

$$R_S = R_{Snom} [1 - K_3 (T_C - 300)] \quad [2.39]$$

em que

- R_{Snom} - resistência série do gerador - CPT (Ω);
- K_3 - coeficiente da resistência série do gerador - adimensional;

A constante K_3 é específica para cada gerador.

Considerando os coeficientes de temperatura para o modelo com resistência série, Figura 2.1b, tem-se o seguinte conjunto de expressões:

$$i = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{(v+iR_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) \quad [2.40]$$

$$I_L = \frac{I_{CCa}}{n_P - n_P \left(e^{\left(\frac{I_{CCa} R_S}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \div (e^{V_{CAa1}} - 1)} \quad [2.41]$$

$$I_{01} = \frac{I_L}{(e^{V_{CA1}} - 1)} \quad [2.42]$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) \quad [2.43]$$

$$+ V_M \left(- \left(\frac{n_P I_L \cdot e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)}}{n_1 n_S v_T (e^{V_{CAa1}} - 1)} \right) \right)$$

Apresenta-se, a seguir, o desenvolvimento do modelo considerando as resistências série e paralela, Figura 2.1c, e sem considerar os coeficientes de temperatura. Aplicando o mesmo procedimento e considerando que os fabricantes fornecem a resistência paralela por módulo, tem-se o seguinte conjunto de expressões:

$$R_p = \frac{n_{MP}}{n_{MS}} R_{PM} \quad [2.44]$$

$$i = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(v+iR_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{(v+iR_S)}{R_p} \right) \quad [2.45]$$

$$I_L = \frac{I_{CCa} + n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(I_{CCa} R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) + \left(\frac{(I_{CCa} R_S)}{R_p} \right)}{n_P} \quad [2.46]$$

$$0 = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{V_{CAa}}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V_{CAa}}{R_p} \right) \quad [2.47]$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{(v + i R_S)}{R_P} \right) \quad [2.48]$$

$$+ V_M \left(-\frac{n_P I_{01}}{n_1 n_S v_T} e^{\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T}} - \frac{1}{R_P} \right)$$

em que

R_{PM} - resistência série do módulo (Ω);

R_P - resistência série do gerador (Ω);

Para um nível de irradiação constante, a resistência paralela em função da temperatura é dada por (GOW & MANNING, 1999):

$$R_P = R_{Pnom} e^{-K_4 T_c} \quad [2.49]$$

Em que

R_{Pnom} - resistência paralela do gerador - CPT (Ω);

K_4 - coeficiente da resistência paralela do gerador - adimensional;

A constante K_4 é específica para cada gerador.

Considerando os coeficientes de temperatura no modelo da Figura 2.1c, tem-se o seguinte conjunto de expressões:

$$i = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{(v + i R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) - \left(\frac{(v + i R_S)}{R_P} \right) \quad [2.50]$$

$$I_L = \frac{I_{CCa} + \left(\frac{I_{CCa} R_S}{R_P} \right)}{n_P - n_P \left(e^{\frac{I_{CCa} R_S}{n_1 n_S v_T}} - 1 \right) \div (e^{V_{CAa1}} - 1)} \quad [2.51]$$

$$I_{01} = \frac{I_L}{(e^{V_{CAa1}} - 1)} \quad [2.52]$$

No desenvolvimento da expressão de I_{01} desprezou-se o termo (V_{CAa}/R_P) , pois na prática este termo tende a zero.

$$0 = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{V_{CAa}}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) - \left(\frac{V_{CAa}}{R_P} \right) \quad [2.53]$$

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dv} = 0 = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) - \left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{R_P} \right) \quad [2.54] \\ + V_M \left(- \left(\frac{n_P I_L e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)}}{n_1 n_S v_T (e^{V_{CAa1}} - 1)} \right) - \frac{1}{R_P} \right) \end{aligned}$$

Apresenta-se, a seguir, o desenvolvimento do modelo completo do gerador fotovoltaico, Figura 2.1d, isto é, incluindo agora a corrente de saturação reversa do diodo de recombinação. Os coeficientes de temperatura não foram considerados inicialmente. Tem-se o seguinte conjunto de expressões:

$$i = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(v+iR_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - n_P I_{02} \left(e^{\left(\frac{(v+iR_S)}{n_2 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{(v+iR_S)}{R_P} \right) \quad [2.55]$$

$$I_L = \frac{I_{CCa} + n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(I_{CCa} R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right)}{n_P} \quad [2.56]$$

$$+ \frac{n_P I_{02} \left(e^{\left(\frac{(I_{CCa} R_S)}{n_2 n_S v_T} \right)} - 1 \right) + \left(\frac{(I_{CCa} R_S)}{R_P} \right)}{n_P}$$

$$0 = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{V_{CAa}}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - n_P I_{02} \left(e^{\left(\frac{V_{CAa}}{n_2 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V_{CAa}}{R_P} \right) \quad [2.57]$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \quad [2.58]$$

$$- n_P I_{02} \left(e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_2 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{(v+iR_S)}{R_P} \right)$$

$$+ V_M \left(-\frac{n_P I_{01}}{n_1 n_S v_T} e^{\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T}} - \frac{n_P I_{02}}{n_2 n_S v_T} e^{\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_2 n_S v_T}} - \frac{1}{R_P} \right)$$

em que

- n_2 - fator de idealidade do diodo de recombinação - adimensional;
- I_{02} - corrente de saturação reversa do diodo de recombinação (A);

Para um nível de irradiação constante, a corrente de saturação reversa do diodo de recombinação em função da temperatura é dada por (GOW & MANNING, 1999):

$$I_{02} = K_2 T_C^{3/2} e^{-\frac{V_g}{2 v_T}} \quad [2.59]$$

em que:

- K_2 - coeficiente da corrente de saturação reversa do diodo de recombinação;

A constante K_2 é específica para cada gerador.

Para o modelo completo da Figura 2.1d, incluindo os coeficientes de temperatura e considerando os fatores de idealidade dos diodos de difusão e recombinação iguais, o modelo é reduzido ao modelo da Figura 2.1c.

No desenvolvimento dos modelos, para o cálculo do ponto de potência máxima chega-se a uma equação transcendente com duas incógnitas, a menos do modelo ideal da Figura 2.1a. Desta forma, são apresentadas algumas simplificações no cálculo do ponto de potência máxima.

A primeira aproximação para o cálculo da potência máxima instantânea do gerador fotovoltaico é apresentada a seguir (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002). A tensão no ponto de máxima potência para todo os modelos é obtida por meio da expressão [2.60].

$$V_{M1} = V_{CAa} \left[1 - \left[\left(\frac{1 + \ln(b)}{2 + \ln(b)} \right) \left(\frac{\ln(1 + \ln(b))}{\ln(b)} \right) \right] \right] \quad [2.60]$$

Para o modelo ideal, Figura 2.1a, têm-se:

$$b = \frac{I_{CCa}}{n_P I_{01}} \quad [2.61]$$

$$I_{M1} = I_{CCa} - n_P I_{01} \left(e^{\frac{V_{M1}}{n_1 n_S v_T}} - 1 \right) \quad [2.62]$$

em que:

b - razão da corrente de curto-circuito normalizada pela corrente de saturação reversa do gerador (adimensional);

V_{M1} - tensão no ponto de máxima potência (V) – aproximação 1;

I_{M1} - corrente no ponto de máxima potência (A) – aproximação 1;

Para o mesmo modelo, Figura 2.1a, considerando os coeficientes de temperatura, têm-se:

$$b = e^{V_{CAa1}} - 1 \quad [2.63]$$

$$I_{M1} = I_{CCa} - \left(\left(\frac{I_{CCa}}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) \left(e^{\frac{V_{M1}}{n_1 n_S v_T}} - 1 \right) \right) \quad [2.64]$$

Para o modelo com resistência série, Figura 2.1b, têm-se:

$$b = \frac{I_{CCa}}{n_P I_{01}} \quad [2.65]$$

$$I_{M1} = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \quad [2.66]$$

Para o mesmo modelo, Figura 2.1b, considerando os coeficientes de temperatura, têm-se.

$$b = \frac{I_{CCa}}{n_P \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right)} \quad [2.67]$$

$$I_{M1} = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) \quad [2.68]$$

Para o modelo com resistências série e paralela, Figura 2.1c, têm-se:

$$b = \frac{I_{CCa}}{n_P I_{01}} \quad [2.69]$$

$$I_{M1} = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{R_P} \right) \quad [2.70]$$

Para o mesmo modelo, Figura 2.1c, considerando os coeficientes de temperatura, têm-se:

$$b = \frac{I_{CCa}}{n_P \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right)} \quad [2.71]$$

$$I_{M1} = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) - \left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{R_P} \right) \quad [2.72]$$

Para o modelo completo, Figura 2.1d, têm-se:

$$b = \frac{I_{CCa}}{n_P I_{01} + n_P I_{02}} \quad [2.73]$$

$$I_{M1} = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - n_P I_{02} \left(e^{\left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{n_2 n_S v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{(V_{M1} + I_{M1} R_S)}{R_P} \right) \quad [2.74]$$

Para o modelo completo, Figura 2.1d, considerando os coeficientes de temperatura e com a simplificação realizada, ou seja, fatores de idealidade dos diodos de difusão e de recombinação iguais, o modelo é reduzido ao da Figura 2.1.c.

Uma segunda aproximação para o cálculo da potência máxima do gerador fotovoltaico é apresentada (CASTAÑER & SILVESTRE, 2002). Para todos os modelos a tensão no ponto de máxima potência é obtida por meio da expressão a seguir.

$$V_{M2} = V_{CAa} - 3 n_S v_T \quad [2.75]$$

em que

V_{M2} - tensão no ponto de máxima potência (V) – aproximação 2;

As correntes no ponto de máxima potência para os diversos modelos são obtidas por meios das expressões [2.62], [2.64], [2.66], [2.68], [2.70], [2.72] e [2.74].

A potência máxima instantânea do gerador fotovoltaico pode ser obtida, também, utilizando resultados de simulação e funções do programa Matlab®.

Para um determinado gerador fotovoltaico, o fator de preenchimento é definido como:

$$F_{PR} = \frac{P_M}{V_{CAa} I_{CCa}} \quad [2.76]$$

em que

F_{PR} - fator de preenchimento (adimensional);

A eficiência na conversão de energia do gerador fotovoltaico é definida como:

$$\eta_{GF} = \frac{P_M}{G \left(\frac{n_P n_S A}{10^4} \right)} 100 \quad [2.77]$$

em que

η_{GF} - eficiência do gerador fotovoltaico (%);

São apresentados a seguir os outros quatro modelos utilizados para a avaliação da produção de energia de geradores fotovoltaicos (KING et. al, 1997). Geralmente são utilizados modelos comportamentais e coletas de dados de campo. Para a modelagem são necessários os levantamentos da característica da irradiação incidente no plano do gerador, da resposta térmica, espectral, ótica e elétrica do gerador, que são definidos a seguir:

- Modelagem da irradiação incidente no gerador: são utilizados os dados meteorológicos e a orientação do gerador;
- Modelagem ótica: são utilizados os resultados do modelo de irradiação e a resposta ótica do gerador;
- Modelagem espectral: são utilizados os resultados do modelo ótico, os dados meteorológicos e a resposta espectral do gerador;
- Modelagem térmica: são utilizados os resultados obtidos do modelo ótico, os dados meteorológicos e as características térmicas do gerador;
- Modelagem da característica elétrica: são utilizados os resultados do modelo térmico, modelo espectral, coeficientes do modelo do gerador e a carga do gerador.

Finalmente, após a modelagem das diversas componentes, a energia produzida é avaliada. Este trabalho limita-se apenas a modelagem das características elétricas de geradores fotovoltaicos.

Uma primeira avaliação da energia produzida por geradores fotovoltaicos é obtida das curvas de potência diárias medidas em campo e é dada pela expressão da integração numérica, por exemplo, método de Euler, apresentada a seguir:

$$E = \Delta t \sum_{i=1}^n P_i \quad [2.78]$$

em que

- E - energia produzida pelo gerador (Wh);
- P_i - potência do gerador no instante i de amostragem (W);
- Δt - intervalo de amostragem (h);

Uma segunda avaliação é obtida por meio do modelo linear de Myers. Este modelo consiste de um ajuste linear que depende apenas da irradiação, cuja expressão é apresentada a seguir.

$$P = a G + b \quad [2.79]$$

em que

- P - potência de saída do gerador (W);
- a e b - parâmetros de ajuste (a – adimensional e b (W));

Os parâmetros a e b são estimados a partir da coleta de dados de campo, aplicando-se o método dos mínimos quadrados linear. Ao se estimar os parâmetros a e b, a partir das medições da potência gerada e da irradiação, a influência da temperatura é levada em consideração. Com este modelo não se obtém a curva característica corrente-tensão do gerador fotovoltaico.

Uma terceira avaliação da energia gerada é obtida por meio do modelo por interpolação. Este modelo utiliza uma matriz de curvas características corrente-tensão dependentes da irradiação e da temperatura. Estas curvas são obtidas a partir da caracterização em campo do gerador fotovoltaico. A partir desta matriz são obtidos os pontos de máxima potência e pontos de tensão fixa para cada combinação de irradiação e temperatura. A potência do gerador é obtida por meio de uma interpolação bilinear dos resultados obtidos. As expressões para o modelo por interpolação são apresentadas a seguir (KING et. al, 1997).

$$P_{\max}(G, T) = (1-t)(1-u)P_{\max(j, k)} + t(1-u)P_{\max(j+1, k)} \quad [2.80]$$

$$\begin{aligned}
& + t u P_{\max(j+1, k+1)} + (1-t) u P_{\max(j, k+1)} \\
I_{fv}(G, T) = & (1-t)(1-u) I_{fv(j, k)} + t(1-u) I_{fv(j+1, k)} \\
& + t u I_{fv(j+1, k+1)} + (1-t) u I_{fv(j, k+1)}
\end{aligned} \tag{2.81}$$

onde

$$t = \frac{G - G_{(j)}}{G_{(j+1)} - G_{(j)}} \tag{2.82}$$

$$u = \frac{T - T_{(k)}}{T_{(k+1)} - T_{(k)}} \tag{2.83}$$

em que

- P_{\max} - potência máxima para uma dada irradiação e temperatura (W);
- I_{fv} - corrente de saída do ponto de tensão fixa para uma dada irradiação e temperatura (A);
- j - índice do maior valor de irradiação obtido;
- k - índice do maior valor de temperatura obtido;
- t - fração de interpolação da irradiação;
- u - fração de interpolação da temperatura;

Uma quarta e última avaliação da energia gerada é obtida por meio dos modelos de J. Anderson e G. Blaesser. Estes modelos consistem na translação de uma curva característica corrente-tensão obtida em uma condição de irradiação e temperatura de referência para uma outra determinada condição de irradiação e temperatura. As expressões de translação de Anderson são apresentadas a seguir (KING et. al, 1997).

$$I_{2i} = I_{1i} \frac{I_{CCa2}}{I_{CCa1}} \tag{2.84}$$

$$V_{2i} = V_{1i} \frac{V_{CAa2}}{V_{CAa1}} \tag{2.85}$$

$$\frac{I_{CCa2}}{I_{CCa1}} = \frac{G_2 / G_1}{1 + \alpha (T_1 - T_2)} \tag{2.86}$$

$$\frac{V_{CAa2}}{V_{CAa1}} = \frac{1}{[1 + \beta (T_1 - T_2)][1 + \delta \ln(G_1 / G_2)]} \tag{2.87}$$

Os subscritos 1 e 2 indicam os parâmetros nas condições 1 e 2 e o subscrito i indica ponto da curva característica corrente-tensão do gerador.

em que

- I - corrente de saída do gerador (A);
- V - tensão de saída do gerador (V);
- α - coeficiente de temperatura da corrente (1/°C);
- β - coeficiente de temperatura da tensão (1/°C);
- δ - coeficiente da irradiação para a tensão (adimensional);

As expressões de translação de Blaesser são apresentadas a seguir.

$$I_r = I \frac{G_{I,r}}{G_I} \quad [2.88]$$

$$V_r = V + DV \quad [2.89]$$

$$i_r = \frac{I_r}{I_{CCa,r}} \quad [2.90]$$

$$i_n = \frac{I}{I_{CCa}} \quad [2.91]$$

$$v_r = \frac{V_r}{V_{CAa,r}} \quad [2.92]$$

$$v_n = \frac{V}{V_{CAa}} \quad [2.93]$$

$$Dv = \frac{DV}{V_{CAa,r}} \quad [2.94]$$

$$V = V_r - Dv V_{CAa,r} \quad [2.95]$$

$$i = i_r \quad [2.96]$$

$$v = \frac{(v_r - Dv)}{(1 - Dv)} \quad [2.97]$$

$$Dv = a \ln(G_{I,r} / G_I) + b (T_{amb} - T_I) + c G_I \quad [2.98]$$

$$F_{PR} = F_{PRr} \frac{v_m}{v_{m,r}} = \frac{FP_r}{v_{m,r}} \frac{(v_{m,r} - Dv)}{1 - Dv} \quad [2.99]$$

$$P_m = V_{CAa} I_{CCa} F_{PR} \quad [2.100]$$

O subscrito I indica no plano do gerador para a irradiação, n indica normalizada, r indica em condições de padrão, amb indica ambiente para a

temperatura e m indica no ponto de máxima potência. Os coeficientes a , b e c são determinados experimentalmente.

em que

i_n - corrente normalizada (adimensional);

v_n - tensão normalizada (adimensional);

Estes dois últimos modelos são adequados para a translação de dados de campo para a Condição Padrão de Teste - CPT.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Programas de Simulação

Com a finalização da investigação da modelagem de geradores fotovoltaicos, foram desenvolvidos programas de simulação para os modelos com base nas características elétricas, ou seja, na forma de circuitos elétricos equivalentes a parâmetros concentrados. Foi utilizado o programa MATLAB® no desenvolvimento dos modelos. As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam dois exemplos de fluxogramas dos programas desenvolvidos. Estes dois fluxogramas apresentam o desenvolvimento dos programas para simulação do modelo ideal, Figura 2.1a, sem e com coeficientes de temperatura.

Os fluxogramas são estruturados da seguinte forma: entrada de dados, anel de variação de irradiação solar, cálculo da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto, anel de variação de carga do gerador e cálculo da corrente, tensão e potência do gerador. O passo de variação da irradiação solar utilizado foi de 100 W/m^2 , com a faixa de variação indo de 100 a 1.000 W/m^2 . Já o passo de variação de carga do gerador foi definido de modo a se obter uma curva característica o mais contínua possível, minimizando o tempo de processamento. Nos resultados finais apresentados o passo de variação da irradiação solar utilizado foi de 200 W/m^2 , com a faixa de variação indo de 200 a 1.000 W/m^2 . Para cada nível de irradiação e após cada varredura de carga do gerador é calculado o ponto de potência máxima utilizando o equacionamento desenvolvido. Após a varredura de irradiação solar são estimados os erros no cálculo do ponto de potência máxima utilizando os diversos métodos apresentados e são gerados os principais gráficos, tais como, curvas características tensão-corrente e tensão-potência, eficiência, fator de preenchimento, corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, potência máxima e erros no cálculo do ponto de potência máxima, todos em função do nível de irradiação solar e do nível de temperatura do gerador.

Foram desenvolvidos programas para os os quatro modelos da Figura 2.1, sem e com coeficientes de temperatura, totalizando oito programas de simulação de geradores fotovoltaicos desenvolvidos. Na resolução das equações transcendentais dos modelos foi utilizado o método numérico de Newton-Raphson.

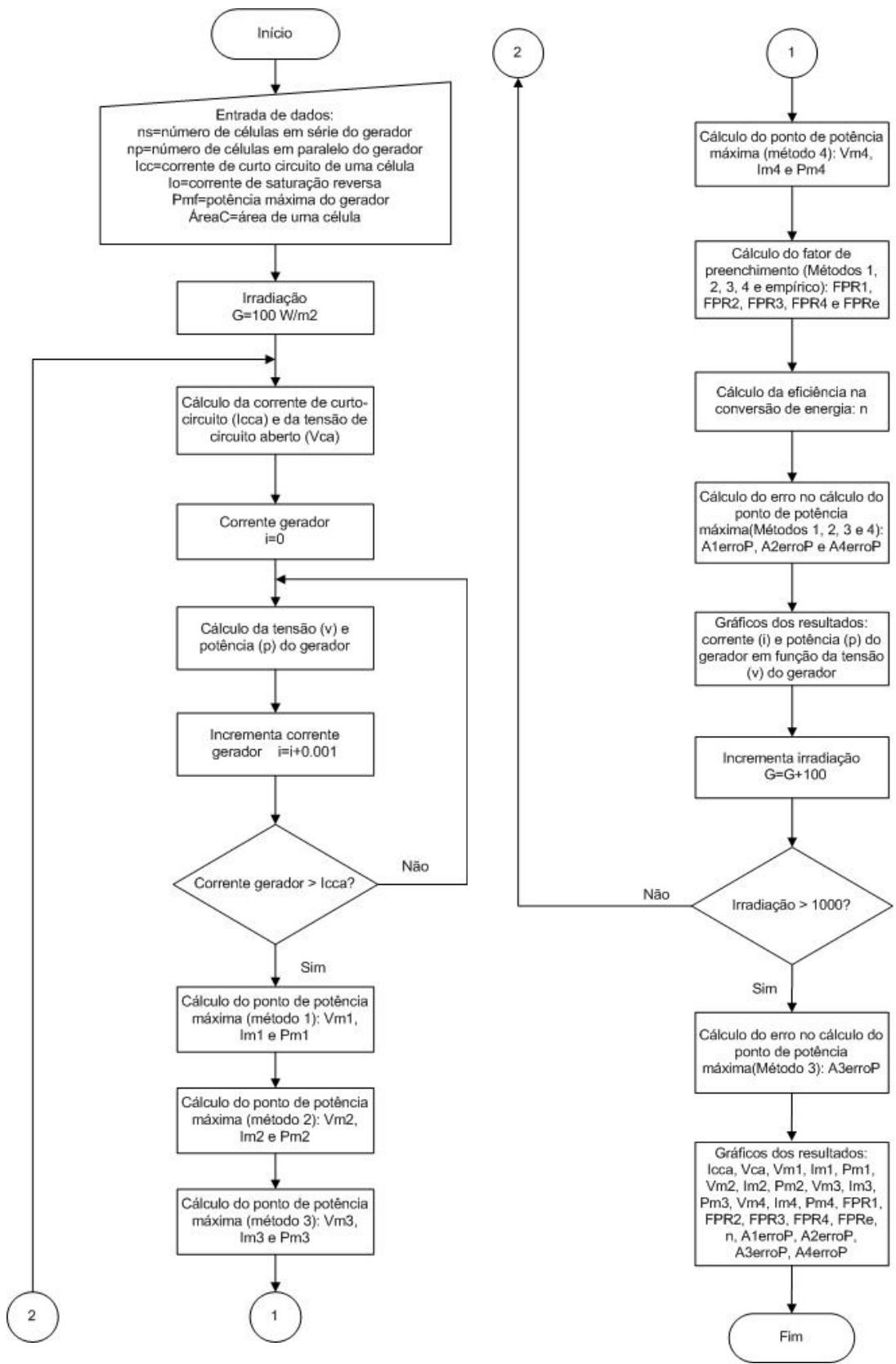


Figura 2.2 Fluxograma do programa para simulação do modelo ideal de geradores fotovoltaicos.

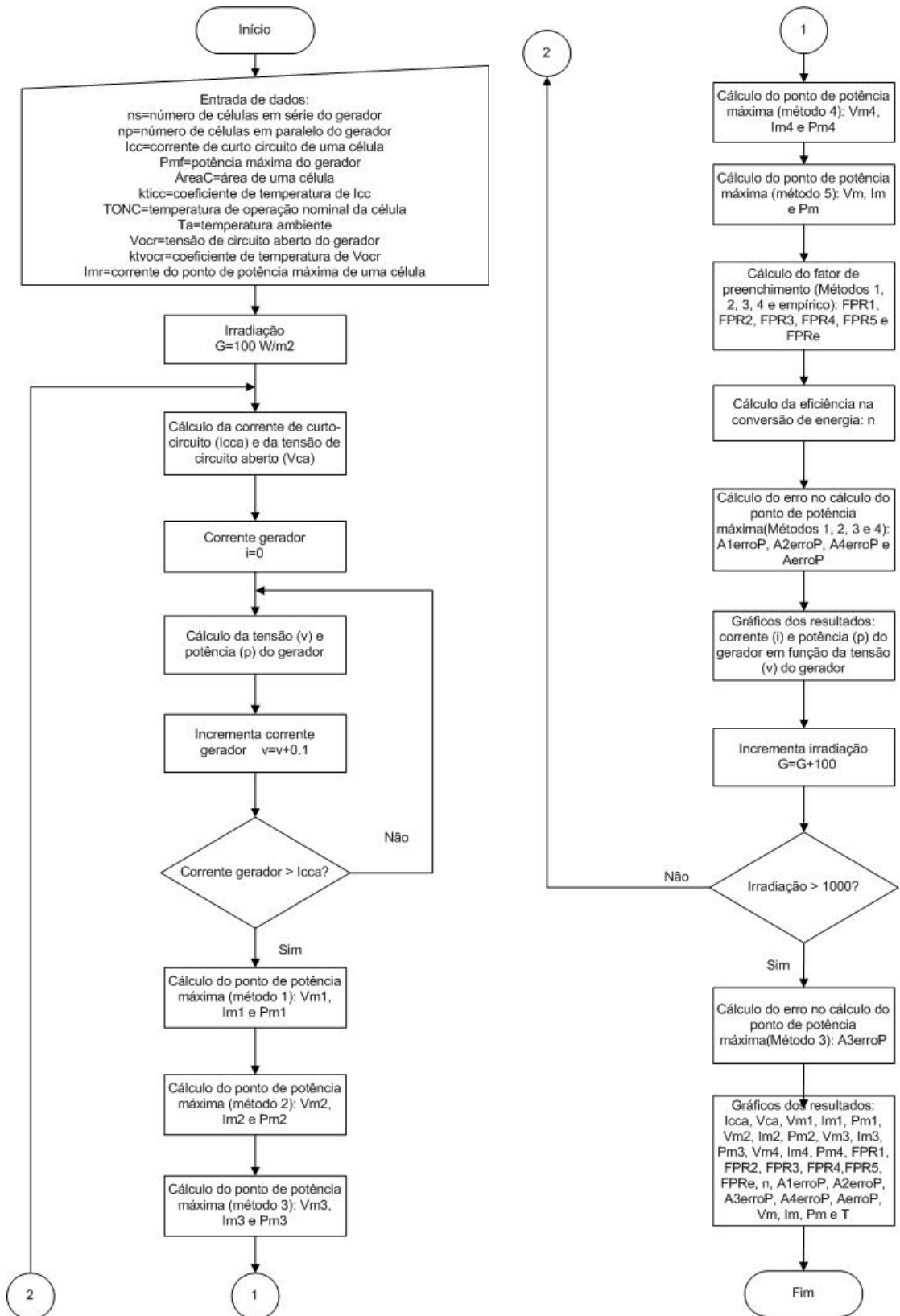


Figura 2.3 Fluxograma do programa para simulação do modelo ideal de geradores fotovoltaicos com coeficientes de temperatura.

2.3.2 Simulação dos Modelos Desenvolvidos

Os resultados da simulação dos modelos de geradores fotovoltaicos utilizando o Matlab[®] são apresentados e discutidos a seguir. O gerador fotovoltaico utilizado na simulação foi o módulo multicristalino KC50 do fabricante KYOCERA[®], cujos dados para a Condição Padrão de Teste – CPT, ou seja, 1.000 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e massa de ar igual a 1,5, são apresentados no Quadro 2.1 (KYOCERA, 2006).

Quadro 2.1 Dados Módulo Fotovoltaico KC50 para CPT (KYOCERA, 2006).

Modelo:	KC50
Fabricante:	KYOCERA SOLAR
Corrente de curto-circuito - I_{CC} (A):	3,1
Tensão de circuito aberto - V_{CA} (V):	21,5
Potência máxima - P_M (W):	50
Corrente no ponto de máxima potência - I_M (A):	3,0
Tensão no ponto de máxima potência - V_M (V):	16,7
Número de células em série - n_S :	36
Número de células em paralelo - n_P :	1
Área de uma célula – A (cm^2):	100

As Figuras 2.4 e 2.5 apresentam as curvas características tensão versus corrente parametrizadas em função da irradiação solar e da temperatura, respectivamente, para CPT fornecidas pelo fabricante (KYOCERA, 2006). Para os parâmetros do Quadro 2.2, que não são fornecidos pelo fabricante, foram utilizados valores típicos do Silício (GREEN, 2001).

Quadro 2.2 Valores típicos dos parâmetros do Silício (GREEN, 2001).

Corrente de saturação reversa do diodo de difusão - I_{01} e do diodo de recombinação - I_{02} (A):	$1,0 \times 10^{-9}$
Fator de idealidade do diodo de difusão - n_1 e do diodo de recombinação – n_2 (adimensional):	1,05
Coeficiente de temperatura de I_{CC} - $KT_{I_{CC}}$ ($\text{A}/^\circ\text{C}$):	0,002
Coeficiente de temperatura de V_{CA} - $KT_{V_{CA}}$ ($\text{V}/^\circ\text{C}$):	-0,06

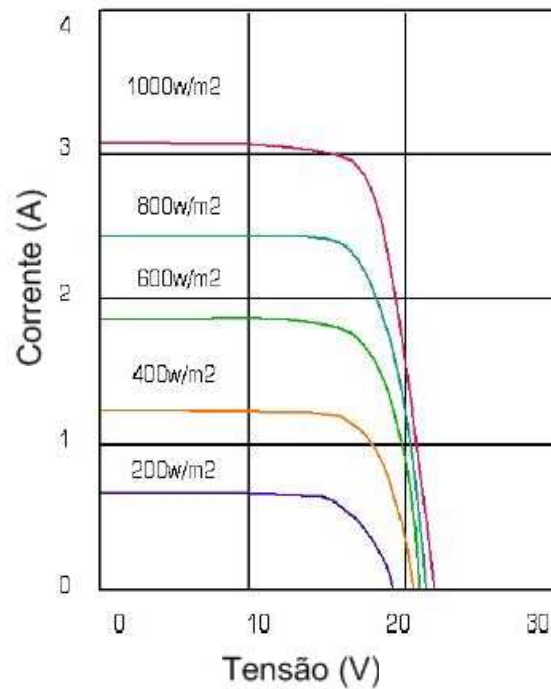


Figura 2.4 Curvas características tensão versus corrente parametrizadas em função da irradiação solar, temperatura de 25 °C e para a Condição Padrão de Teste - CPT fornecidas pelo fabricante (KYOCERA, 2006).

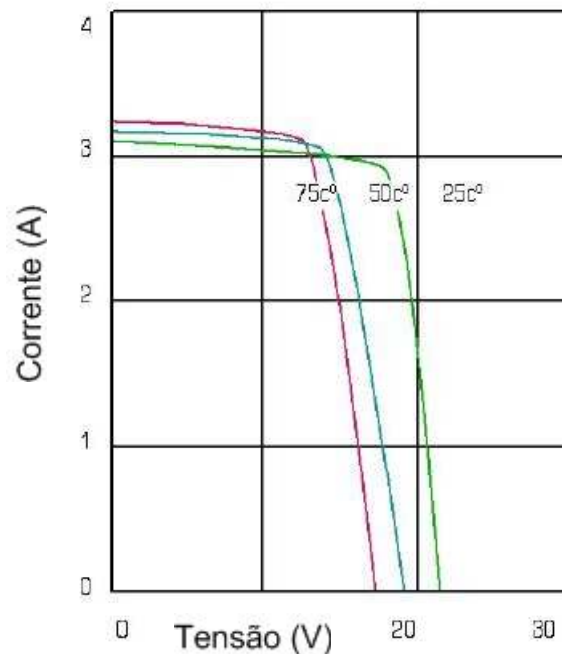


Figura 2.5 Curvas características tensão versus corrente parametrizadas em função da temperatura, irradiação solar igual a 1.000 W/m² e para a Condição Padrão de Teste - CPT fornecidas pelo fabricante (KYOCERA, 2006).

Outros parâmetros, também, não fornecidos pelo fabricante: resistência série, resistência paralela, fator de preenchimento, eficiência e temperatura de operação nominal da célula - TONC.

Para a definição do modelo a ser utilizado neste trabalho foram realizadas simulações de todos os modelos desenvolvidos, utilizando-se os parâmetros apresentados nos Quadros 2.1. e 2.2 e investigando-se a influência da resistência série e paralela do gerador fotovoltaico e a temperatura de operação. Observou-se, também, o grau de complexidade dos modelos e a viabilidade de implementação para a validação do modelo. Para simplificação da apresentação dos resultados foi utilizada a simbologia apresentada no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 Simbologia utilizada para apresentação dos resultados.

Modelo	Figura	Simbologia
Ideal	2.1.a	A1
Ideal com coeficientes de temperatura	2.1.a	A2
Com R_S	2.1.b	B1
Com R_S e coeficientes de temperatura	2.1.b	B2
Com R_S e R_P	2.1.c	C1
Com R_S , R_P e coeficientes de temperatura	2.1.c	C2
Com R_S , R_P e diodo de recombinação	2.1.d	D1
Com R_S , R_P , diodo de recombinação e coeficientes de temperatura	2.1.d	D2

Na simulação dos modelos que não consideram os coeficientes de temperatura, ou seja, modelos A1, B1, C1 e D1, a temperatura de trabalho das células - T_C foi considerada igual a 25 °C. Já na simulação dos modelos que consideram os coeficientes de temperatura, ou seja, modelos A2, B2, C2 e D2, a temperatura de trabalho das células - T_C foi calculada conforme a expressão [2.23] e considerando a temperatura de operação nominal da célula - TONC igual a 48 °C.

A influência da resistência série e paralela foram analisadas inicialmente. A resistência série do gerador é devido à resistência do volume do semicondutor e resistências de contato e interconexão. Já a resistência

paralela é devido a imperfeições micro-estruturais no semicondutor. São apresentados a seguir os resultados da simulação dos 8 modelos desenvolvidos, investigando a influência das resistências série e paralela. As Figuras 2.6 a 2.13 apresentam as curvas características tensão-corrente e tensão-potência para valores de R_S e R_P iguais a 0,1 Ω e 2.000 Ω , 3,0 Ω e 2.000 Ω , 0,1 Ω e 100 Ω e 3,0 Ω e 100 Ω , respectivamente, para uma irradiação igual a 1000 W/m² e uma temperatura do gerador igual a 25 °C. Os Quadros 2.4 a 2.7 apresentam, para a simulação dos quatro conjuntos de dados de R_S e R_P , os resultados dos seguintes parâmetros: corrente de curto-circuito – I_{Cca} , tensão de circuito aberto – V_{Caa} , potência máxima – P_M , tensão do ponto de potência máxima – V_M , corrente do ponto de potência máxima – I_M , fator de preenchimento – F_{PR} e eficiência - η_{GF} .

Como pode ser observado, para o primeiro par de valores das resistências, o comportamento é similar para todos os modelos, destacando que apenas para os modelos com o diodo de recombinação, ou seja, modelos D1 e D2, ocorre um pequeno decréscimo na tensão de circuito aberto e da potência máxima. Os modelos A1 e A2 não levam em consideração as resistências do gerador. Desta forma, conforme as Figuras 2.6 a 2.13 e os Quadros 2.4 a 2.7, não ocorre variações em seus parâmetros. Já nos modelos B1 e B2, que incorporam apenas a resistência série, com o aumento da resistência série ocorre um decréscimo da potência máxima, e por conseguinte, uma redução do fator de preenchimento e eficiência. A influência da resistência paralela pode ser analisada por meio dos modelos C1 e C2 e dos Quadros 2.4 e 2.6. A influência preponderante é na corrente do ponto de potência máxima, ocorrendo um decréscimo com a diminuição da resistência paralela. A influência de R_S na potência máxima é preponderante em relação à influência de R_P . Para a faixa de variação de R_S , a redução da potência máxima é da ordem de 40% e para uma faixa de variação de R_P , a redução da potência máxima é da ordem de 10%. Com a investigação dos resultados da simulação dos modelos, e levando-se em consideração o grau de complexidade, o modelo escolhido foi o modelo da letra c (C1 e C2), modelo com resistência série e paralela. Este modelo não leva em consideração apenas a corrente de saturação reversa do diodo de recombinação.

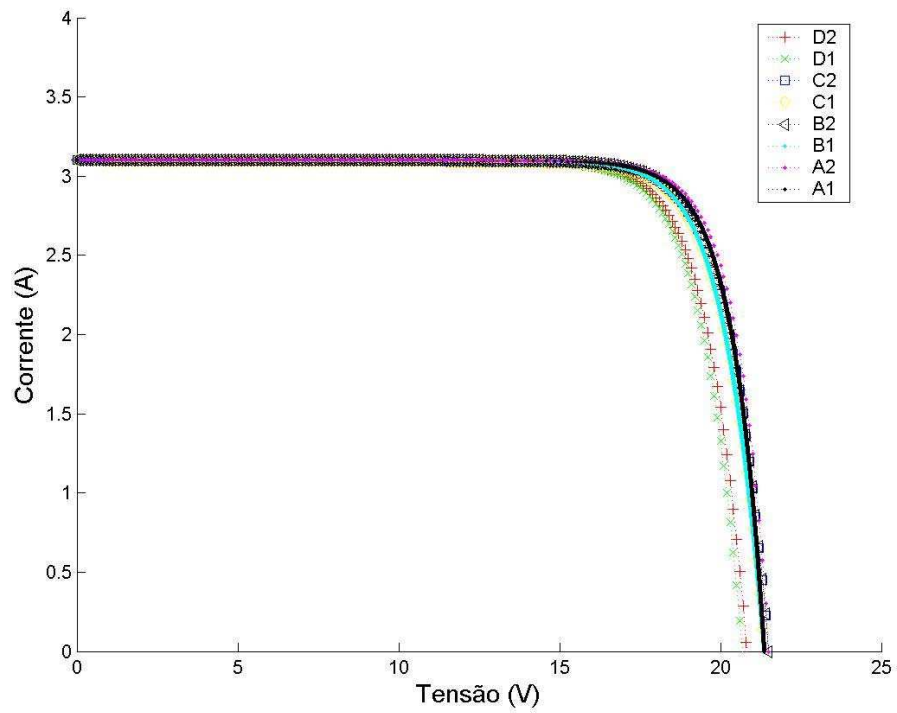


Figura 2.6 Curvas características tensão versus corrente dos modelos para $R_S=0,1 \Omega$ e $R_P=2.000 \Omega$.

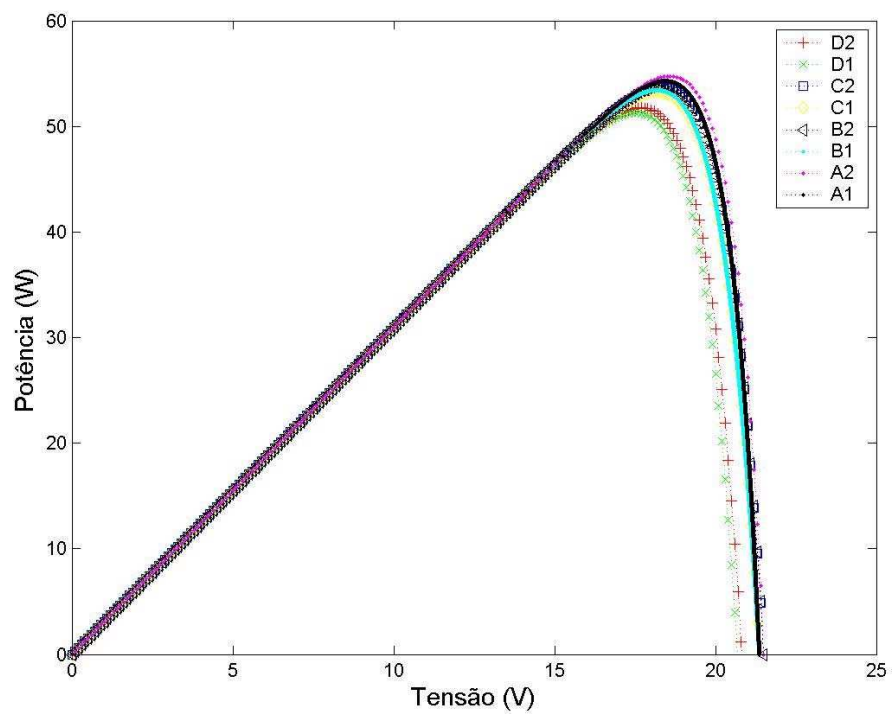


Figura 2.7 Curvas características tensão versus potência dos modelos para $R_S=0,1 \Omega$ e $R_P=2.000 \Omega$.

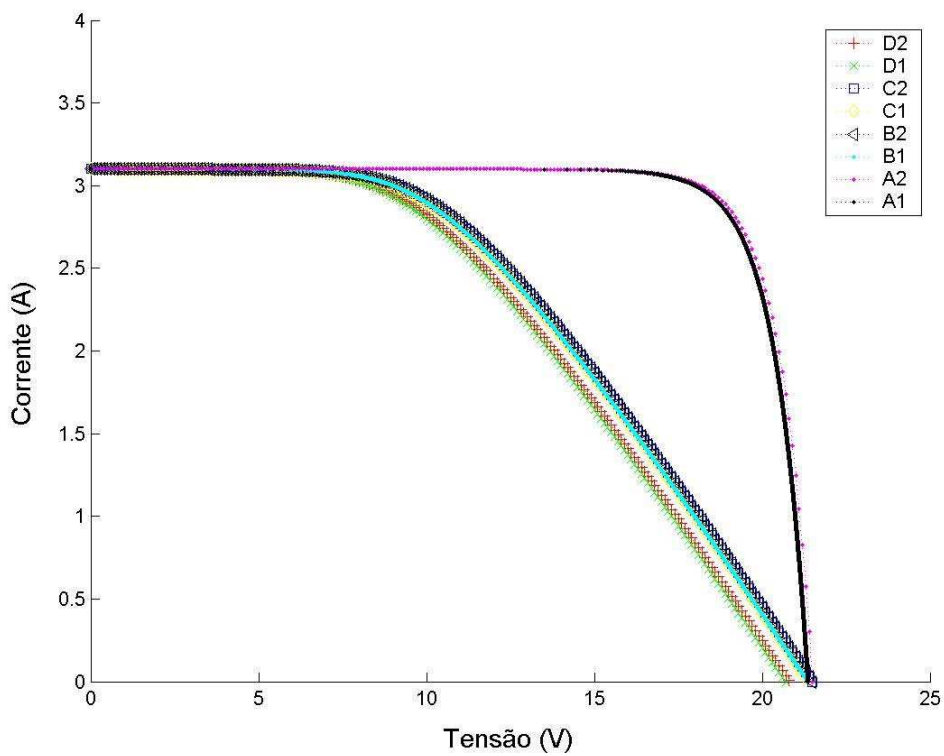


Figura 2.8 Curvas características tensão versus corrente dos modelos para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=2.000 \Omega$.

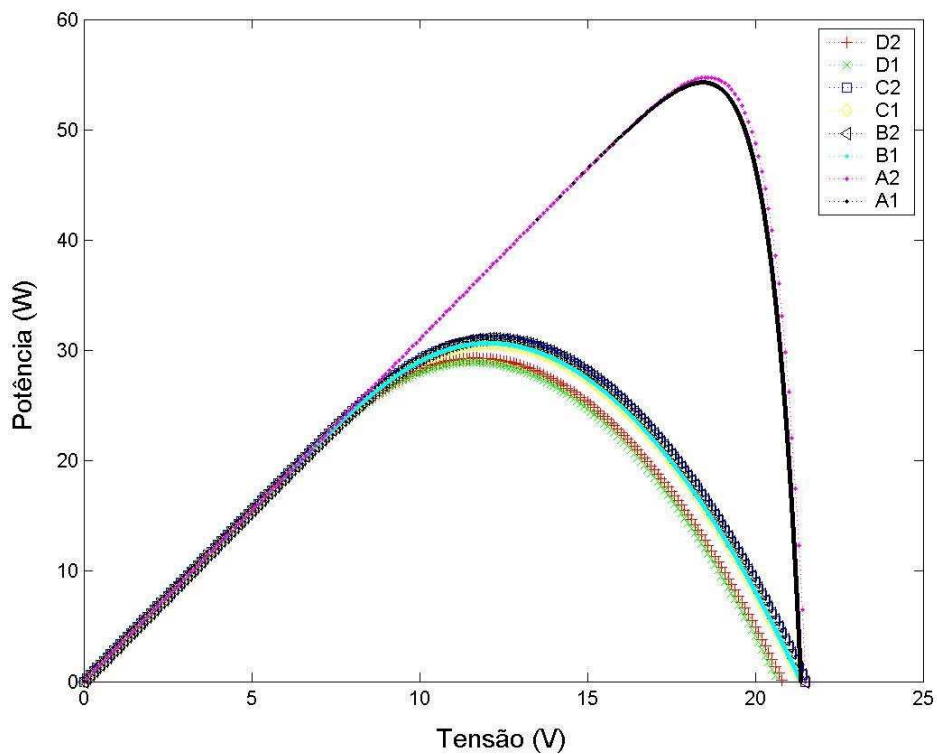


Figura 2.9 Curvas características tensão versus potência dos modelos para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=2.000 \Omega$.

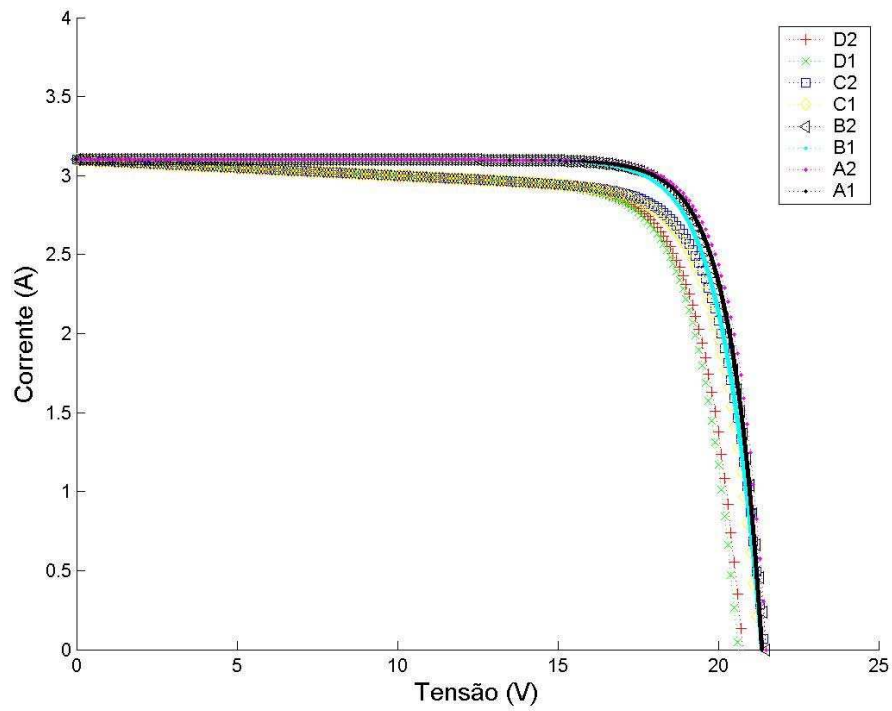


Figura 2.10 Curvas características tensão versus corrente dos modelos para $R_S=0,1 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$.

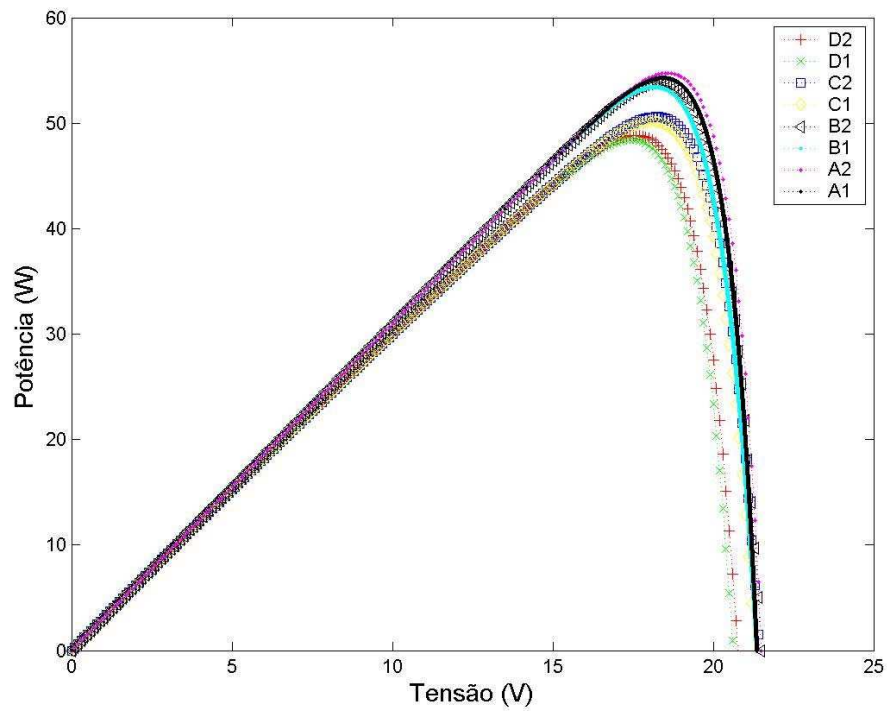


Figura 2.11 Curvas características tensão versus potência dos modelos para $R_S=0,1 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$.

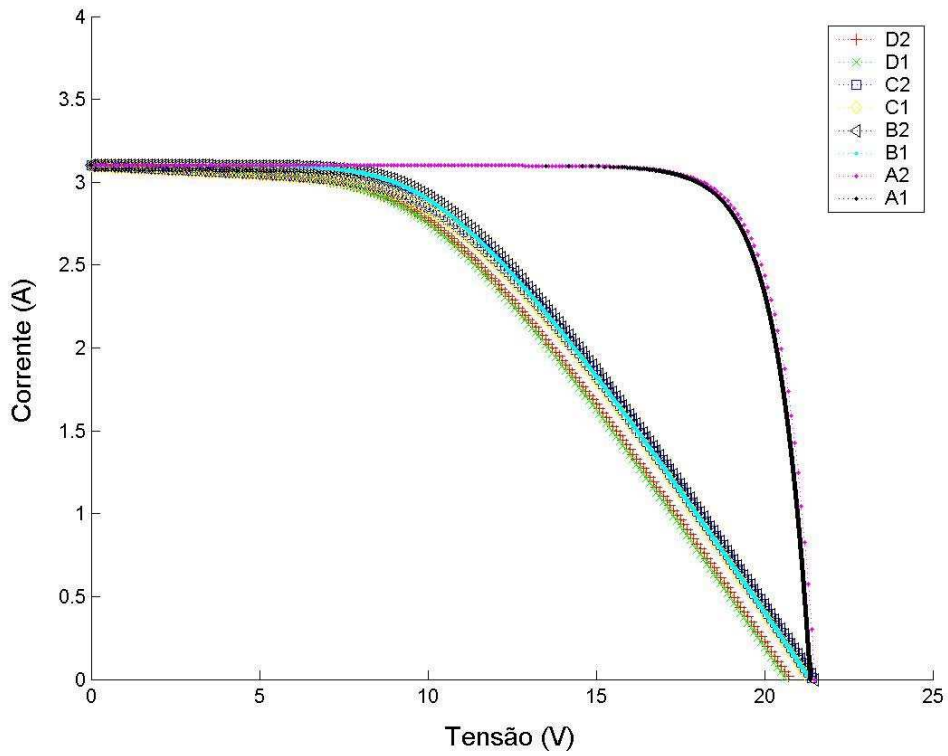


Figura 2.12 Curvas características tensão versus corrente dos modelos para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$.

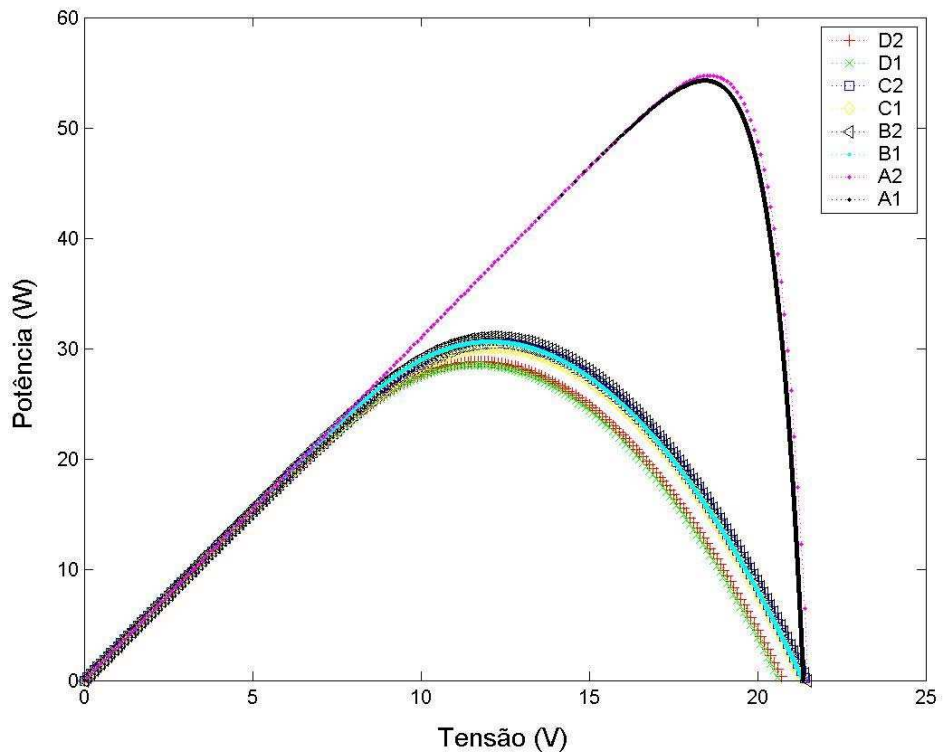


Figura 2.13 Curvas características tensão versus potência dos modelos para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$.

Quadros 2.4 Resultados da simulação para $R_S=0,1 \Omega$ e $R_P=2000 \Omega$.

MODELO	I_{CCA} (A)	V_{CAA} (V)	P_M (W)	V_M (V)	I_M (A)	F_{PR}	H_{GF} (%)
A1	3,1	21,4	54,3	18,4	2,94	0,82	15,9
A2	3,1	21,5	54,8	18,6	2,94	0,82	16,0
B1	3,1	21,4	53,4	18,2	2,94	0,81	15,6
B2	3,1	21,5	53,9	18,3	2,94	0,81	15,8
C1	3,1	21,4	53,3	18,2	2,93	0,80	15,6
C2	3,1	21,5	53,7	18,3	2,94	0,81	15,7
D1	3,1	20,7	51,3	17,5	2,93	0,80	15,0
D2	3,1	20,8	51,7	17,7	2,92	0,80	15,1

Quadros 2.5 Resultados da simulação para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=2000 \Omega$.

MODELO	I_{CCA} (A)	V_{CAA} (V)	P_M (W)	V_M (V)	I_M (A)	F_{PR}	H_{GF} (%)
A1	3,1	21,4	54,3	18,4	2,94	0,82	15,9
A2	3,1	21,5	54,7	18,6	2,94	0,82	16,0
B1	3,1	21,4	30,7	12,1	2,54	0,46	9,0
B2	3,1	21,5	31,0	12,2	2,54	0,47	9,1
C1	3,1	21,4	30,6	12,1	2,53	0,46	9,0
C2	3,1	21,5	31,0	12,2	2,54	0,47	9,1
D1	3,1	20,7	28,9	11,6	2,49	0,45	8,5
D2	3,1	20,8	29,3	11,7	2,50	0,45	8,6

Quadros 2.6 Resultados da simulação para $R_S=0,1 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$.

MODELO	I_{CCA} (A)	V_{CAA} (V)	P_M (W)	V_M (V)	I_M (A)	F_{PR}	H_{GF} (%)
A1	3,1	21,4	54,3	18,4	2,94	0,82	15,9
A2	3,1	21,5	54,7	18,6	2,94	0,82	16,0
B1	3,1	21,4	53,4	18,2	2,94	0,81	15,6
B2	3,1	21,5	53,9	18,3	2,94	0,81	15,8
C1	3,1	21,3	50,2	18,1	2,77	0,76	14,7
C2	3,1	21,4	51,0	18,2	2,78	0,76	14,8
D1	3,1	20,6	48,4	17,4	2,78	0,76	14,2
D2	3,1	20,8	48,8	17,6	2,78	0,76	14,3

Quadros 2.7 Resultados da simulação para $R_S=3,0 \Omega$ e $R_P=100 \Omega$.

MODELO	I_{CCA} (A)	V_{CAA} (V)	P_M (W)	V_M (V)	I_M (A)	F_{PR}	H_{GF} (%)
A1	3,1	21,4	54,3	18,4	2,94	0,82	15,9
A2	3,1	21,5	54,8	18,6	2,97	0,82	16,0
B1	3,1	21,4	30,7	12,1	2,54	0,46	9,0
B2	3,1	21,5	31,0	12,2	2,54	0,47	9,1
C1	3,1	21,3	30,2	12,1	2,49	0,46	8,8
C2	3,1	21,4	30,5	12,2	2,50	0,46	8,9
D1	3,1	20,6	28,5	11,6	2,46	0,45	8,3
D2	3,1	20,8	28,8	11,7	2,47	0,45	8,4

Com a definição do modelo c (C1 e C2), as curvas características são apresentadas nas Figuras 2.14 e 2.15, para valores de R_S igual a $0,1 \Omega$, R_P igual a 2.000Ω , temperatura igual a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e a irradiação variando de 200 a 1.000 W/m^2 . As Figuras 2.16 e 2.17 apresentam a eficiência e fator de preenchimento, respectivamente, em função da irradiação para uma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Pode ser observado que quanto maior a irradiação, maior é a eficiência e o fator de preenchimento. A influência da temperatura nas curvas características é evidenciada nas Figuras 2.18 e 2.19. A temperatura é preponderante na tensão de circuito aberto. A eficiência e o fator de preenchimento diminuem com o aumento da temperatura, conforme as Figuras 2.20 e 2.21. Os resultados da simulação utilizando-se o conceito de Condição Nominal de Operação - CNO são apresentados nas Figuras 2.22 a 2.25, para uma Temperatura de Operação Nominal da Célula - TONC igual a 48 e uma temperatura ambiente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$. A temperatura do gerador é função da irradiação, da temperatura ambiente e do TONC. Para uma maior irradiação, maior é a temperatura do gerador, e por conseguinte, menor é o valor da tensão de circuito aberto. Conforme a Figura 2.24, a curva do fator de preenchimento em função da irradiação possui um ponto de inflexão em torno de 400 W/m^2 . Isto é justificado pelo aumento da temperatura com a irradiação, sendo que para baixos valores de irradiação, a influência da temperatura não é significativa. Já a eficiência, diminui com o aumento da irradiação, pois ocorre um aumento da temperatura do gerador, conforme a Figura 2.25.

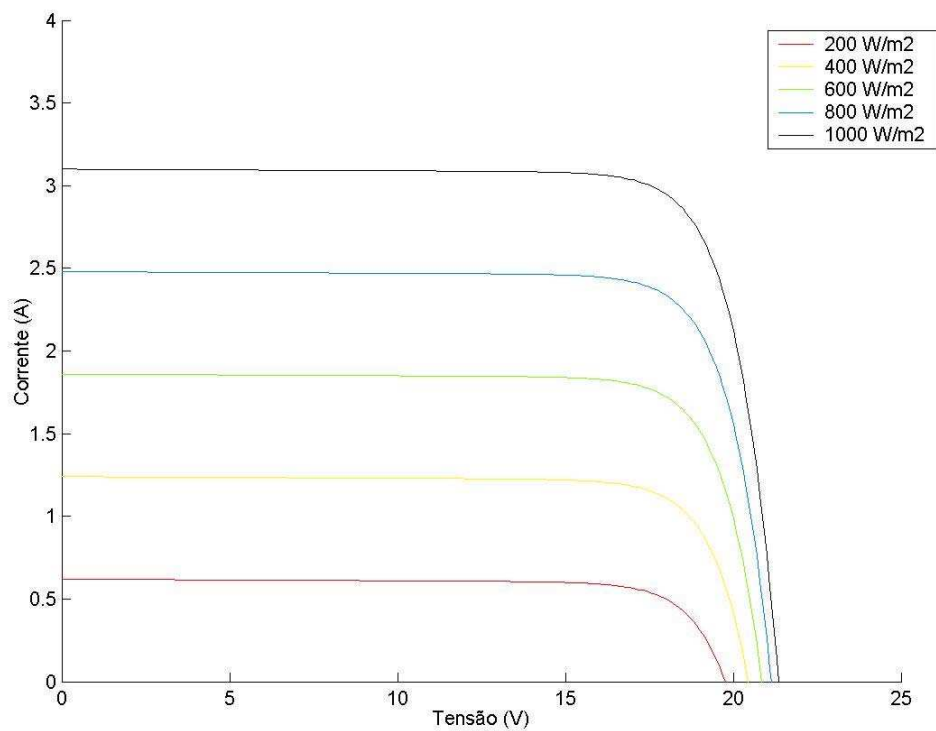


Figura 2.14 Curvas características tensão–corrente parametrizadas em função da irradiação (W/m^2), para temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$.

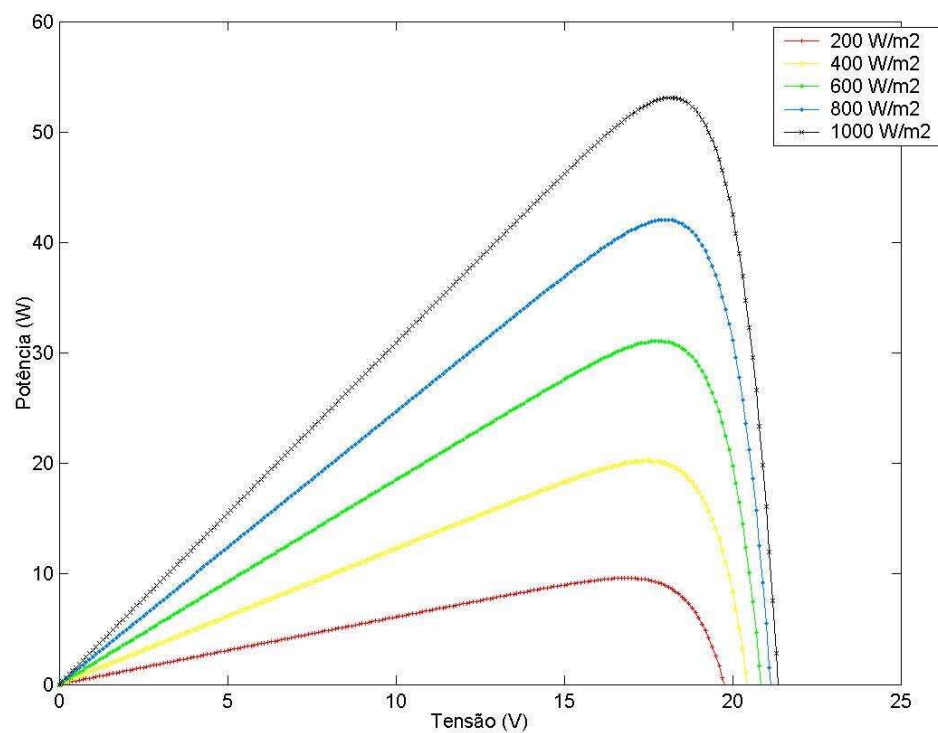


Figura 2.15 Curvas características tensão–potência parametrizadas em função da irradiação (W/m^2), para temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$.

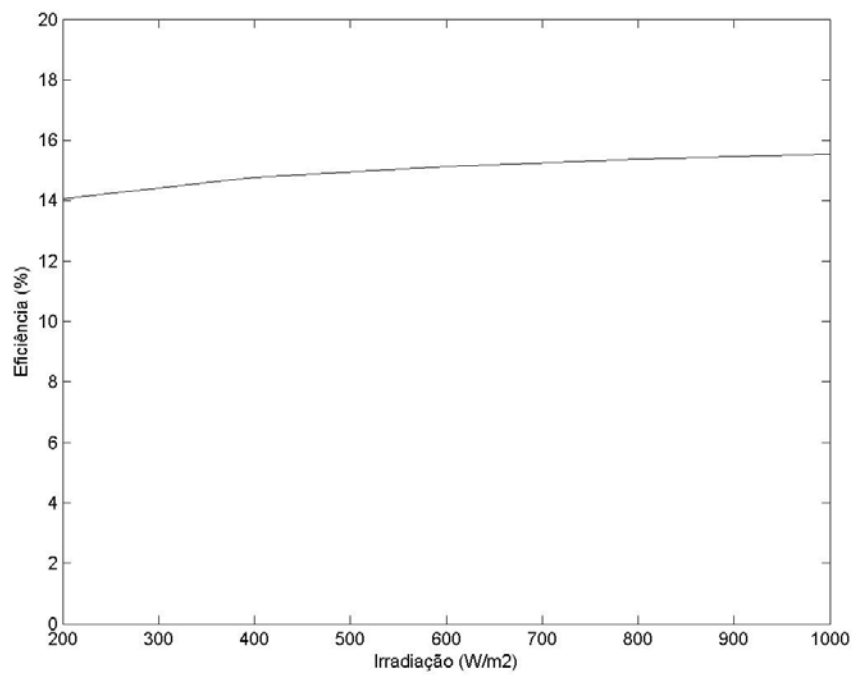


Figura 2.16 Eficiência em função da irradiação (W/m^2) para uma temperatura de 25°C .

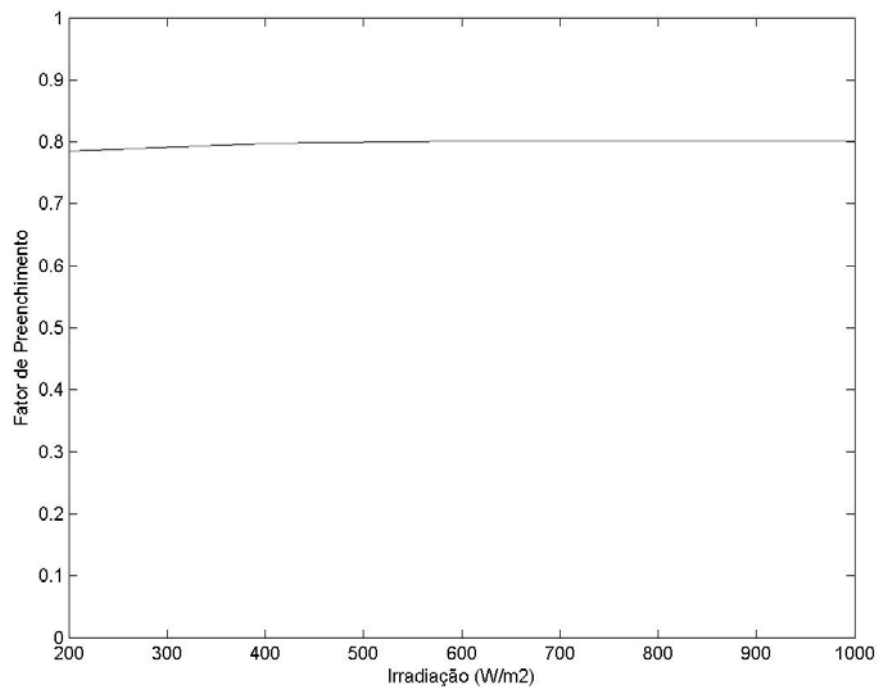


Figura 2.17 Fator de preenchimento em função da irradiação (W/m^2) para uma temperatura de 25°C .

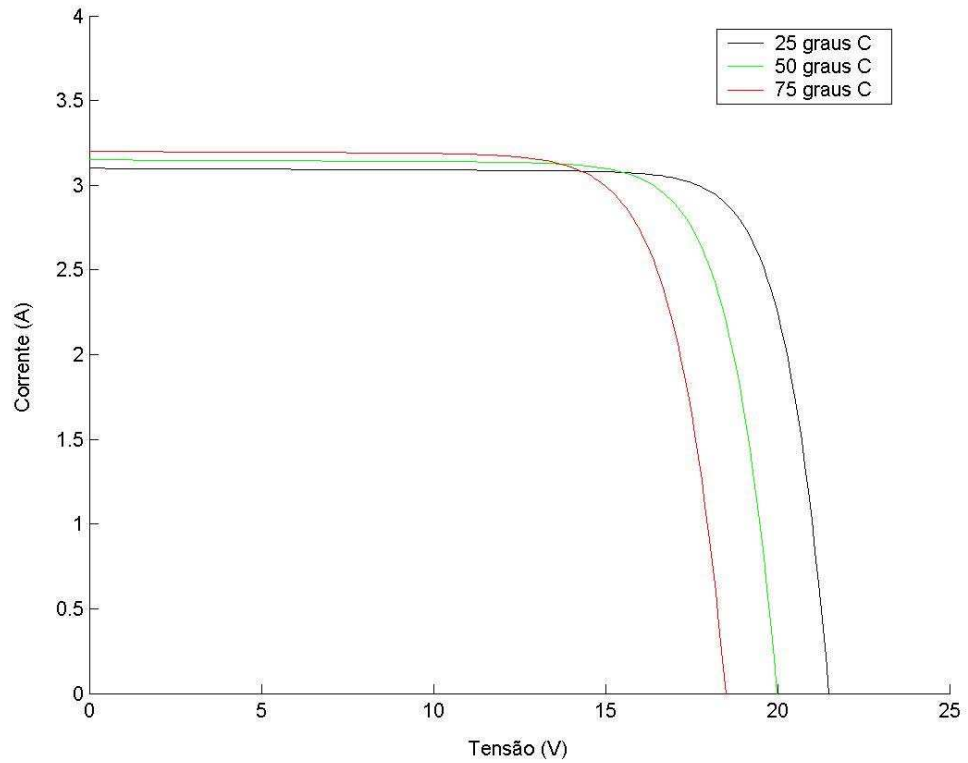


Figura 2.18 Curvas Características tensão–corrente parametrizadas em função da temperatura e com uma irradiação de 1.000 W/m^2 .

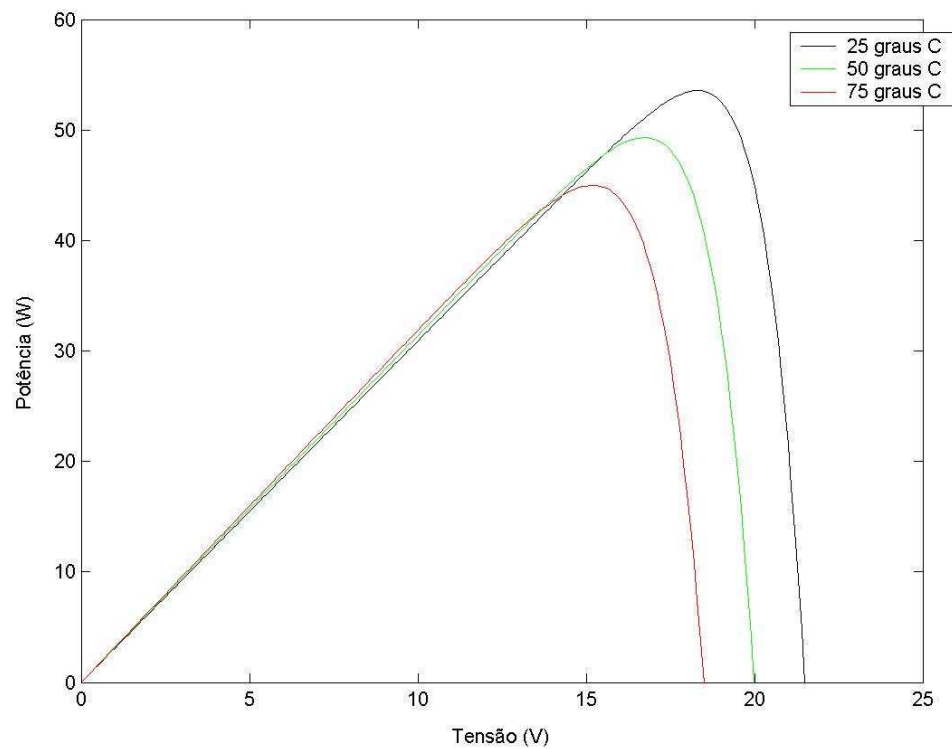


Figura 2.19 Curvas características tensão–potência parametrizadas em função da temperatura e com uma irradiação de 1.000 W/m^2 .

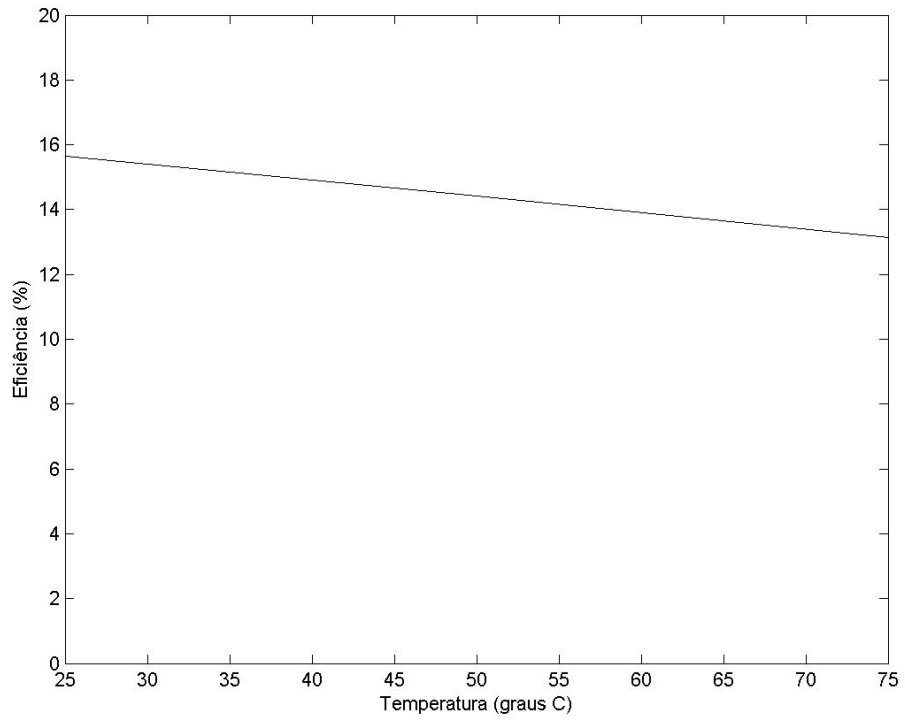


Figura 2.20 Eficiência em função da temperatura para uma irradiação de 1.000 W/m².

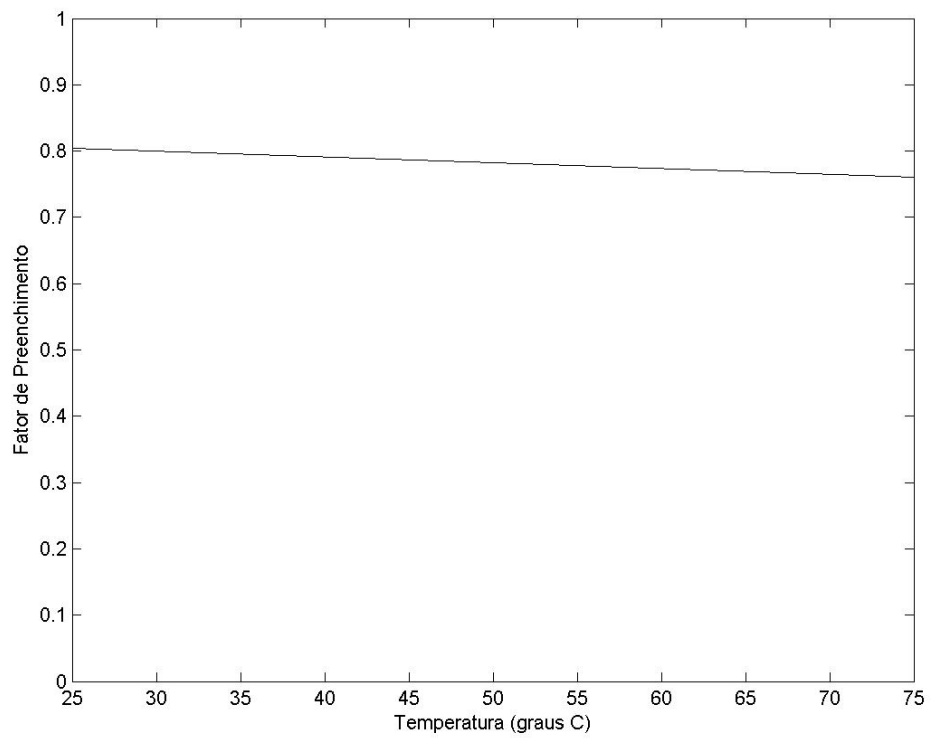


Figura 2.21 Fator de preenchimento em função da temperatura para uma irradiação de 1.000 W/m².

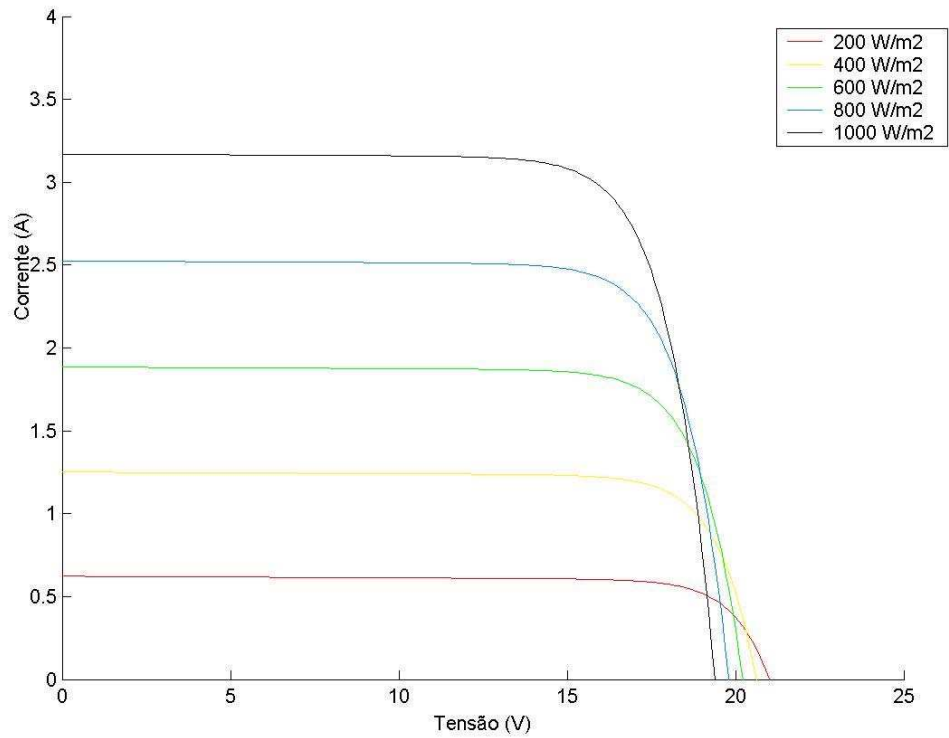


Figura 2.22 Curvas características tensão–corrente em condição nominal de operação para uma temperatura ambiente de 30 °C.

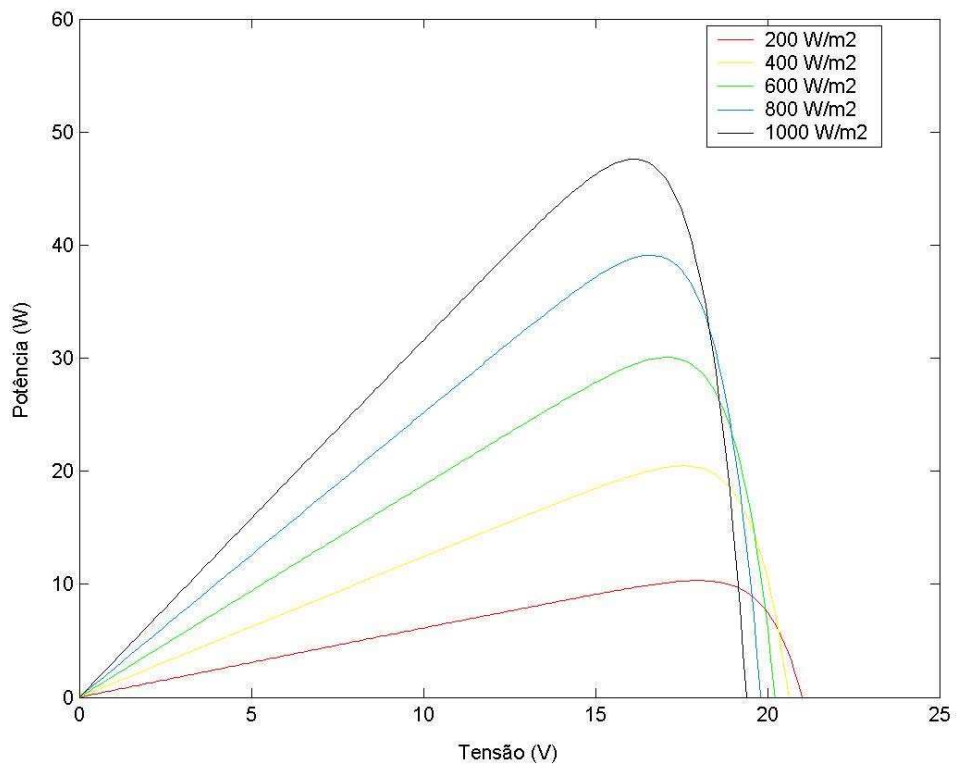


Figura 2.23 Curvas características tensão–potência em condição nominal de operação para uma temperatura ambiente de 30 °C.

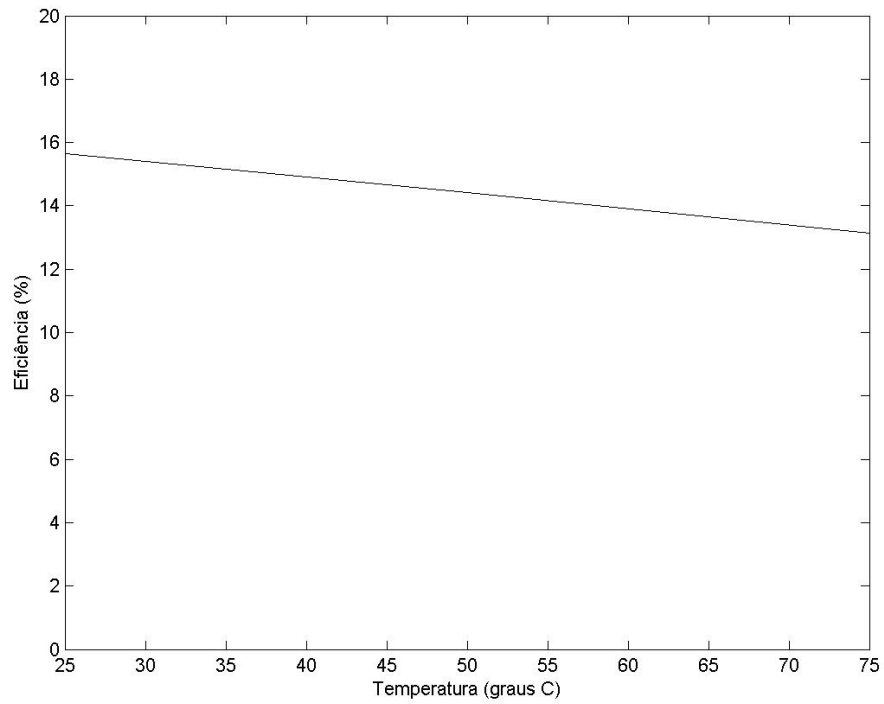


Figura 2.24 Eficiência em função da irradiação e condição nominal de operação para uma temperatura ambiente de 30 °C.

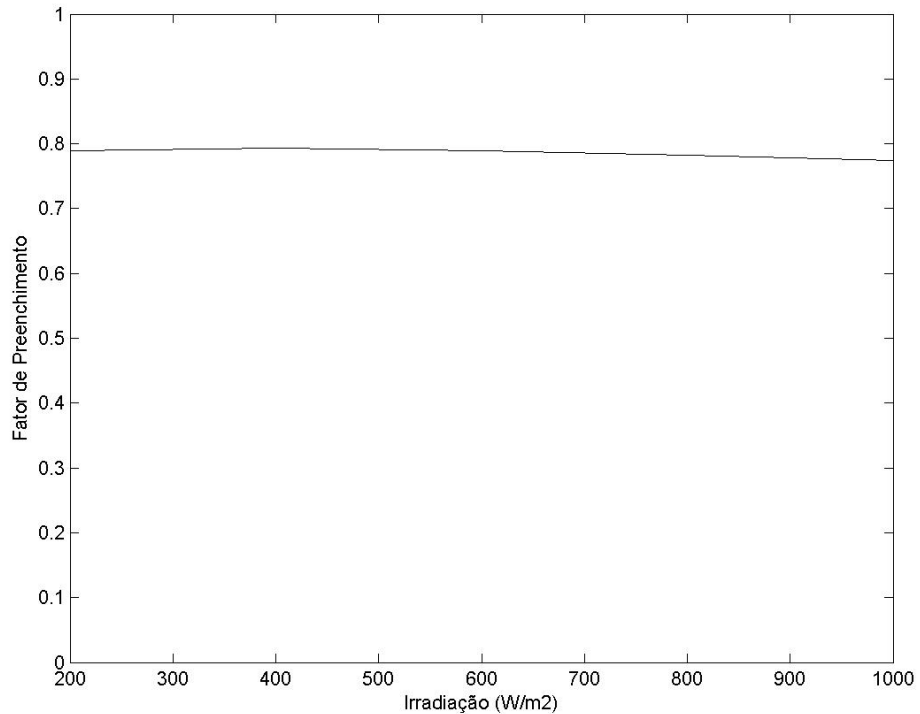


Figura 2.25 Fator de preenchimento em função da irradiação - condição nominal de operação - temperatura ambiente de 30 °C.

2.3.3 Simulação de Gerador Fotovoltaico Acoplado a Carga Resistiva

Para a análise dinâmica do modelo com resistências série e paralela - C1 e C2, utilizando-se o conceito de condição nominal de operação, é apresentada a simulação do gerador acoplado diretamente a uma carga resistiva com valor igual a $3,0 \Omega$. Este valor define uma reta de carga na curva característica tensão versus corrente com uma inclinação igual ao inverso do valor da resistência. Os pontos de funcionamento do gerador na curva característica correspondem a um funcionamento como fonte de corrente e abaixo do ponto de potência máxima. Os perfis de irradiação e temperatura ambiente utilizados na simulação são apresentados nas Figuras 2.26 e 2.27. O perfil de irradiação foi obtido durante a calibração de sensores de irradiação solar a serem utilizados no levantamento das curvas características dos geradores fotovoltaicos, apresentado no Capítulo 3. Deve-se destacar que o perfil consiste de 3 dias de irradiação, não sendo apresentados os dados noturnos. Já para a temperatura foi definido um perfil com valor crescente, de forma a evidenciar a influência da temperatura na resposta do gerador.

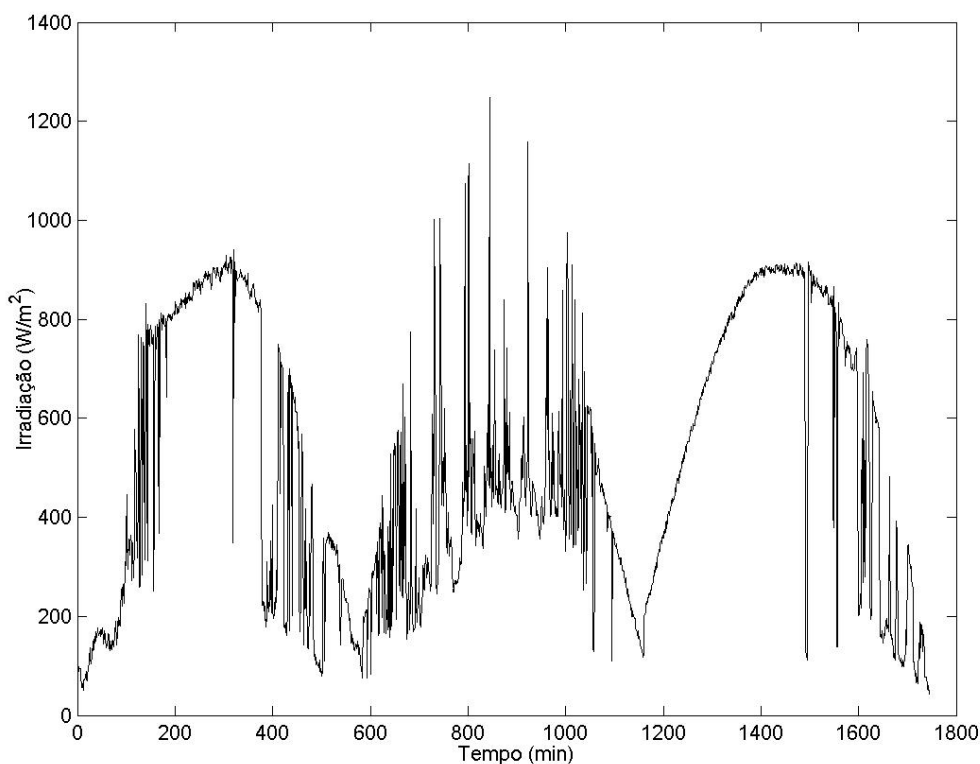


Figura 2.26 Perfil de irradiação solar utilizado na simulação.

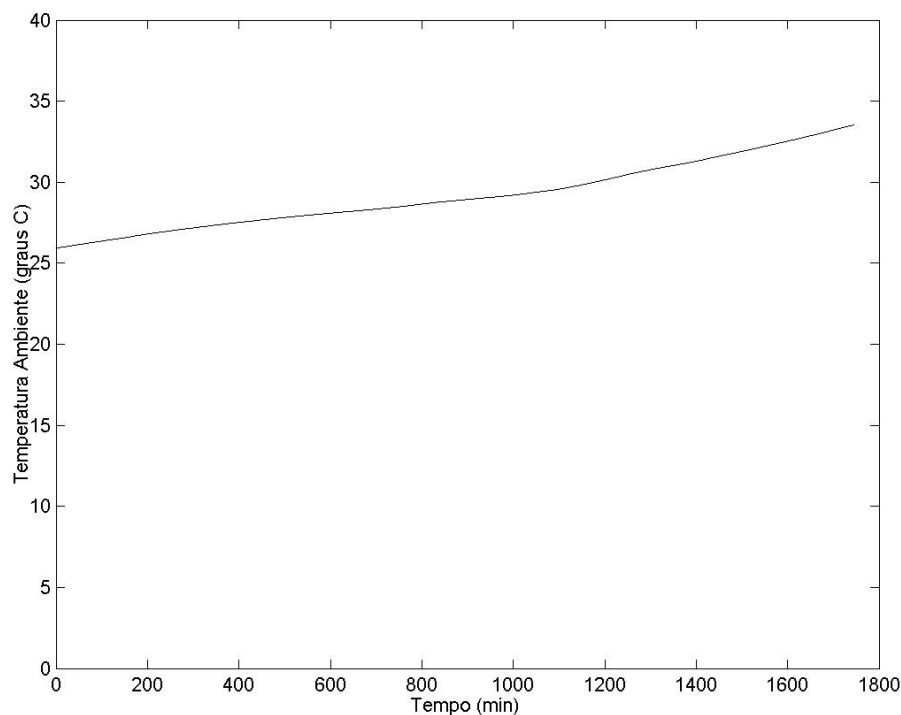


Figura 2.27 Perfil de temperatura ambiente utilizado na simulação.

Os resultados da simulação, que são apresentados nas Figuras 2.28 a 2.32, consistem de: tensão, corrente e potência na carga, eficiência em relação aos pontos de máxima potência e temperatura do gerador. Para a carga resistiva de 3Ω , a tensão máxima na carga não ultrapassa o valor de 12 V, conforme Figura 2.28, sendo que para valores de irradiação solar por volta de 900 W/m^2 , a tensão na carga é da ordem de 8,5 V e a potência na carga, conforme a Figura 2.30, não ultrapassa os 25 W. Desta forma a eficiência em relação aos pontos de máxima potência, conforme a Figura 2.31, não ultrapassa 60%; ou seja, 40% ou mais da potência máxima que o gerador é capaz de produzir para uma determinada irradiação solar e temperatura não é aproveitada. Isto é devido ao valor da resistência de carga que define pontos de funcionamento do gerador abaixo dos pontos de máxima potência. A Figura 2.32 apresenta a temperatura do gerador fotovoltaico para os perfis de irradiação solar e temperatura ambiente utilizados e para um TONC de 48. Pode ser observado que a temperatura do gerador varia na faixa em torno de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $70 \text{ }^\circ\text{C}$. A análise da dinâmica do modelo realizada permite destacar a forte dependência da potência gerada em relação a carga acoplada ao gerador e a influência da temperatura do gerador no desempenho do sistema.

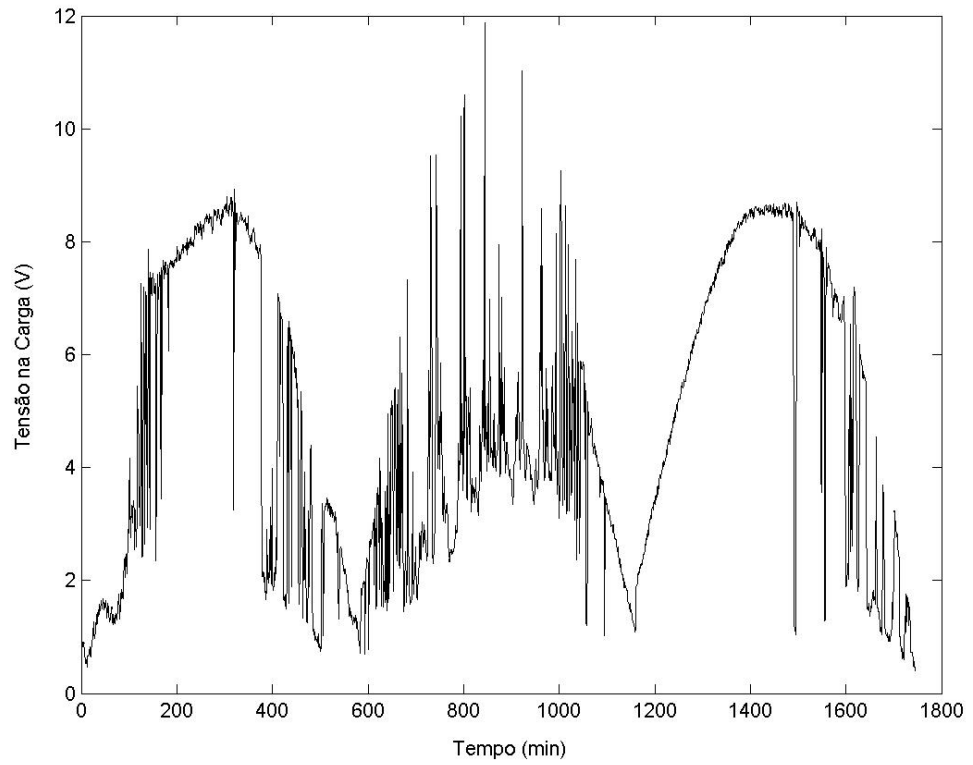


Figura 2.28 Tensão no gerador fotovoltaico ou na carga.

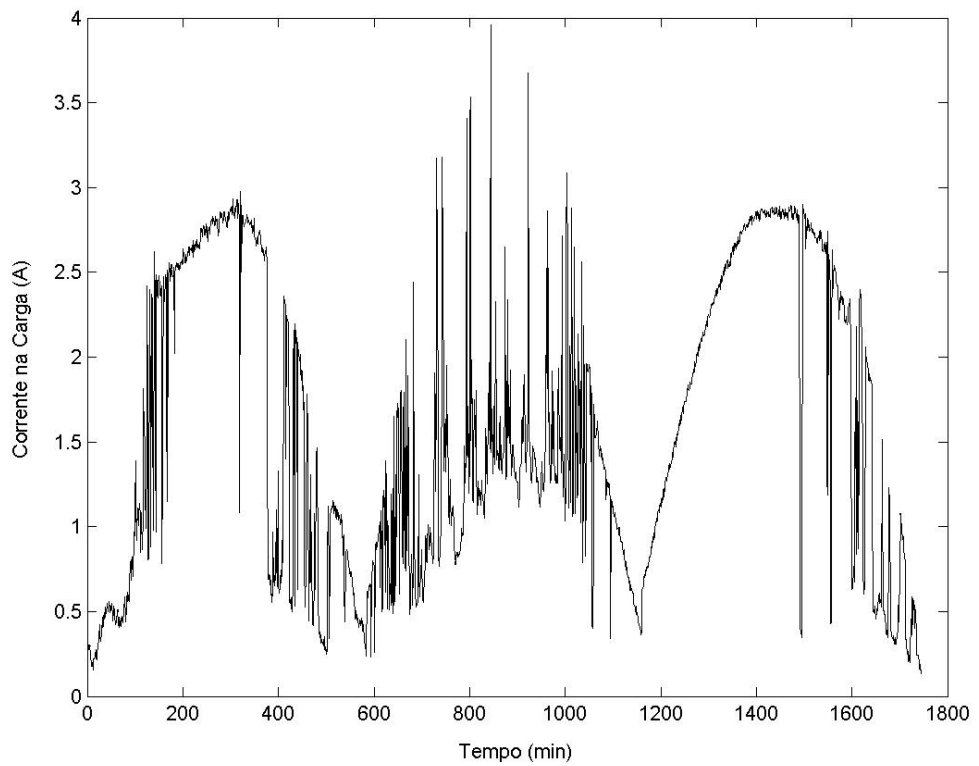


Figura 2.29 Corrente no gerador fotovoltaico ou na carga.

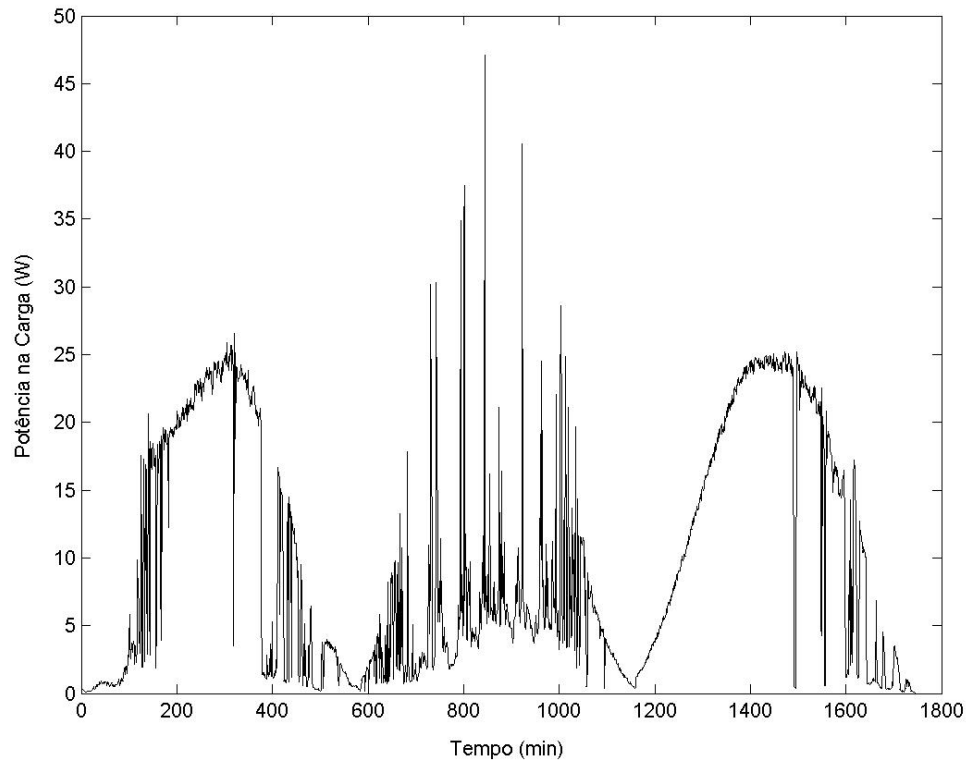


Figura 2.30 Potência no gerador fotovoltaico ou na carga.

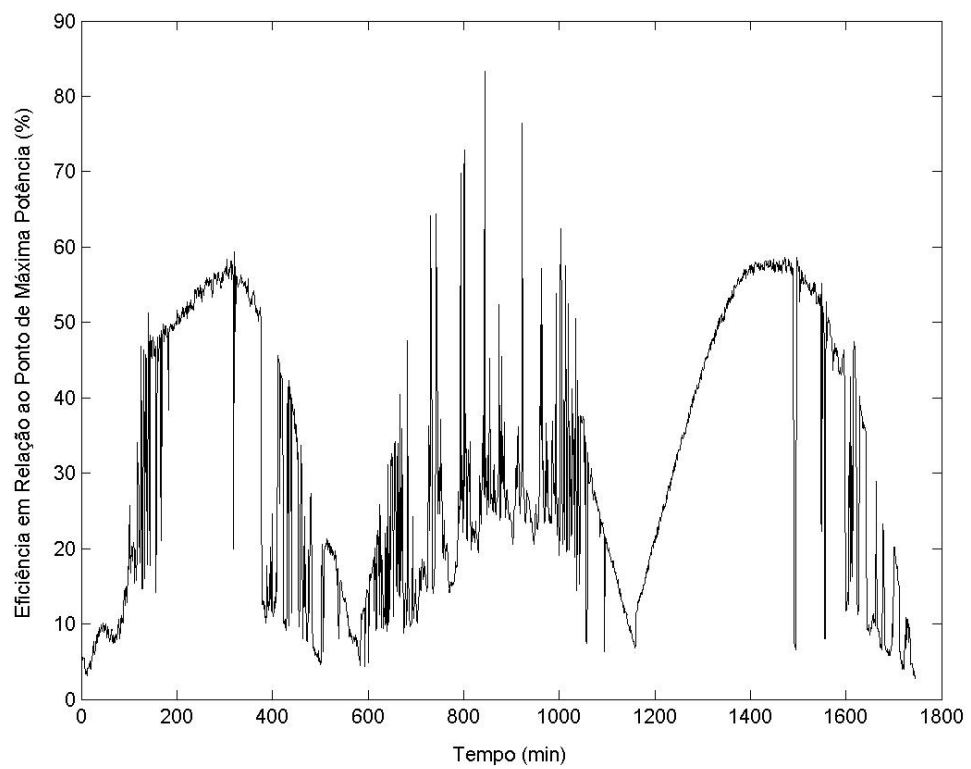


Figura 2.31 Eficiência em relação aos pontos de máxima potência.

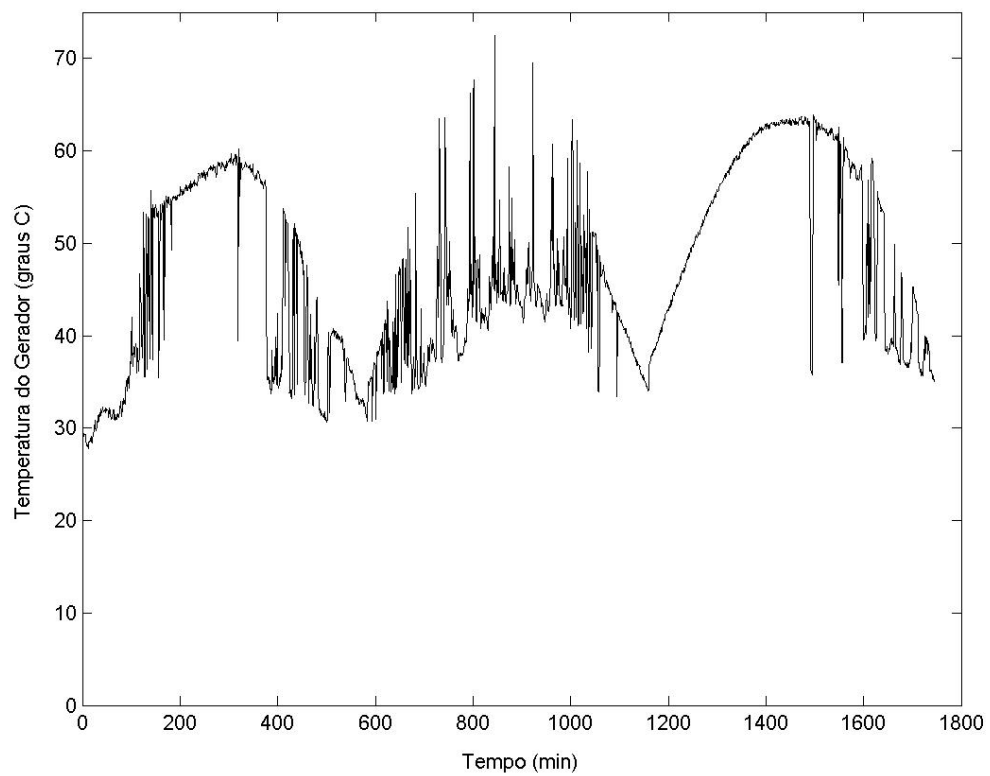


Figura 2.32 Temperatura do gerador fotovoltaico.

2.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o estado da arte da modelagem de geradores fotovoltaicos com a definição de duas categorias de modelos, sendo uma para análise de desempenho de células solares e a outra para o dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos. Foram realizadas a modelagem e simulação de uma célula solar com base nos fenômenos físicos que ocorrem nas células cristalinas semicondutoras e foram investigados cinco modelos de geradores fotovoltaicos, sendo eles: modelo analítico a parâmetros concentrados, modelo linear de Myers, modelo por interpolação, modelo de Anderson e modelo de Blaesser. O modelo a circuitos elétricos equivalentes, também, foi investigado, tendo como parâmetros concentrados a corrente foto-gerada, a corrente de saturação reversa dos diodos de difusão e recombinação e as resistências série e paralela. A variação da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto em relação à temperatura foi investigada por meio dos coeficientes de temperatura. Finalmente, foram investigados os modelos utilizados para avaliação da produção de energia, que utilizam modelos comportamentais e dados de campo.

A partir do estudo da modelagem de geradores fotovoltaicos foram desenvolvidos programas de simulação utilizando-se o MATLAB[®]. Estes programas utilizam os modelos analíticos de circuitos equivalentes a parâmetros concentrados. Os dados utilizados nas simulações foram do gerador KC50 da KYOCERA[®], sendo necessária a utilização, também, de dados do silício que não são fornecidos pelo fabricante.

Para a definição do modelo a ser utilizado neste trabalho foram simulados todos os modelos e investigado a influência das resistências série e paralela. Ficou evidenciado que a influência de R_S é preponderante em relação à R_P , ocorrendo uma redução da potência máxima de 40% quando da variação de R_S e de 10% quando da variação de R_P .

O modelo que melhor representa as características elétricas do gerador e que possui menor grau de complexidade foi o modelo que inclui os seguintes parâmetros concentrados: corrente foto-gerada, diodo de difusão e resistências série e paralela. Com esta definição, foram apresentadas as curvas características tensão-corrente e tensão-potência, eficiência e fator de preenchimento. Pode ser observado que quanto maior a irradiação, maior é a

eficiência e o fator de preenchimento. A influência da temperatura é preponderante na tensão de circuito aberto. A eficiência e o fator de preenchimento diminuem com o aumento da temperatura.

Finalmente, foi apresentado o conceito de Condição Nominal de Operação - CNO e as suas respectivas curvas características. A temperatura do gerador é função da irradiação, da temperatura ambiente e do TONC. Para uma maior irradiação, maior é a temperatura do gerador, e por conseguinte, menor é o valor da tensão de circuito aberto.

Para a análise da dinâmica do modelo foram utilizados perfis de irradiação e temperatura para a simulação de um gerador fotovoltaico acoplado diretamente a uma carga resistiva. O resultado da simulação apontou para uma eficiência em relação aos pontos de potência máxima menor que 60%, sendo o valor da eficiência função do valor da carga resistiva.

CAPÍTULO 3 LEVANTAMENTO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE GERADORES FOTOVOLTAICOS

3.1 INTRODUÇÃO

Programas de qualidade de equipamentos são imprescindíveis para o desenvolvimento da tecnologia nacional. Atualmente, encontra-se em implantação o programa de qualidade para componentes de sistemas fotovoltaicos do Instituto de Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. A estratégia básica a ser utilizada para a implantação do Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE para componentes de sistemas fotovoltaicos é o desenvolvimento de ensaios avaliando-se requisitos mínimos de desempenho dos equipamentos. As avaliações da compatibilidade de equipamentos e da disponibilidade energética são, também, imprescindíveis para a sustentabilidade técnica de sistemas fotovoltaicos.

A caracterização de geradores fotovoltaicos é importante pois permite a avaliação de desempenho e a comprovação das especificações fornecidas pelo fabricante. O primeiro passo para a caracterização consiste do levantamento das curvas características. Para isto, foi necessário o desenvolvimento de procedimentos de ensaios com base nos procedimentos desenvolvidos pelo PBE – INMETRO, normas e procedimentos nacionais e internacionais. A partir do estudo das normas e procedimentos existentes foi desenvolvido um

procedimento de ensaio e foi montada uma bancada para ensaios externos de geradores fotovoltaicos.

As duas principais normas utilizadas neste trabalho foram a ABNT NBR 12136, MB 3477: Módulos fotovoltaicos – Determinação de Características Fotoelétricas – 12/1991 (ABNT, 1991) e a ASTM E1036M-96: *Standard Test Methods for Electrical Performance of Non-concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells* (ASTM, 1996).

As etapas dos ensaios de geradores fotovoltaicos consistiram do estudo das normas e procedimentos, desenvolvimento dos procedimentos de ensaios, aferição dos sensores, montagem do sistema de aquisição de dados, desenvolvimento do programa de aquisição de dados, montagem da bancada e coleta e tratamento dos dados.

Foi realizado o levantamento de curvas de dois geradores fotovoltaicos do fabricante KYOCERA[®], sendo eles, o Gerador Padrão – GP e o Gerador Sob Ensaio – GSE. O GP consiste de um gerador que já foi submetido a ensaios por um laboratório internacional e o gerador sob ensaio consiste de um gerador da linha de produção. A partir do estudo comparativo dos resultados obtidos no ensaio do gerador padrão com os resultados fornecidos pelo laboratório internacional, é possível validar o procedimento de ensaio desenvolvido. O estudo comparativo dos resultados obtidos do GSE com os resultados obtidos com o GP, permite a avaliação de desempenho do GSE. Estes estudos comparativos são apresentados no Capítulo 4. O laboratório internacional que realizou os ensaios no gerador padrão foi o Laboratório de Energias Renováveis dos Estados Unidos da América - NREL.

O objetivo deste capítulo é desenvolver um procedimento para o levantamento de curvas características de geradores que irão permitir a estimação dos parâmetros dos modelos desenvolvidos no Capítulo 2, e desta forma, subsidiar o desenvolvimento do protótipo do seguidor de máxima potência. Os objetivos específicos consistem em desenvolver rotinas de levantamento de curvas características de geradores fotovoltaicos, montar bancada de ensaios e coletar e tratar os dados obtidos.

3.2 MATERIAIS E MÉTODO

3.2.1 Estudo das Normas para Ensaios de Geradores Fotovoltaicos

Para a estimação dos parâmetros dos modelos de geradores fotovoltaicos desenvolvidos no Capítulo 2, é necessária, inicialmente, a caracterização do gerador fotovoltaico. A caracterização de geradores fotovoltaicos pode ser realizada por meio de ensaios internos ou externos. No caso de ensaios internos, podem ser utilizados simuladores solares com luz contínua ou instantânea. Neste trabalho tratam-se apenas os ensaios externos.

O estudo das normas e padrões de ensaios é necessário para definir os procedimentos envolvendo energia solar fotovoltaica aplicados nos laboratórios de todo o mundo. Entre os principais órgãos nacionais e internacionais encontram-se: Grupo de Trabalho em Energia Solar Fotovoltaica – GTFOT – INMETRO, Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, *American Society for Testing and materials - ASTM*, *International Electrotechnical Commission – IEC* e *Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*.

A caracterização de geradores fotovoltaicos aqui realizada restringe-se ao levantamento de características elétricas sob condições de operação externa, ou seja, levantamento das curvas tensão versus corrente para diversos níveis de irradiação e temperatura.

As duas principais normas utilizadas neste trabalho foram:

- ABNT NBR 12136, MB 3477: Módulos fotovoltaicos – Determinação de Características Fotoelétricas – 12/1991 (ABNT, 1991);
- ASTM E1036M–96: *Standard Test Methods for Electrical Performance of Non-concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells* (ASTM, 1996).

A Norma NBR 12136, MB 3477 define os métodos de ensaios externos e internos para a determinação das características elétricas de geradores fotovoltaicos planos de silício cristalino. Para a execução dos ensaios, as principais condições gerais estabelecidas pela norma são: comparação do gerador sob ensaio com um dispositivo de referência calibrado, ou seja, ambos com resposta espectral relativa igual, correção dos valores de temperatura de calibração para a temperatura de ensaio, disposição do gerador e do

dispositivo de referência com a mesma inclinação, correntes de curto-circuito devem ser medidas com tensão zero, usando polarização variável para compensar a queda de tensão através da resistência-série, medições com luz solar natural devem possuir flutuação da irradiação global menor que $\pm 1,0\%$, irradiação global no mínimo de 800 W/m^2 e temperatura dos dispositivos uniforme com a temperatura do ar imediatamente antes das medições.

A norma define os procedimentos para a determinação da corrente de curto-circuito, da tensão de circuito aberto, do ponto de potência máxima e procedimento para levantamento das curvas características tensão versus corrente. As translações dos valores obtidos para a temperatura e irradiação desejadas obedecem à norma ABNT NBR 12302, NB 1386: Dispositivos fotovoltaicos – Correção das curvas características corrente versus tensão ($I \times V$), em função da temperatura – 12/1991. Finalmente são realizados os cálculos da eficiência e fator de preenchimento do módulo e determinação da resistência série.

A norma ASTM E-1036M-96 *Standard Test Methods for Electrical Performance of Non-concentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells* apresenta os procedimentos de ensaios para levantamento das curvas características, medições da radiação solar, coeficientes de temperatura, influência do espectro solar, influência do ângulo de incidência e temperatura de operação. Esta norma cobre o desempenho elétrico de módulos e arranjos fotovoltaicos sob luz do sol natural ou simulada usando uma célula de referência calibrada. O desempenho do gerador, iluminado por uma fonte de luz natural ou simulada, e utilizando uma célula de referência é medido pela determinação da corrente de curto circuito, da tensão de circuito aberto, da potência máxima e da tensão de potência máxima. Pode ser realizada, também, a translação dos parâmetros para condições de temperatura e irradiação desejadas.

Outras normas, como a IEC 61215: *Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic Modules – Design qualification and type approval*, 1993, a IEC 60904-1: *Photovoltaic Devices – Part 1: Measurement of Photovoltaic Current-Voltage Characteristics*, 1987 e a IEEE 1262-1995: *Recommended Practice for Qualification of Photovoltaic Modules* foram, também, investigadas.

3.2.2 Desenvolvimento de Procedimentos para levantamento de Curvas Características

A caracterização de geradores fotovoltaicos geralmente é utilizada para certificação em programas de qualidade de equipamentos, para caracterização de desempenho em condições de operação em campo ou para geração de modelos que permitam a simulação de geradores fotovoltaicos, subsidiando o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos. Conforme a aplicabilidade da caracterização de geradores fotovoltaicos, a literatura apresenta diversos procedimentos específicos, mas com base nas normas investigadas no item 3.2.1 (KING, 1997).

No caso deste estudo, sendo o objetivo gerar modelos de geradores fotovoltaicos para subsidiar o desenvolvimento de um seguidor de potência máxima, foi realizada uma pesquisa de procedimentos específicos, levando-se em conta as normas definidas pelos órgãos nacionais e internacionais.

Um requisito básico para o desenvolvimento do procedimento a ser adotado foi a simplicidade de execução. Um procedimento simplificado para o levantamento das curvas características tensão versus corrente, por meio de ensaio externo, consiste dos seguintes passos:

- Determinação da hora na qual a massa de ar é igual a 1,5;
- Montagem do sistema para teste;
- Exposição do gerador, junto a um gerador padrão, à irradiação solar por um intervalo de tempo suficiente para que haja uma faixa de variação de temperatura suficiente para a obtenção dos coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto. O tempo de exposição é função da velocidade do vento e da irradiação solar;
- Utilização de simuladores de carga eletrônicos que permitam a variação de carga do gerador sob ensaio e do padrão;
- Medição das temperaturas nas partes traseiras dos geradores; e
- Medição da característica tensão versus corrente dos geradores.

A utilização de um Gerador Padrão – GP permite a validação do procedimento adotado no levantamento das curvas características do Gerador Sob Ensaio – GSE.

O simulador de carga eletrônico utilizado para a obtenção da curva característica tensão versus corrente consistiu de um conversor de corrente contínua para corrente contínua, que permite o controle eletrônico de uma carga resistiva imposta ao gerador fotovoltaico. Este conversor pode utilizar uma regulação do tipo linear ou chaveada. Um sistema de aquisição de dados deve controlar a referência de corrente ou o ciclo de trabalho por meio de um conversor digital-analógico e permitir a coleta dos seguintes parâmetros: irradiação solar global inclinada e horizontal, direta normal, temperatura, tensão e corrente dos geradores.

Por meio das curvas características obtidas para um nível de irradiação solar global inclinada e com a temperatura variando, pode-se determinar os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito, da tensão de circuito aberto e da corrente e tensão no ponto de máxima potência. Este estudo é realizado no Capítulo 4. Durante os ensaios deve-se observar as influências sistemáticas para não se obter coeficientes de temperatura irrealistas. As influências que devem ser observadas são: velocidade do vento, irradiação intermitente, moldura, caixa de junção, montagem etc. Os procedimentos de testes devem ser controlados de forma a permitir a repetibilidade. As condições de teste ideais são: isolamento térmico da parte traseira do módulo, irradiação estável e velocidade do vento menor que 2 m/s (KING, 1997).

Com as medições da irradiação solar global horizontal e direta normal, pode-se investigar, também, a influência da irradiação difusa no comportamento das curvas características.

A partir das curvas características obtidas pode-se, também, estimar os parâmetros dos modelos desenvolvidos no Capítulo 2. Este estudo é realizado no Capítulo 4. Com este estudo é obtido o desempenho elétrico do gerador para uma faixa ampla de condições de operação.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Procedimento para Levantamento das Curvas Características

O procedimento para levantamento das curvas características tensão versus corrente, conforme o estudo das normas e o desenvolvimento de procedimento realizado, consiste das seguintes etapas:

1. Cálculo da hora solar, azimute e inclinação do dia do ensaio para o gerador sob ensaio e do gerador padrão para uma massa de ar igual a 1,5: foi utilizado o programa SunPlot 3D, que faz parte do pacote Solar Design Studio 5.0[®] da Maui Software[®]. Os dados de entrada do programa são o dia, mês e ano de realização do ensaio, latitude, longitude e meridiano padrão da localidade. Para um ângulo de incidência igual a zero, o programa calcula o azimute, a inclinação e a hora solar para a realização do ensaio. A Figura 3.1 apresenta a janela do programa SunPlot3D;
2. Disposição do Gerador Padrão – GP, do Gerador Sob Ensaio – GSE e do sensor de irradiação solar global com a inclinação e azimute calculados na etapa 1;
3. Utilização de um simulador de carga eletrônico em cada gerador para a variação de carga nos mesmos;
4. Medições das seguintes grandezas durante o ensaio: tensão e corrente do GP e GSE, irradiação global inclinada, irradiação global horizontal, irradiação direta normal, temperatura na parte traseira dos geradores, temperatura ambiente, velocidade do vento, direção do vento, umidade e pressão atmosférica.

As condições padrão de teste são irradiação a 1000 W/m^2 e temperatura a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Nos ensaios externos estas condições dificilmente são conseguidas. Manteve-se apenas a massa de ar igual a 1,5 para minimizar a influência da distribuição espectral da irradiação nos resultados. Como as curvas levantadas são utilizadas para a estimação dos parâmetros dos modelos, os resultados permitem a translação para valores de irradiação e temperatura desejadas.

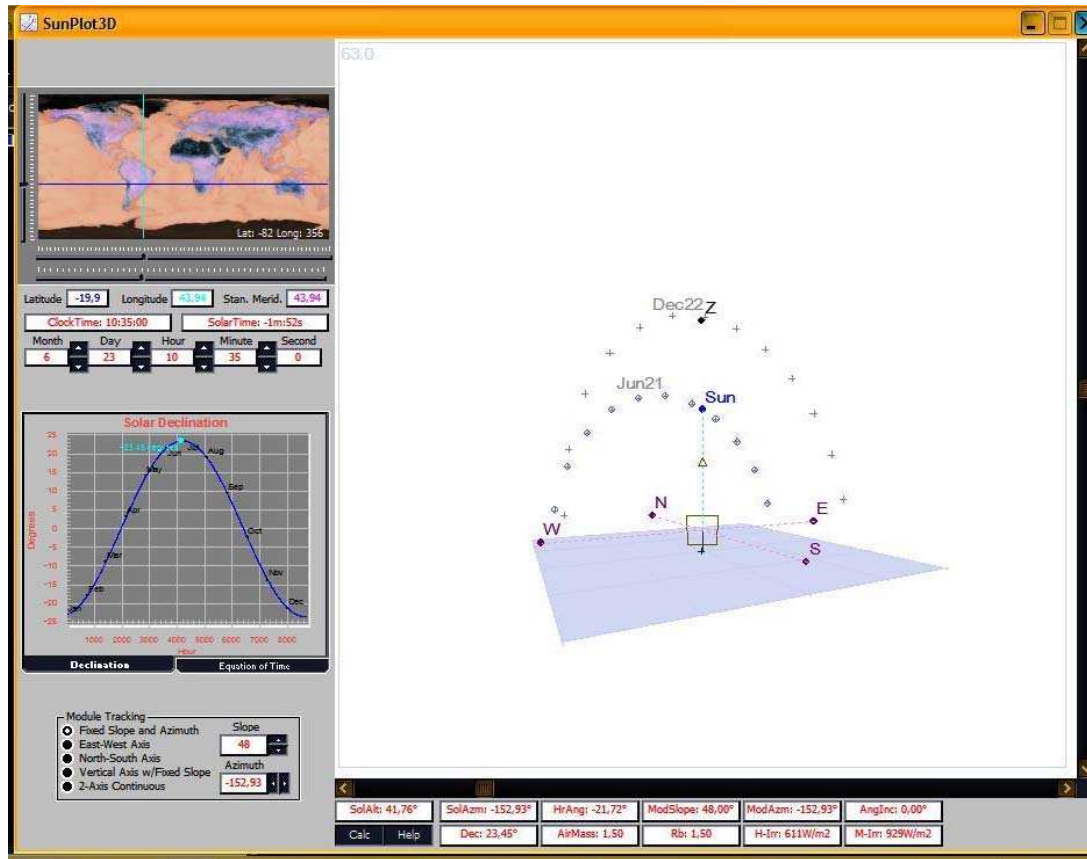


Figura 3.1 Janela do programa SunPlot 3D[®] da Maui Software[®].

3.3.2 Bancada de Ensaios

A implantação da bancada de ensaios de geradores fotovoltaicos foi iniciada com a calibração de todos os sensores a serem utilizados nas medições, começando pelos sensores de irradiação solar.

Foram utilizados dois piranômetros do tipo PSP-EPPLEY para a medição da irradiação solar global horizontal e global inclinada e um pireliômetro EPPLEY para a medição da irradiação direta normal. Para os piranômetros foi adotado o procedimento de calibração com base na Norma ISO 9847 – *Solar Energy – Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer* (Calibração de Piranômetros de Campo por Comparação com um Piranômetro de Referência). Neste procedimento os piranômetros a serem calibrados junto com o respectivo piranômetro padrão são instalados em uma bancada de testes de forma a garantir condições

similares de insolação. O piranômetro padrão consiste de um piranômetro PSP-EPPLEY que utilizado apenas para calibração. O sinal de saída dos piranômetros em calibração é em milivolts (mV) e do instrumento padrão em W/m^2 para permitir a determinação da respectiva constante de calibração, após tratamento estatístico dos dados registrados. Os dados de saída dos piranômetros são registrados em intervalos de 30 segundos para diferentes níveis de insolação. A constante do piranômetro é obtida através de um ajuste linear realizado com o tratamento estatístico dos dados coletados (irradiação e tensão).

O pireliômetro não foi calibrado devido à inexistência em laboratório de um pireliômetro padrão.

Para a calibração dos termopares tipo K para a medição de temperatura na parte traseira dos geradores fotovoltaicos adotou-se a Norma NBR 13770: Termopar – Calibração por Comparação com Termoresistência de Referência – JAN 1997. Esta norma especifica o método de calibração de termopares por comparação das forças eletromotrizes térmicas geradas pelos termopares de ensaio com a variação da resistência de uma termorresistência de referência. Os equipamentos utilizados foram um meio térmico para proporcionar a mesma temperatura (estabilidade e uniformidade térmica) na junção de medição do termopar de ensaio e no bulbo do sensor da termorresistência de referência, um sistema de aquisição de dados - multímetro digital Classe 1 com resolução igual a $0,01 \mu V$ e incerteza em $100 mV$ igual a $\pm 2,0 \mu V$ e termorresistência de referência Pt 100Ω a $0^\circ C$ calibrada.

Os sensores de corrente de efeito Hall para as medições de corrente dos geradores fotovoltaicos e os resistores de precisão para as medições de tensão dos geradores não foram calibrados, apenas aferidos por meio de Osciloscópio FLUKE 190 mais sonda de corrente e multímetro AGILENT 34401A de $6 \frac{1}{2}$ dígitos, respectivamente.

Para aquisição de dados de temperaturas dos geradores fotovoltaicos utilizou-se um módulo de aquisição da ADAM[®] e um conversor 485/232, com canais com compensação de junção fria.

Nas medições das variáveis atmosféricas, tais como temperatura ambiente, velocidade e direção do vento, umidade, pressão atmosférica e precipitação foi utilizada a estação meteorológica WMR918 da Oregon Cientific®.

Uma fotografia da área de ensaios e um diagrama da bancada de ensaios são apresentadas nas Figuras 3.2 e 3.3.

O sistema de aquisição de dados utilizado no ensaio consistiu de uma placa de aquisição de dados PCI-6024E da National Instruments®. O programa para a aquisição de dados foi desenvolvido utilizando-se a plataforma LABVIEW®, também, da National Instruments®.

As medições de irradiação global inclinada, global na horizontal, direta normal, tensões e correntes dos Geradores Sob Ensaio e do Padrão foram realizadas com a placa PCI-6024E e com um circuito condicionador, que permite a filtragem e amplificação de sinais. Este mesmo sistema gerou a referência de corrente para os simuladores de carga eletrônico, que consistem, basicamente, de dois reguladores lineares de corrente. A referência de corrente consistiu de um sinal de tensão com forma de onda triangular, com amplitude de 2,5 V, com um deslocamento (*offset*) de 2,5 V e uma frequência de 10,0 Hz. A taxa de amostragem dos sinais de tensão e corrente dos geradores foi de 1,0 kHz, sendo realizadas medições de 1 em 1 segundo. Com a frequência de 10 Hz da referência de corrente e com a taxa de amostragem de 1,0 kHz, foram realizadas 200 leituras dos 4 canais a cada segundo, correspondendo aproximadamente a 3 curvas características tensão versus corrente dos geradores fotovoltaicos.

Os reguladores lineares possuem realimentação de corrente realizada por meio dos sensores de corrente de efeito Hall. Estes sinais são amplificados e comparados com o sinal de referência de corrente. O sinal de erro da comparação atua na base de um transistor que trabalha na região linear. Desta forma as correntes dos geradores fotovoltaicos acompanham a forma de onda triangular da referência de corrente gerada por uma das saídas analógicas da placa de aquisição de dados.



Figura 3.2 Área de ensaios de geradores fotovoltaicos (Fonte: acervo do Grupo de Estudos em Energia - GREEN da PUC Minas).

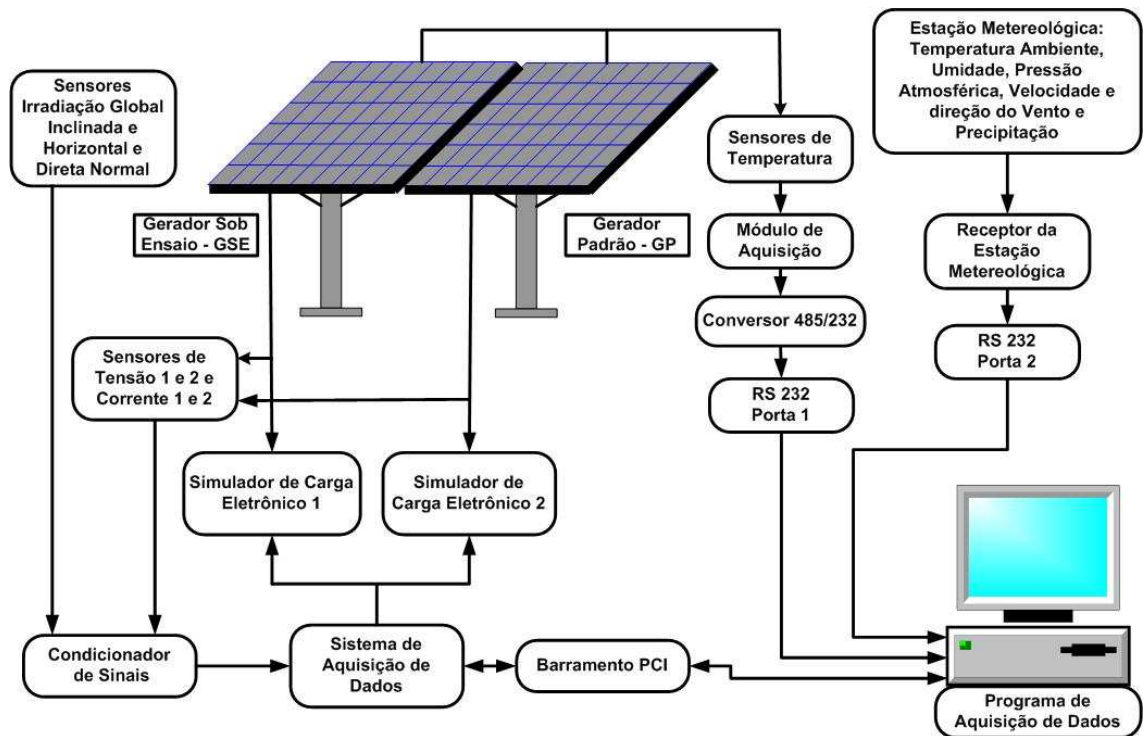


Figura 3.3 Diagrama da bancada de ensaios.

3.3.3 Coleta de Dados

Os resultados das coletas de dados para o Gerador Padrão – GP e para o Gerador Sob Ensaio – GSE são apresentados a seguir. Os geradores fotovoltaicos utilizados são do fabricante KYOCERA®. Um primeiro ensaio foi realizado no dia 19 de novembro de 2005. Os Quadros 3.1 e 3.2 apresentam a localização e os dados solares nos quais foram realizados os ensaios e a Figura 3.4 apresenta os cálculos para a determinação da hora do ensaio e a disposição dos geradores.

Quadro 3.1 Localização – cidade de Belo Horizonte.

Latitude:	-19,92°
Longitude:	43,94° oeste
Meridiano padrão:	43,94° oeste
Altitude:	852 m

Quadro 3.2 Dados solares do primeiro ensaio.

Data:	19/11/2005
Hora:	09:20:00 (horário de verão)
Hora solar:	09:34:14 (horário de verão)
Altitude solar:	41,7°
Azimute solar:	- 82,0°
Hora angular:	- 51,4°
Inclinação dos geradores:	48,0°
Azimute dos geradores:	- 82,0°
Ângulo de incidência:	- 0,0°
Declinação solar:	- 18,9°
Massa de ar:	1,5

O ensaio foi realizado na cidade de Belo Horizonte, conforme os dados de localidade apresentados no Quadro 3.1. Os geradores foram dispostos com um azimute de - 82,0° e um ângulo de inclinação de 48°, correspondendo a uma massa de ar igual a 1,5 e um ângulo de incidência da irradiação igual a zero, conforme os dados solares apresentados no Quadro 3.2.

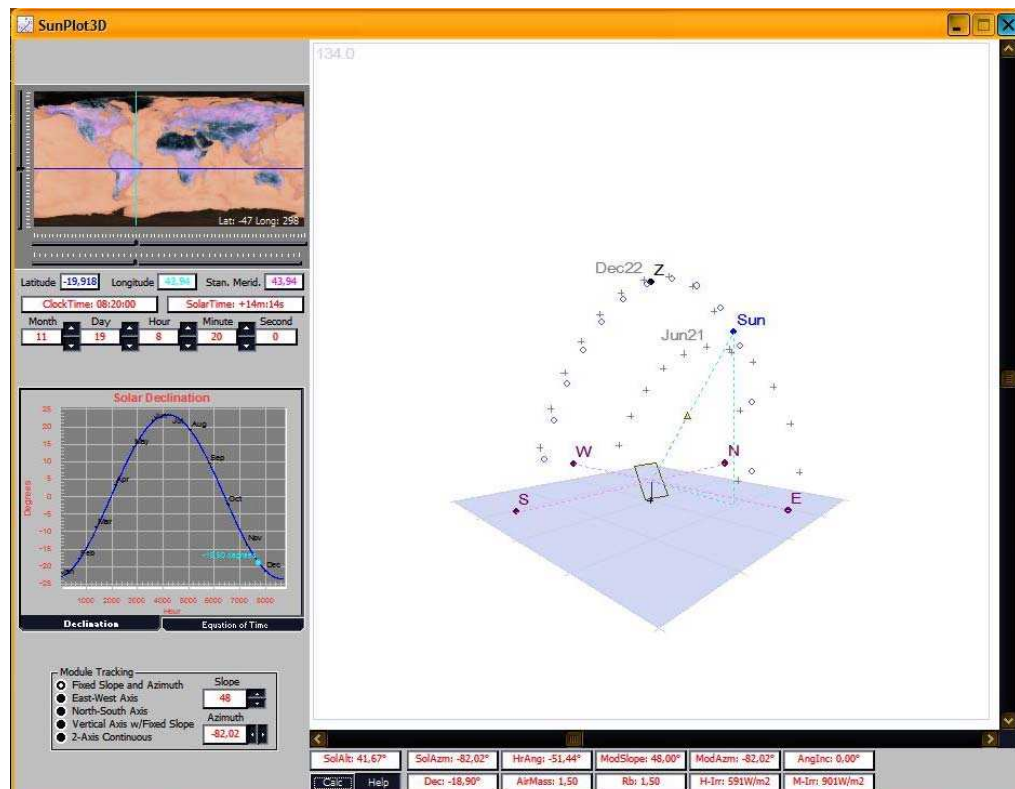


Figura 3.4 Janela do programa para o cálculo da hora do ensaio e disposição dos geradores.

A duração do ensaio foi de aproximadamente 10 minutos, sendo realizado com céu limpo e no intervalo de tempo que compreendendo a hora solar em que a massa de ar igual é igual a 1,5, isto é, 09:34:14 (horário de verão). Conforme o Quadro 3.2, foi observado que esta discrepância entre a hora de realização do ensaio e a hora solar não é relevante, já que a variação na massa de ar é menor que $\pm 0,1$, ou seja, a variação espectral da irradiação é pequena.

Os resultados da coleta de dados são apresentados nos Quadros 3.3 e 3.4 e nas Figuras 3.5 a 3.8. Os Quadros 3.3 e 3.4 apresentam as condições ambientais nas quais foram realizados os ensaios e os principais parâmetros dos geradores, respectivamente. As curvas características tensão versus corrente obtidas para o GP e para o GSE são apresentadas nas Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente.

A variação percentual da irradiação global inclinada durante o ensaio, conforme o Quadro 3.3, foi menor que $\pm 1,0\%$, estando de acordo com o

procedimento e normas adotadas. Já as variações percentuais da irradiação global horizontal e irradiação direta normal durante o ensaio foram menores que $\pm 2,0\%$ e $\pm 2,5\%$, respectivamente. O procedimento e normas adotadas não estabelecem um percentual de variação para estes parâmetros. Estas variações são devidas à duração do ensaio, em torno de 10 minutos, e determinam a influência da irradiação difusa. Já que o ensaio foi realizado com céu limpo, estas variações são devidas, também, à influência do entorno.

A velocidade do vento durante o ensaio foi de 0,8 m/s, conforme o Quadro 3.3, estando de acordo com o procedimento e normas adotadas, que estabelece uma velocidade menor que 2,0 m/s.

A variação percentual da temperatura ambiente durante o ensaio, conforme o Quadro 3.3, foi menor que $\pm 1,3\%$, estando de acordo com o procedimento adotado.

Conforme o Quadro 3.4, os gradientes de temperatura na parte de trás do GP e GSE, durante o levantamento das curvas, apresentaram valores iguais a 9,1 °C e 9,5 °C, respectivamente. Por meio destes gradientes de temperatura é que são calculados os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto. Este estudo é realizado no Capítulo 4.

Quadro 3.3 Condições ambientais do primeiro ensaio.

Condições de ensaio	Início	Fim	Valor médio
Irradiação global inclinada (W/m ²):	1042,3	1035	1038,7
Irradiação global horizontal (W/m ²):	735,8	761,1	748,5
Irradiação direta normal (W/m ²):	868,5	829,7	849,1
Velocidade do vento (m/s):	0,8	0,8	0,8
Direção do vento (graus):	79	72	75,5
Temperatura ambiente (°C):	26,4	27,1	26,8
Umidade relativa (%):	68	64	66
Pressão atmosférica (kPa):	91,2	91,2	91,2

Quadro 3.4 Parâmetros dos geradores no primeiro ensaio.

Parâmetros	Início do ensaio		Fim do ensaio	
	GP	GSE	GP	GSE
Temperatura do gerador (°C):	40,3	40,5	49,4	50,0
Tensão de circuito aberto (V):	20,9	20,7	20,0	19,8
Corrente de curto-circuito (A):	3,49	3,49	3,49	3,49
Potência máxima (W):	53,3	54,1	50,2	51,4
Tensão no ponto de potência máxima (V):	16,8	17,1	15,6	16,3
Corrente no ponto de potência máxima (A):	3,18	3,17	3,21	3,15
Fator de preenchimento:	0,73	0,75	0,72	0,74
Eficiência (%):	14,2	14,4	13,4	13,7

Conforme o Quadro 3.4, ocorre uma diminuição da tensão de circuito aberto, da potência máxima, da tensão no ponto de potência máxima, do fator de preenchimento e da eficiência com a elevação da temperatura. Isto é devido ao coeficiente de temperatura negativo da tensão de circuito aberto. A corrente de curto-circuito permanece inalterada e a corrente no ponto de potência máxima aumenta, para o GP, e diminui para o GSE, conforme a elevação de temperatura. O coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito é positivo, porém a sua influência é menor quando comparado com o coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto. Deve ser observado, conforme o Quadro 3.3, que a irradiação global inclinada no início do ensaio é maior que ao final do ensaio. Para uma correta análise, os parâmetros devem ser corrigidos em relação à irradiação e os coeficientes de temperatura devem ser calculados. Este estudo é realizado no Capítulo 4. Para destacar o efeito da temperatura nos parâmetros do gerador, as Figuras 3.7 e 3.8 apresentam as curvas tensão - corrente parametrizadas em função da temperatura na parte de trás do GP e do GSE, respectivamente. A variação percentual da potência máxima no início e final do ensaio, em relação ao ponto de potência máxima fornecido pelo fabricante, são iguais a 6,6% e 0,4%, para o GP, respectivamente e iguais a 8,2% e 2,8%, para o GSE, respectivamente.

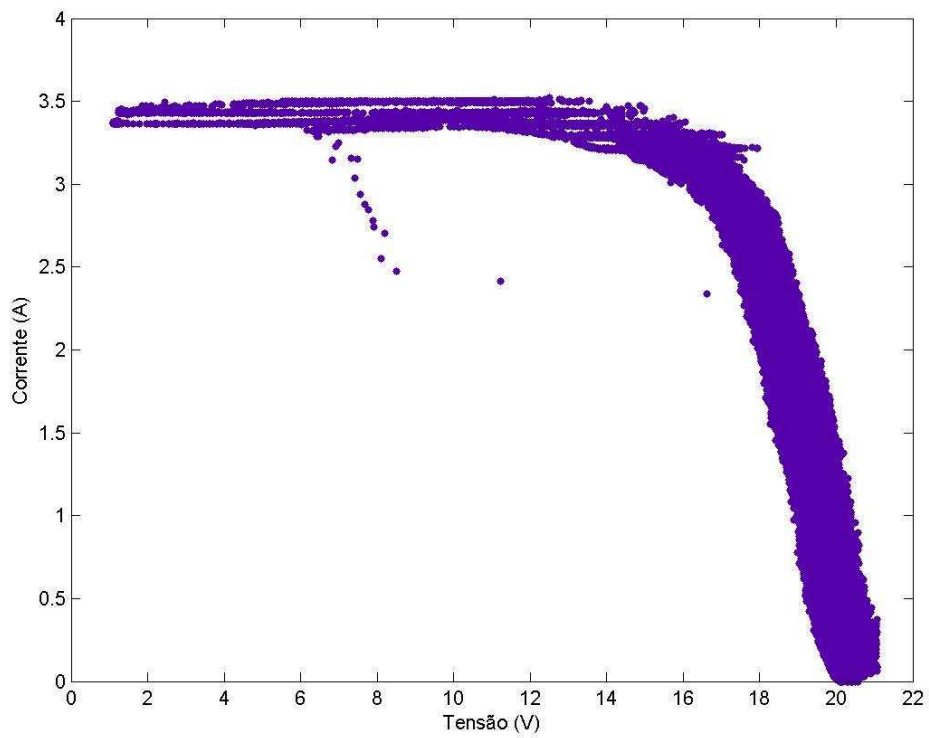


Figura 3.5 Curvas características tensão versus corrente do Gerador Padrão - GP.

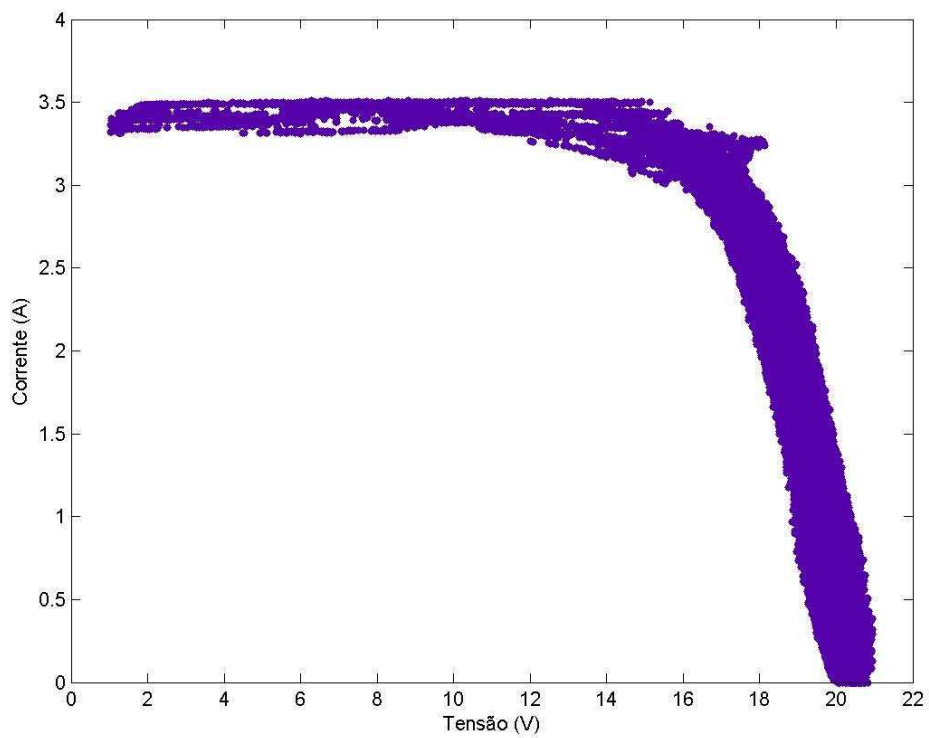


Figura 3.6 Curvas características tensão versus corrente do Gerador Sob Ensaio - GSE.

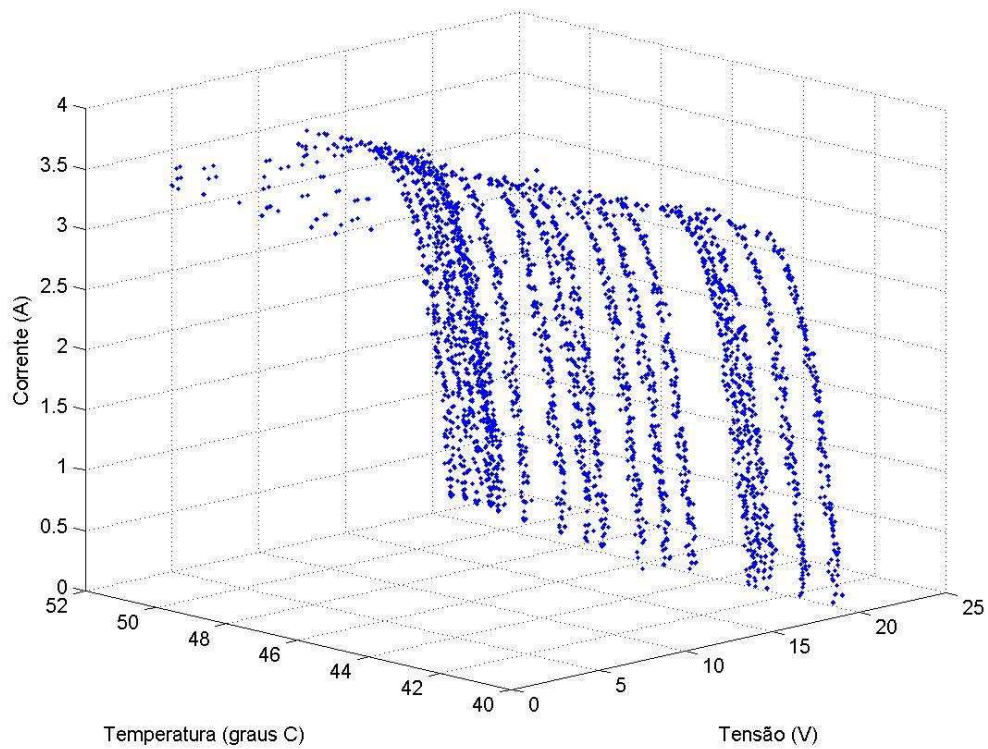


Figura 3.7 Curvas características tensão – corrente parametrizadas em função da temperatura do Gerador Padrão – GP.

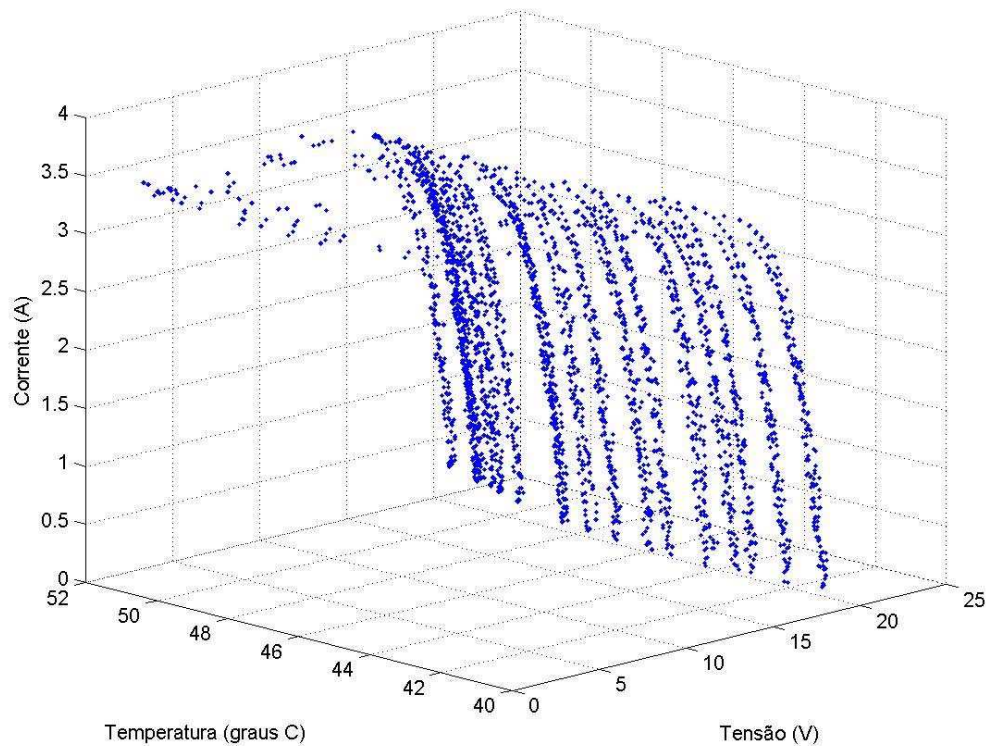


Figura 3.8 Curvas características tensão – corrente parametrizadas em função da temperatura do Gerador Sob Ensaio – GSE.

Um segundo ensaio foi realizado no dia 21 de dezembro de 2005 na mesma localidade. A Figura 3.9 apresenta os cálculos para a determinação da hora do ensaio e a disposição dos geradores e o Quadro 3.5 apresenta os dados solares nos quais foram realizados os ensaios.

A duração do ensaio foi de aproximadamente de 3,0 minutos, com céu limpo. Os resultados da coleta de dados são apresentados nos Quadros 3.6 e 3.7 e nas Figuras 3.10 e 3.11. Os Quadros 3.6 e 3.7 apresentam as condições ambientais nas quais foram realizados os ensaios e os principais parâmetros dos geradores, respectivamente. As curvas características tensão versus corrente obtidas para o GP e para o GSE são apresentadas nas Figuras 3.10 e 3.11, respectivamente.

Conforme o Quadro 3.6, as variações percentuais durante o ensaio da irradiação global inclinada, global horizontal e direta normal foram menores que $\pm 1,0\%$, com um valor médio da irradiação global inclinada igual a 1002 W/m^2 .

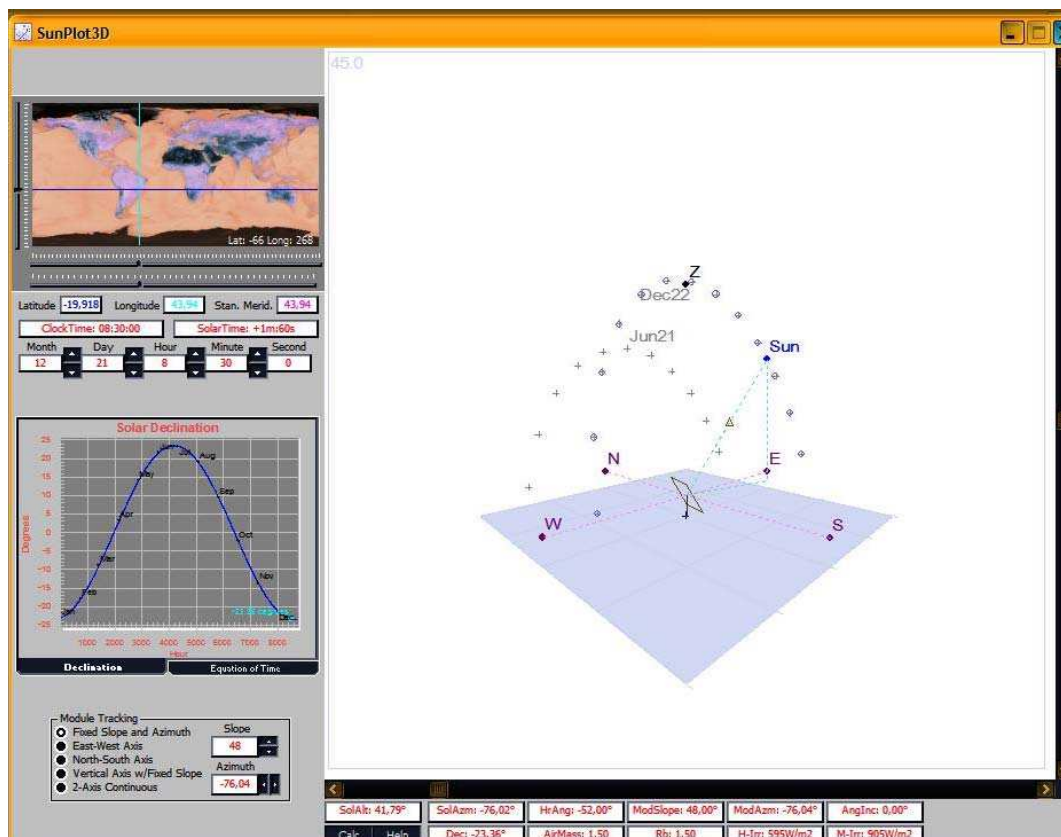


Figura 3.9 Janela do programa para o cálculo da hora do ensaio e disposição dos geradores.

Quadro 3.5 Dados solares do segundo ensaio.

Data:	21/12/2005
Hora:	09:30:00 (horário de verão)
Hora solar:	09:32:00 (horário de verão)
Altitude solar:	41,8°
Azimute solar:	- 76,0°
Hora angular:	- 52,0°
Inclinação dos geradores:	48,0°
Azimute dos geradores:	- 76,0°
Ângulo de incidência:	0,0°
Declinação solar:	- 23,36°
Massa de ar:	1,5

A velocidade do vento durante o ensaio foi de 1,3 m/s e a temperatura ambiente foi de 27,1 °C, conforme o Quadro 3.6. A temperatura na parte de trás do GP permaneceu constante durante o ensaio com valor igual a 58 °C, mas para o GSE ocorreu um decréscimo de temperatura, passando de 58 °C, no início do ensaio, para 55 °C, ao final do ensaio. Este decréscimo de temperatura poderia ser explicado por problemas na disposição dos termopares na parte de trás do GSE, mas os três termopares que realizam a medição apresentaram decréscimo na temperatura. Desta forma, este decréscimo pode ser explicado pela dinâmica térmica do gerador.

Os parâmetros dos geradores no início e ao final do ensaio são apresentados no Quadro 3.7. Como a temperatura permaneceu constante e ocorreu apenas um pequeno decréscimo da irradiação durante o ensaio do GP, a tensão de circuito aberto permaneceu constante, mas para todos os outros parâmetros ocorreu um decréscimo, acompanhando o decréscimo da irradiação. Em termos da potência máxima do GP, o decréscimo percentual foi menor do que $\pm 2,0\%$. Com condições similares de irradiação e temperatura no início do ensaio para o GP e GSE, a variação percentual da potência máxima

foi menor do que $\pm 2,5\%$, estando dentro da faixa de $\pm 10,0\%$ especificada pelo fabricante para Condição Padrão de Teste – CPT.

A irradiação global inclinada e a temperatura diminuíram durante o ensaio do GSE. O decréscimo da irradiação foi menor que $\pm 1,0\%$ e da temperatura foi menor que $\pm 3,0\%$. Conforme visto no Capítulo 2, o decréscimo da irradiação acarreta a diminuição dos parâmetros do gerador e o decréscimo da temperatura acarreta a diminuição apenas da corrente de curto-circuito e da corrente do ponto de potência máxima, sendo que ocorre um aumento dos outros parâmetros. A influência da irradiação é preponderante nos parâmetros relacionados à corrente e a influência da temperatura é preponderante nos parâmetros relacionados à tensão. Tanto a corrente de curto-circuito quanto a corrente do ponto de potência máxima diminuíram, conforme a diminuição da irradiação e da temperatura. Já a tensão de circuito aberto permaneceu constante, mas a tensão do ponto de potência máxima aumentou, acarretando um aumento da potência máxima, fator de preenchimento e eficiência, corroborando a análise realizada e validando o procedimento adotado.

Quadro 3.6 Condições ambientais do segundo ensaio.

Condições de ensaio	Início	Fim	Valor médio
Irradiação global inclinada (W/m^2):	1013	991	1002
Irradiação global horizontal (W/m^2):	729	725	727
Irradiação direta normal (W/m^2):	856	844	850
Velocidade do vento (m/s):	1,3	1,3	1,3
Direção do vento (graus):	91	89	90
Temperatura ambiente ($^{\circ}C$):	27,1	27,1	27,1
Umidade relativa (%):	50	50	50
Pressão atmosférica (kPa):	91,5	91,5	91,5

Quadro 3.7 Parâmetros dos geradores no segundo ensaio.

Parâmetros	Início do ensaio		Fim do ensaio	
	GP	GSE	GP	GSE
Temperatura do gerador (°C):	58,0	58,0	58,0	55,0
Tensão de circuito aberto (V):	19,6	19,5	19,6	19,5
Corrente de curto-circuito (A):	3,47	3,42	3,43	3,40
Potência máxima (W):	49,6	47,1	47,7	47,3
Tensão no ponto de potência máxima (V):	15,7	15,2	15,6	15,7
Corrente no ponto de potência máxima (A):	3,16	3,10	3,1	3,0
Fator de preenchimento:	0,73	0,70	0,71	0,71
Eficiência (%):	13,3	12,6	12,7	12,6

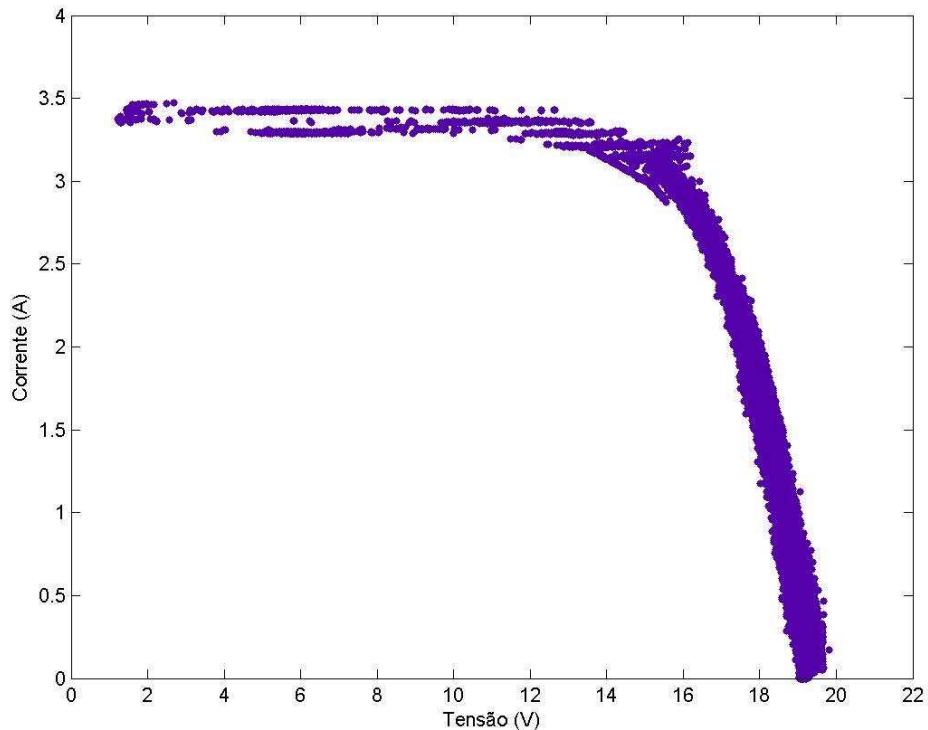


Figura 3.10 Curvas características tensão versus corrente do Gerador Padrão – GP.

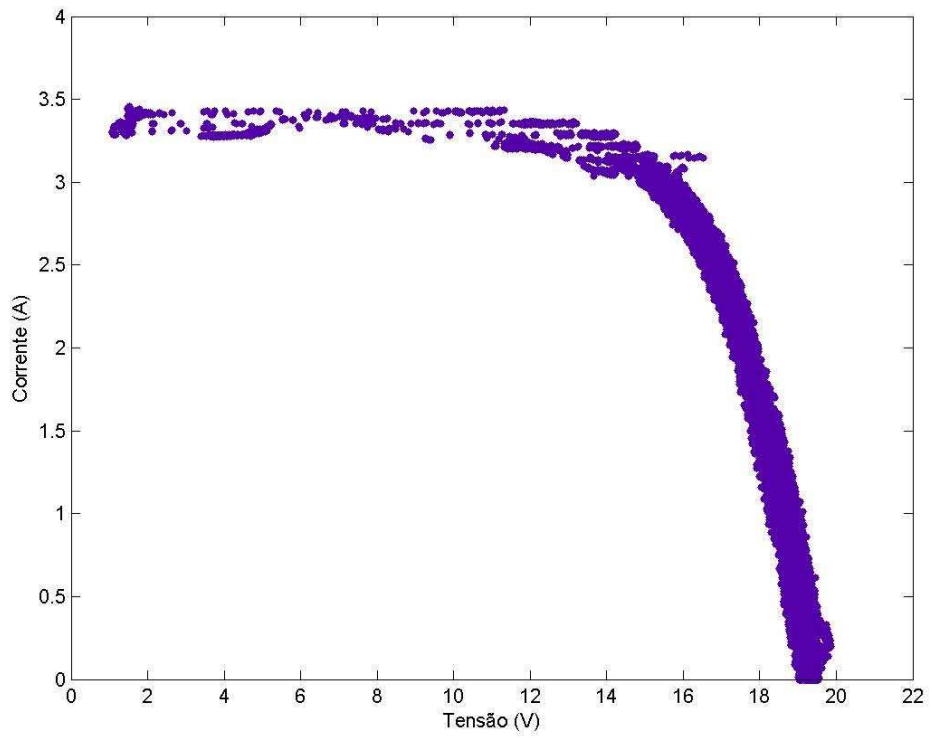


Figura 3.11 Curvas características tensão versus corrente do Gerador Sob Ensaio – GSE.

3.4 CONCLUSÃO

O procedimento para levantamento das curvas características dos geradores fotovoltaicos mostrou-se eficaz e sua simplicidade permite a análise da repetibilidade, conforme os resultados obtidos nos dois ensaios realizados.

As condições ambientais apresentadas nos dois ensaios foram suficientes e satisfatórias para a realização dos ensaios conforme o procedimento e normas adotadas. O primeiro ensaio teve uma duração de 10 minutos e o segundo de 3 minutos, apresentando uma variação percentual para a irradiação global inclinada menor que $\pm 1,0\%$. As velocidades do vento menores que 2,0 m/s, nos dois ensaios, estão de acordo com o procedimento adotado. No primeiro ensaio foram obtidos gradientes de temperatura na parte de trás do GP e GSE de 9,1 °C e 9,5 °C, respectivamente. Estes gradientes irão permitir o cálculo dos coeficientes de temperatura dos parâmetros dos geradores. O segundo ensaio foi realizado com temperatura constante para o Gerador Padrão – GP e com variação da temperatura para o Gerador Sob Ensaio – GSE e variação da irradiação em uma pequena faixa nos dois geradores.

A análise das curvas características e dos parâmetros dos geradores para os dois ensaios realizados permitiram corroborar a modelagem realizada no Capítulo 2 e quantificar a influência da irradiação e da temperatura nos parâmetros dos geradores. Os parâmetros possuem coeficientes positivos com relação à irradiação, coeficientes positivos de temperatura para os parâmetros de corrente e coeficientes negativos de temperatura para os parâmetros de tensão, sendo estes últimos preponderantes. Foi observado, também, que para uma correta análise, os parâmetros devem ser corrigidos em relação à irradiação, sendo calculados então os coeficientes de temperatura. As variações percentuais dos parâmetros dos geradores ficaram bem abaixo da faixa de $\pm 10,0\%$ especificada pelo fabricante para Condição Padrão de Teste – CPT.

A análise dos resultados da coleta de dados nos ensaios do gerador padrão e do gerador sob ensaio mostrou-se eficaz, corroborando a modelagem de geradores realizada e validando o procedimento adotado.

CAPÍTULO 4

ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELOS DE GERADORES FOTOVOLTAICOS

4.1 INTRODUÇÃO

As técnicas de identificação de sistemas, como por exemplo, estimação de parâmetros de modelos, são ferramentas que permitem o estudo e a otimização da dinâmica de sistemas. Estas ferramentas possibilitam determinar a função de transferência de sistemas ou estimar os parâmetros de modelos, de forma a estabelecer, por meio de um controlador, a dinâmica necessária ao sistema.

Neste capítulo são apresentados os cálculos dos coeficientes de temperatura e a estimação dos parâmetros dos modelos desenvolvidos no Capítulo 2, a partir das curvas características levantadas no Capítulo 3.

Os cálculos dos coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto foram obtidos conforme o procedimento e normas adotadas. Foi realizada, também, a translação dos dados para a Condição Padrão de Teste – CPT.

Na estimação dos parâmetros dos modelos foram utilizadas técnicas clássicas de identificação de sistemas. A partir dos dados coletados foram estimados os parâmetros dos modelos e foi realizado um estudo comparativo do Gerador Padrão – GP com o Gerador Sob Ensaio – GSE, com os dados dos fabricantes e com ensaios realizados em laboratórios nacionais e internacionais.

Os métodos aplicados na estimação dos parâmetros foram o método dos mínimos quadrados não linear e o método de otimização de Levenberg-Marquand e Região Confiável (OPTIMIZATION TOOLBOX, 2002). Um programa na plataforma MATLAB®, tendo como entrada os dados coletados, estima as constantes e os parâmetros dos modelos. Estes modelos foram simulados e foram traçadas as respectivas curvas características. Um estudo comparativo foi realizado para a validação do estudo. A partir dos resultados obtidos foram gerados modelos para a simulação do conjunto gerador fotovoltaico mais conversor eletrônico com seguidor de máxima potência.

Portanto, o objetivo geral deste capítulo é estimar os parâmetros do modelo de geradores fotovoltaicos a partir do levantamento das curvas características. Já os objetivos específicos são:

- Determinar os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito, da tensão de circuito aberto e da potência máxima;
- Estimar os parâmetros do modelo do gerador fotovoltaico;
- Validar a estimação realizada por meio de estudo comparativo dos resultados de ensaios realizados em um laboratório nacional e um internacional.

4.2 MATERIAIS E MÉTODO

4.2.1 Coeficientes de Temperatura

Os principais parâmetros dos geradores fotovoltaicos variam com a temperatura, conforme a modelagem realizada no Capítulo 2. Uma forma simples de se estabelecer esta variação consiste na determinação dos coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto. Conforme os resultados das coletas de dados realizada no Capítulo 3, pôde ser observado que a influência da temperatura na tensão de circuito aberto é preponderante em relação à influência na corrente de curto-circuito. Já a influência da irradiação é preponderante na corrente de curto-circuito (GOW & MANNING, 1999).

Para a determinação destes coeficientes foi adotado o seguinte procedimento, com base nas normas nacionais e internacionais investigadas no Capítulo 3:

1. Tratamento dos dados coletados no levantamento das curvas características realizado no Capítulo 3;
2. Escolha de dois conjuntos de curvas características nos extremos da faixa de variação da temperatura dos geradores fotovoltaicos;
3. Cálculo do coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto a partir das condições de ensaio;
4. Cálculo do coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito a partir das condições de ensaio;

Adotando o procedimento apresentado, foram escolhidos dois conjuntos de dados coletados no levantamento das curvas características, sendo o primeiro, no início do ensaio, ou seja, com baixa temperatura, e o segundo, ao final do ensaio, com temperatura superior. É interessante que se tenha um gradiente de temperatura grande, pois quanto maior o gradiente, mais preciso são os resultados (KING, 1997).

Caso ocorra uma variação significativa da irradiação, ou seja, maior que $\pm 1,0$ para a Condição Padrão Teste – CPT, os dados devem ser corrigidos conforme o procedimento e normas adotadas no Capítulo 3.

4.2.2 Técnicas de Estimação de Parâmetros

Para a estimação dos parâmetros foi utilizada a ferramenta de ajuste de curvas e de otimização do MATLAB® (OPTIMIZATION TOOLBOX, 2002) e um ajuste paramétrico, que consiste em encontrar os parâmetros dos modelos que melhor se ajustam aos dados coletados.

Os dados coletados podem ser considerados possuindo duas componentes, uma componente determinística e outra aleatória. A componente determinística é dada pelo ajuste e a componente aleatória é dada pelo erro associado aos dados. O ajuste é dado por um modelo, que é função da variável independente e de um ou mais parâmetros. O erro representa variações aleatórias nos dados que seguem uma distribuição probabilística específica. Variações sistemáticas podem ocorrer, mas são difíceis de quantificar.

O método utilizado no ajuste de curvas é o dos mínimos quadrados. O processo de ajuste requer um modelo que relaciona os dados coletados ao modelo e aos seus parâmetros. O resultado do processo, após minimização do erro, é a estimação dos parâmetros do modelo.

O método dos mínimos quadrados minimiza a soma quadrática dos resíduos. O resíduo para cada ponto de dado coletado é definido como a diferença entre o valor do dado coletado e o valor estimado, e é representado pela expressão a seguir:

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \quad [4.1]$$

em que

r_i = resíduo do dado i ;

y_i = dado real i ;

\hat{y}_i = dado estimado i .

A soma quadrática dos resíduos é dada por:

$$SQE = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad [4.2]$$

em que

n = número de pontos de dados;

SQE = soma quadrática dos erros estimados.

Um modelo linear é representado na forma de matrizes pela expressão a seguir:

$$y = X \beta + \varepsilon \quad [4.3]$$

em que

y = vetor de resposta $n \times 1$;

X = matriz do modelo $n \times m$;

β = vetor de parâmetros $m \times 1$;

ε = vetor de erros $n \times 1$.

Já um modelo não-linear é representado pela seguinte expressão:

$$y = f(X, \beta) + \varepsilon \quad [4.4]$$

em que

f = função de X e β ;

Para o caso de estimação de parâmetros de modelos não-lineares é utilizado um procedimento iterativo conhecido como o método dos mínimos quadrados não-linear, cujos passos são apresentados a seguir:

1. Determinação dos valores iniciais dos parâmetros do modelo não-linear, ou seja, condições iniciais;
2. Estimação dos parâmetros do modelo com os valores das condições iniciais dos parâmetros. A resposta da estimação é dada pela expressão a seguir:

$$\hat{y} = f(X, b) \quad [4.5]$$

Esta estimação consiste no cálculo do Jacobiano da expressão 4.5, acima, que é definido como a matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros a serem estimados;

3. Estimação dos parâmetros e avaliação da estimação. A estimação consiste no estabelecimento de uma nova direção e amplitude para o novo ajuste. Existem vários algoritmos de estimação de parâmetros de modelos não-lineares, entre eles: Região Confiável, Levenberg-Marquardt e Gauss-Newton;
4. O processo de estimação é iterativo (aproximação), retornando ao passo 2 até que o critério de convergência adotado seja satisfeito.

Os modelos não-lineares são geralmente muito sensíveis ao ponto de partida dos parâmetros, ou seja, estabelecimento de condições iniciais para convergência dos algoritmos utilizados. GOW e MANNING, destacam este ponto e equacionaram os valores iniciais dos parâmetros por meio dos valores da corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e das taxas de variação da curva característica tensão versus corrente (GOW & MANNING, 1999).

A avaliação da qualidade da estimação dos parâmetros dos modelos é realizada através dos resíduos, análise estatística e limites de confiança e predição. Neste trabalho foram utilizados na avaliação apenas os resíduos e a análise estatística.

Os resíduos da estimação de parâmetros de um modelo foram definidos na expressão [4.1]. A avaliação dos resíduos é feita com base em um padrão aleatório dos erros, em torno de zero. Se os resíduos possuem um padrão sistemático indica uma estimação pobre. Os parâmetros para a análise estatística da estimação são os seguintes:

1. Soma Quadrática dos Erros – SQE: é a soma quadrática dos resíduos e foi apresentada na expressão [4.2]. Um valor de SQE próximo de zero indica uma melhor estimação.
2. Quadrado dos Coeficientes de Correlação Múltipla – RQ: mede o sucesso da estimação ao refletir a variação dos dados. É o quadrado da correlação entre os valores medidos e estimados. É definido como a razão entre a Soma Quadrática da Regressão – SQR e a Soma Quadrática Total ou Soma Quadrática Sobre a Média – SQT. SQR e SQT são dadas pelas expressões a seguir, respectivamente:

$$SQR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad [4.6]$$

$$SQT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad [4.7]$$

em que

\bar{y} = vetor de resposta médio nx1;

SQR = soma quadrática da regressão;

SQT = soma quadrática total;

sendo:

$$SQT = SQR + SQE \quad [4.8]$$

e:

$$RQ = \frac{SQR}{SQT} = 1 - \frac{SQE}{SQT} \quad [4.9]$$

Valores de RQ estão na faixa de 0 a 1, sendo que um valor próximo de 1 indica uma melhor estimaco. Por exemplo, um valor igual a 0,9 significa que a estimaco explica 90% da variao total dos dados sobre a média.

3. Ajuste de RQ: o ajuste é feito com base nos graus de liberdade do resíduo, que é definido como o número de dados n menos o número de parâmetros a serem estimados m , sendo:

$$v = n - m \quad [4.10]$$

em que

n = número de dados;

m = número de parâmetros a serem estimados;

v = grau de liberdade do resíduo;

O valor v indica o número de partes independentes de informao envolvendo o número de pontos de dados n que so necessários para calcular a soma dos quadrados. O ajuste é dado pela equao a seguir:

$$ARQ = 1 - \frac{SQE (n - 1)}{SQT (v - 1)} \quad [4.11]$$

em que

ARQ = ajuste de RQ;

Um valor próximo de 1 indica uma melhor estimaco.

4. Raiz Quadrada Média do Erro – RQME: É o erro padro da estimaco ou erro padro da regresso, e é dado por:

$$RQME = SQE = \sqrt{EQM} \quad [4.12]$$

em que

RQME = raiz quadrada média do erro;

SQE = soma quadrática dos erros;

EQM = erro quadrático médio ou média quadrática do resíduo.

E é dada por:

$$EQM = \frac{SQE}{v} \quad [4.13]$$

Um valor de RQME próximo de zero indica uma melhor estimação.

4.2.2 Aplicação da Técnica de Estimação de Parâmetros ao Modelo

O modelo de geradores fotovoltaicos a ser adotado neste trabalho é o modelo composto da corrente foto-gerada, diodo de difusão e resistências série e paralela, Figura 2.1c, conforme a investigação da modelagem e resultados das simulações realizadas no Capítulo 2.

Para a estimação dos parâmetros do modelo desenvolvido foram utilizadas as seguintes expressões apresentadas anteriormente:

$$i = n_p I_L - n_p I_{01} \left(e^{\left(\frac{(v+iR_s)}{n_1 n_s v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{(v+iR_s)}{R_p} \right) \quad [4.14]$$

$$I_{CCa} + n_p I_{01} \left(e^{\left(\frac{(I_{CCa} R_s)}{n_1 n_s v_T} \right)} - 1 \right) + \left(\frac{(I_{CCa} R_s)}{R_p} \right) \quad [4.15]$$

$$I_L = \frac{\quad}{n_p}$$

$$0 = n_p I_L - n_p I_{01} \left(e^{\left(\frac{V_{CAa}}{n_1 n_s v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V_{CAa}}{R_p} \right) \quad [4.16]$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 = n_p I_L - n_p I_{01} \left(e^{\left(\frac{(V_M+I_M R_s)}{n_1 n_s v_T} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{(v+iR_s)}{R_p} \right) \quad [4.17]$$

$$+ V_M \left(-\frac{n_p I_{01}}{n_1 n_s v_T} e^{\left(\frac{(V_M+I_M R_s)}{n_1 n_s v_T} \right)} - \frac{1}{R_p} \right)$$

sendo:

$$I_{CCa} = \frac{n_p \cdot G \cdot I_{CC}}{1000} \quad [4.18]$$

$$R_S = \frac{n_{MS}}{n_{MP}} R_{SM} \quad [4.19]$$

$$R_p = \frac{n_{MP}}{n_{MS}} R_{PM} \quad [4.20]$$

$$I_{CCa} = I_L = I_{Lnom} (1 + K_0 (T_C - 300)) \quad [4.21]$$

$$I_{01} = K_1 T_C^3 e^{-\frac{V_g}{V_T}} \quad [4.22]$$

$$R_S = R_{Snom} [1 - K_3 (T_C - 300)] \quad [4.23]$$

$$R_P = R_{Pnom} e^{-K_4 T_C} \quad [4.24]$$

em que

- I_{CC} - corrente de curto-circuito - condição padrão de teste (A);
- I_{01} - corrente de saturação reversa - condição padrão de teste (A);
- I_{CCa} - corrente de curto-circuito (A);
- n_P - número de células em paralelo do gerador fotovoltaico;
- G - irradiação solar (W/m^2);
- i - corrente do gerador fotovoltaico (A);
- n_S - número de células em série do gerador fotovoltaico;
- n_1 - fator de idealidade do diodo de difusão;
- v - tensão do gerador fotovoltaico (V);
- V_{CAa} - tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico (V);
- p - potência do gerador fotovoltaico (W);
- V_M - tensão no ponto de máxima potência (V);
- I_M - corrente no ponto de máxima potência (A);
- P_M - potência no ponto de máxima potência (W);
- I_L - corrente foto-gerada (A);
- I_{Lnom} - corrente foto-gerada em condição padrão de teste (A);
- K_0 - coeficiente da corrente foto-gerada;
- K_1 - coeficiente da corrente de saturação reversa do diodo de difusão;
- T_C - temperatura da célula (K);
- V_g - tensão da banda proibida (V);

- n_{MS} - número de módulos em série do gerador;
- n_{MP} - número de módulos em paralelo do gerador;
- R_{SM} - resistência série do módulo (Ω);
- R_S - Resistência série do gerador (Ω);
- R_{Snom} - resistência série do gerador - condição padrão de teste (Ω);
- K_3 - coeficiente da resistência série do gerador;
- R_{PM} - resistência série do módulo (Ω);
- R_P - Resistência série do gerador (Ω);
- R_{Pnom} - resistência paralela do gerador - condição padrão de teste (Ω);
- K_4 - coeficiente da resistência paralela do gerador;

Reescrevendo a expressão [4.14], tem-se:

$$y = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\frac{x+y R_S}{b}} - 1 \right) - \left(\frac{(x + y R_S)}{R_P} \right) \quad [4.25]$$

em que

$$y = i \quad [4.26]$$

$$x = v \quad [4.27]$$

e

$$b = \frac{n_1 K T_c n_s}{q} \quad [4.28]$$

A expressão do modelo dada pela expressão [4.25] é transcendente. Desta forma utilizou-se uma aproximação para o termo exponencial contendo y . Desenvolveu-se o termo exponencial em Série de Taylor, como apresentado a seguir:

$$e^{\left(\frac{y R_S}{b}\right)} = 1 + \frac{y R_S}{b} + \frac{\left(\frac{y R_S}{b}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{y R_S}{b}\right)^3}{3!} + \dots + \frac{\left(\frac{y R_S}{b}\right)^{n-1}}{(n-1)!} + R_n \quad [4.29]$$

Onde R_n é o termo complementar que tende para zero quando n cresce arbitrariamente.

Considerando-se até o quarto termo da série, tem-se:

$$y = n_P I_L - n_P I_{01} \left(e^{\frac{x}{b}} Q - 1 \right) - \left(\frac{(x + y R_S)}{R_P} \right) \quad [4.30]$$

em que

$$Q = e^{\left(\frac{y R_S}{b} \right)} = 1 + \frac{y R_S}{b} + \frac{\left(\frac{y R_S}{b} \right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{y R_S}{b} \right)^3}{3!} \quad [4.31]$$

Resolvendo-se a expressão para y e considerando apenas a raiz real positiva, tem-se a nova expressão para o modelo. As expressões [4.30] e [4.31] descrevem o modelo cujos parâmetros I_L , I_{01} , R_S , R_P e b serão estimados a partir da coleta de dados realizada no Capítulo 3.

Considerando-se a outra abordagem para o modelo da Figura 2.1c, ou seja, em termos dos coeficientes de temperatura dos parâmetros, apresentada no Capítulo 2, têm-se:

$$i = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{(v+iR_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) - \left(\frac{(v + i R_S)}{R_P} \right) \quad [4.32]$$

$$I_L = \frac{I_{CCa} + \left(\frac{I_{CCa} R_S}{R_P} \right)}{n_P - n_P \left(e^{\frac{I_{CCa} R_S}{n_1 n_S v_T}} - 1 \right) \div \left(e^{V_{CAa1}} - 1 \right)} \quad [4.33]$$

$$I_{01} = \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) \quad [4.34]$$

$$V_{CAa1} = \left(V_{CAR} + K T_{V_{CAR}} (T_C - T_R) + \left(\left(\frac{K T_C}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{CCa}}{I_{CC}} \right) \right) \right) \frac{q}{n_1 n_S K T_C} \quad [4.35]$$

$$0 = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{V_{CAa}}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) - \left(\frac{V_{CAa}}{R_P} \right) \quad [4.36]$$

$$\frac{dp}{dv} = 0 = n_P I_L - n_P \left(e^{\left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{n_1 n_S v_T} \right)} - 1 \right) \left(\frac{I_L}{e^{V_{CAa1}} - 1} \right) - \left(\frac{(V_M + I_M R_S)}{R_P} \right) \quad [4.37]$$

$$+ V_M \left(- \left(\frac{n_P I_L e^{\left(\frac{V_M + I_M R_S}{n_1 n_S v_T} \right)}}{n_1 n_S v_T (e^{V_{CAa1}} - 1)} \right) - \frac{1}{R_P} \right)$$

em que

$$T_C = T_{AMB} + \left(\frac{G (NOCT - 20)}{800} \right) + 273,15 \quad [4.38]$$

$$I_{CCa} = \left(\frac{n_P G}{1000} \right) (I_{CCR} + (KT_{ICCR} (T_C - T_R))) \quad [4.39]$$

$$V_{CAa} = V_{CAR} + KT_{VCAR} (T_C - T_R) + \left(\frac{K T_C}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{CCa}}{I_{CCR}} \right) \quad [4.40]$$

e

T_{AMB} - temperatura ambiente (°C);

$TONC$ - temperatura de operação nominal da célula (°C);

KT_{ICCR} - coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito (A/°C);

KT_{VCAR} - coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto (V/°C);

I_{CCR} - corrente de curto-circuito na condição padrão de teste (A);

V_{CAR} - tensão de circuito aberto na condição padrão de teste (V);

T_R - temperatura na condição padrão de teste (°C);

A expressão do novo modelo é dada por:

$$y = a - \frac{a}{(e^b - 1)} \left(e^{\frac{x}{c}} Q - 1 \right) - \left(\frac{(x + y R_S)}{R_P} \right) \quad [4.41]$$

em que

$$a = n_p I_L \quad [4.42]$$

$$b = V_{CAa1} \quad [4.43]$$

e

$$c = \frac{n_1 K T_C n_S}{q} \quad [4.44]$$

$$Q = e^{\left(\frac{y R_s}{c}\right)} = 1 + \frac{y R_s}{c} + \frac{\left(\frac{y R_s}{c}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{y R_s}{c}\right)^3}{3!} \quad [4.45]$$

Resolvendo-se a expressão [4.41] para y e considerando-se apenas a raiz real positiva, tem-se a nova expressão para o modelo. A expressão [4.41] descreve o modelo cujos parâmetros a , b , c , R_s e R_p serão estimados a partir da coleta de dados realizada no Capítulo 3.

Com a aplicação ao modelo da técnica de estimação de parâmetros investigada, foi avaliada a qualidade da estimação por meio dos resíduos e análise estatística. Finalmente, para validação do estudo os resultados da estimação foram comparados com os ensaios realizados, dados do fabricante e ensaios realizados em laboratórios nacionais e internacionais.

Com os resultados deste estudo foi definido o modelo a ser implementado na simulação do conversor eletrônico com seguidor de potência máxima.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Determinação dos Coeficientes de Temperatura

Conforme o procedimento apresentado para a determinação dos coeficientes de temperatura, foram escolhidos os dois conjuntos de dados coletados no levantamento das curvas características, sendo eles: conjuntos de dados coletados com 60 segundos de ensaio – M60 e com 570 segundos de ensaio – M570. O Quadro 4.1 apresenta as condições em que foram realizados os ensaios, o Quadro 4.2 apresenta os dois conjuntos de dados com os parâmetros do Gerador Padrão – GP e do Gerador Sob Ensaio – GSE e as Figuras 4.1 a 4.8 apresentam as curvas características tensão versus corrente e tensão versus potência para os conjuntos de dados M60 e M570 do GP e GSE, respectivamente.

A irradiação global inclinada média durante todo o ensaio foi de 1035 W/m², com uma variação menor que $\pm 1,0\%$, como visto no Capítulo 3. A irradiação global inclinada para o conjunto de dados M60 foi de 1042,3 W/m². Considerando-se linear a variação da irradiação com a corrente e desprezando-se a influência na tensão, já que a variação na irradiação é menor que $\pm 1,0\%$, foi realizada a correção dos dados de corrente no conjunto de dados M60 para o nível de irradiação de 1035 W/m². O Quadro 4.3 apresenta o conjunto de dados M60 corrigido e as Figuras 4.9 a 4.12 apresentam as curvas características tensão versus corrente e tensão versus potência para o conjunto de dados M60 corrigido.

Quadro 4.1 Condições de ensaio.

Condições de Ensaio	M60	M570
Irradiação global inclinada (W/m ²)	1042,3	1035
Irradiação global horizontal (W/m ²)	735,8	761,1
Irradiação direta normal (W/m ²)	868,5	829,7
Velocidade do vento (m/s)	0,8	0,8
Direção do vento (graus)	79	72
Temperatura ambiente (°C)	26,4	27,1
Umidade relativa (%)	68	64

Quadro 4.2 Parâmetros dos geradores.

Parâmetros	M60		M570	
	GP	GSE	GP	GSE
Temperatura do gerador (°C)	40,27	40,54	49,40	49,97
Tensão de circuito aberto (V)	20,898	20,742	20,0	19,824
Corrente de curto-circuito (A)	3,498	3,495	3,498	3,495
Potência máxima (W)	53,310	54,125	50,239	51,385
Tensão no ponto de potência máxima (V)	16,758	17,051	15,625	16,328
Corrente no ponto de potência máxima (A)	3,181	3,174	3,215	3,147
Fator de forma	0,729	0,746	0,718	0,741
Eficiência (%)	14,21	14,425	13,389	13,694

Quadro 4.3 Parâmetros corrigidos.

Parâmetros	M60	
	GP	GSE
Temperatura do gerador (°C)	40,27	40,54
Tensão de circuito aberto (V)	20,898	20,742
Corrente de curto-circuito (A)	3,474	3,471
Potência máxima (W)	52,936	53,746
Tensão no ponto de potência máxima (V)	16,758	17,050
Corrente no ponto de potência máxima (A)	3,159	3,152
Fator de forma	0,729	0,747
Eficiência (%)	14,108	14,323

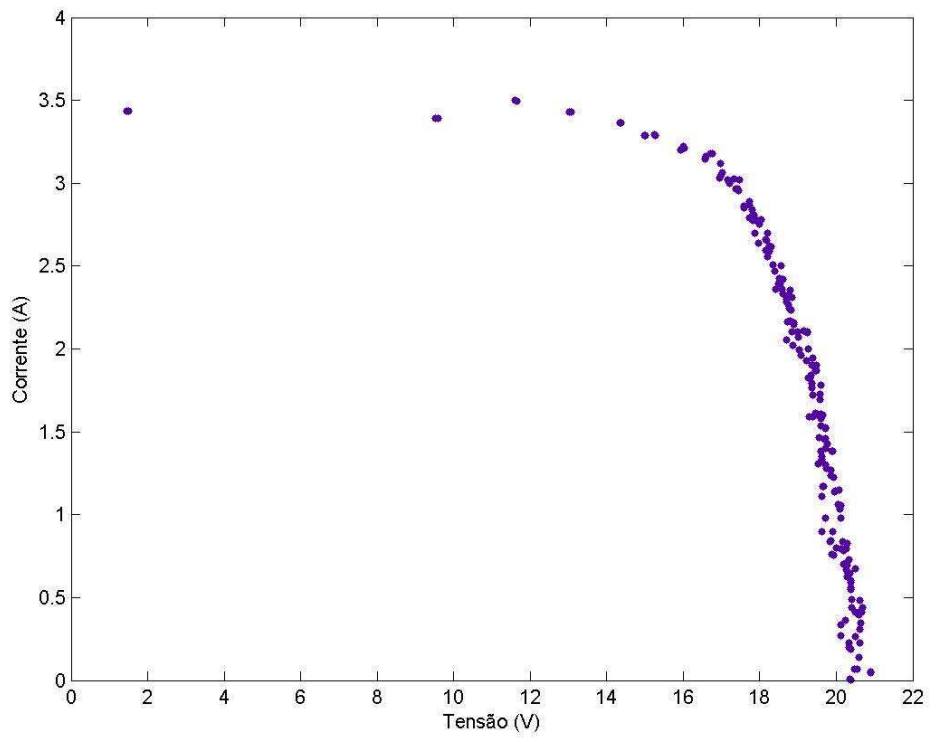


Figura 4.1 Conjunto de dados tensão – corrente M60 – GP.

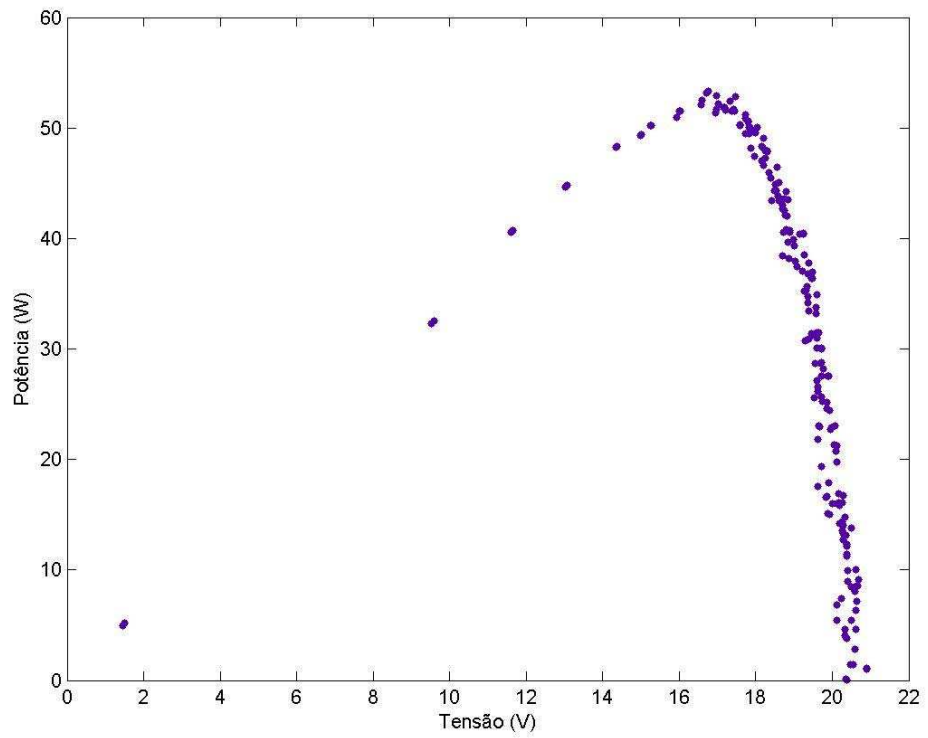


Figura 4.2 Conjunto de dados tensão – potência M60 - GP.

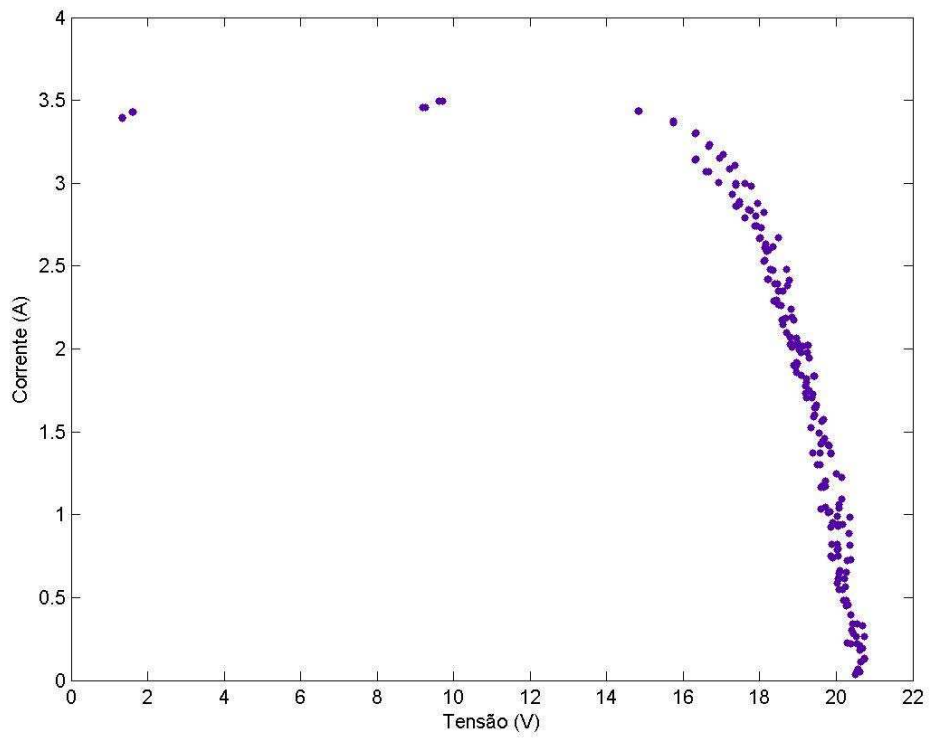


Figura 4.3 Conjunto de dados tensão – corrente M60 - GSE.

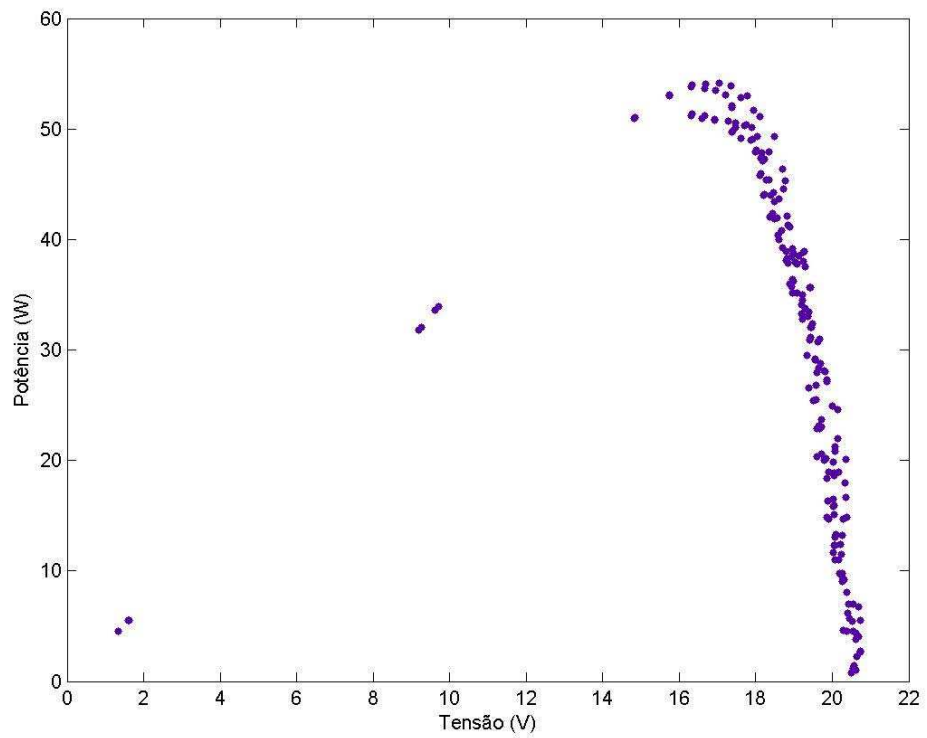


Figura 4.4 Conjunto de dados tensão – potência M60 – GSE.

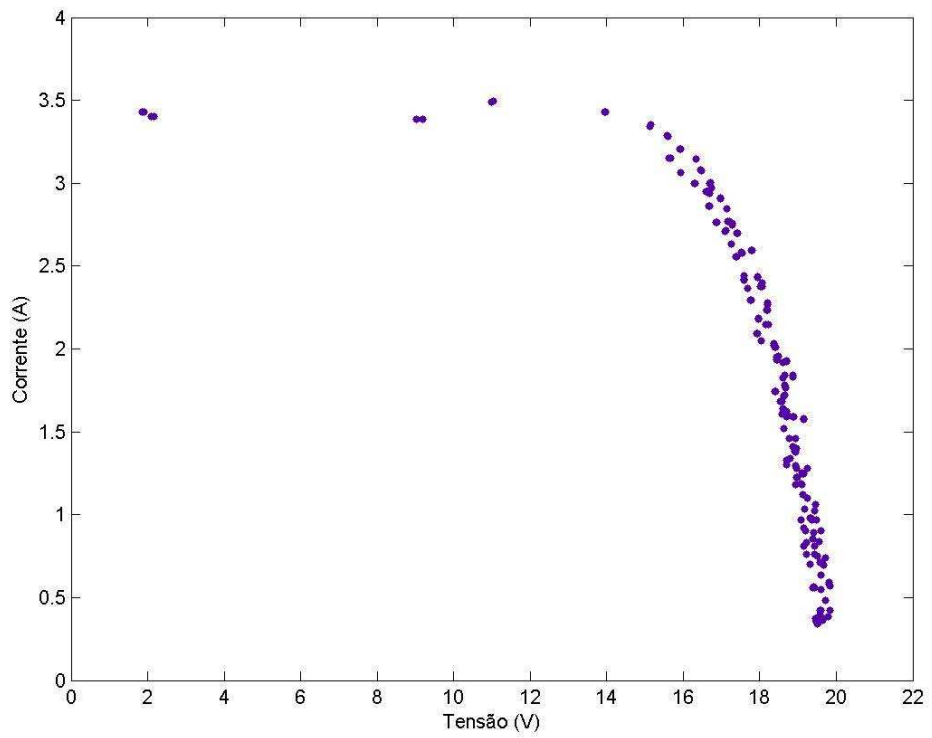


Figura 4.5 Conjunto de dados tensão – corrente M570 - GP.

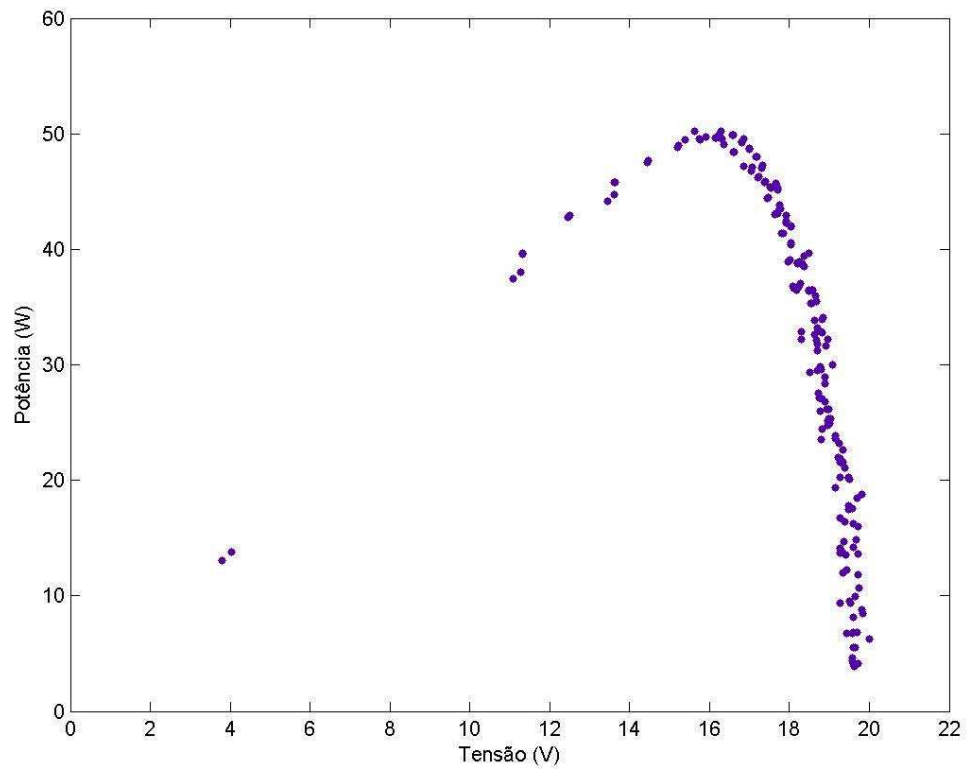


Figura 4.6 Conjunto de dados tensão – potência M570 - GP.

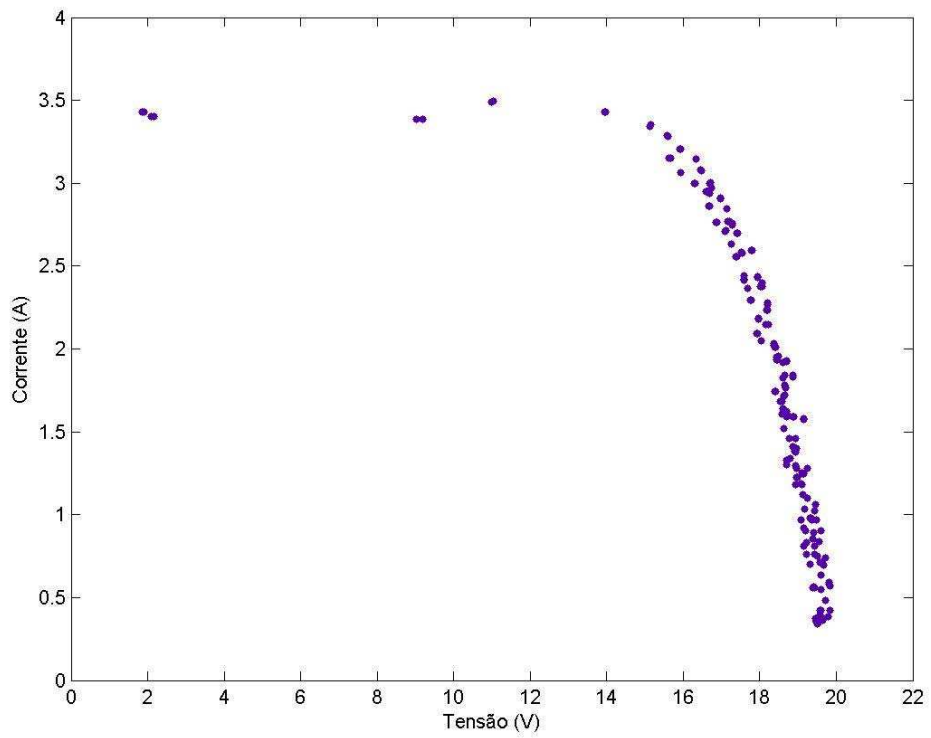


Figura 4.7 Conjunto de dados tensão – corrente M570 - GSE.

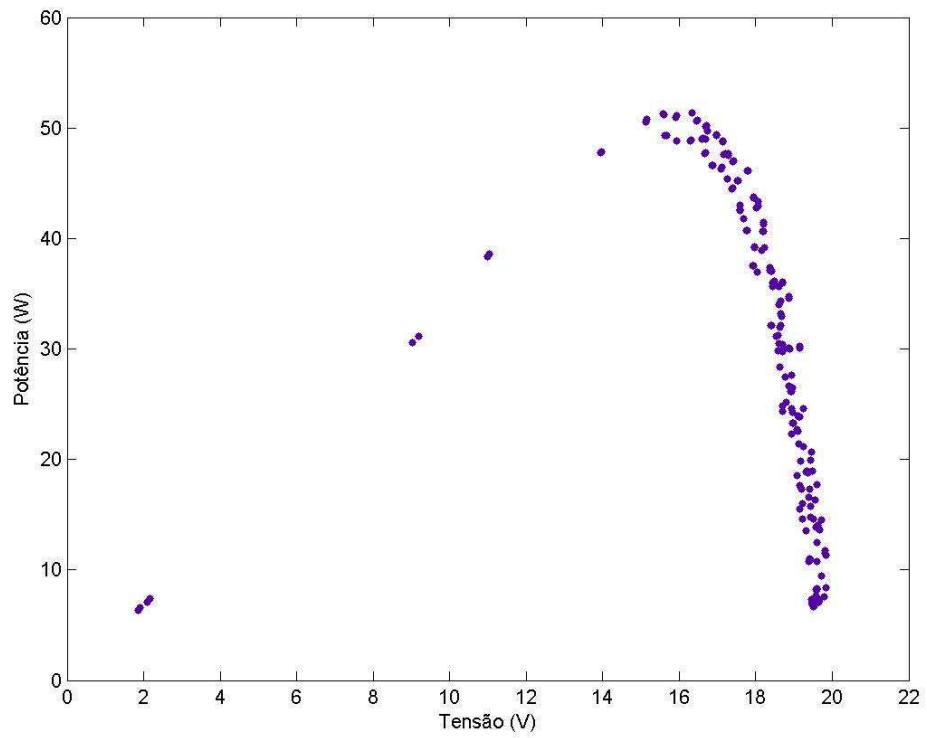


Figura 4.8 Conjunto de dados tensão – potência M570 – GSE.

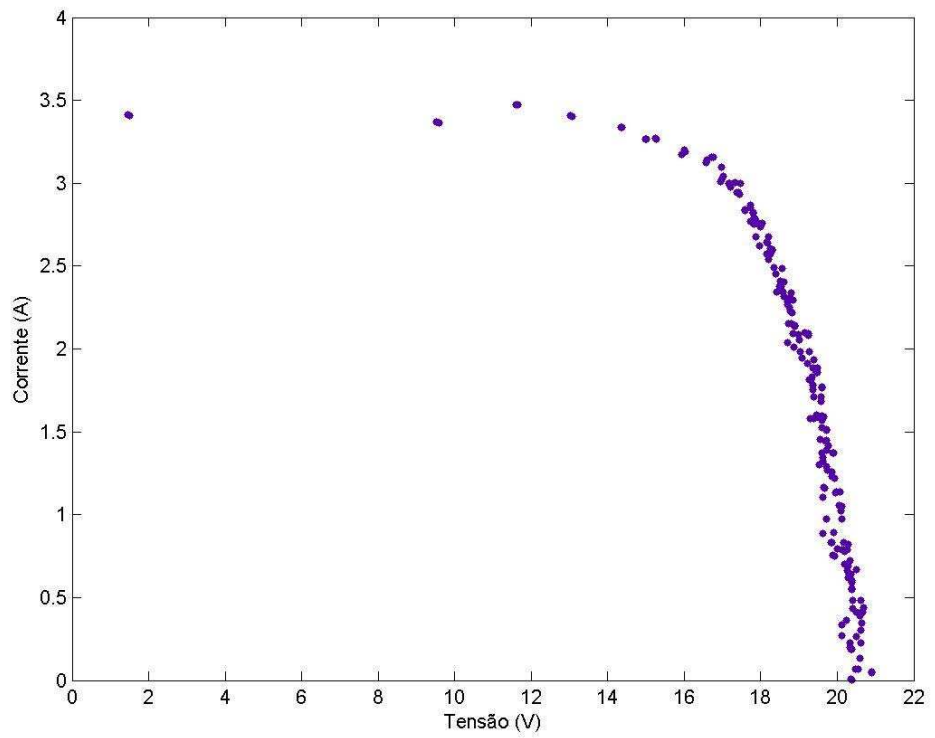


Figura 4.9 Conjunto de dados corrigidos tensão – corrente M60 – GP.

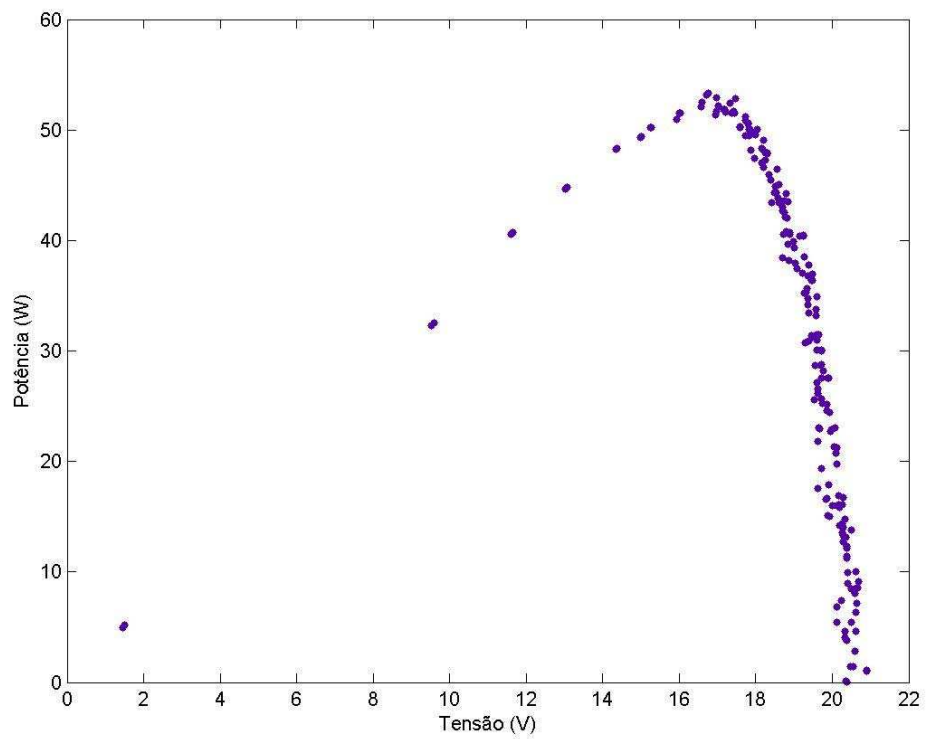


Figura 4.10 Conjunto de dados corrigidos tensão – potência M60 – GP.

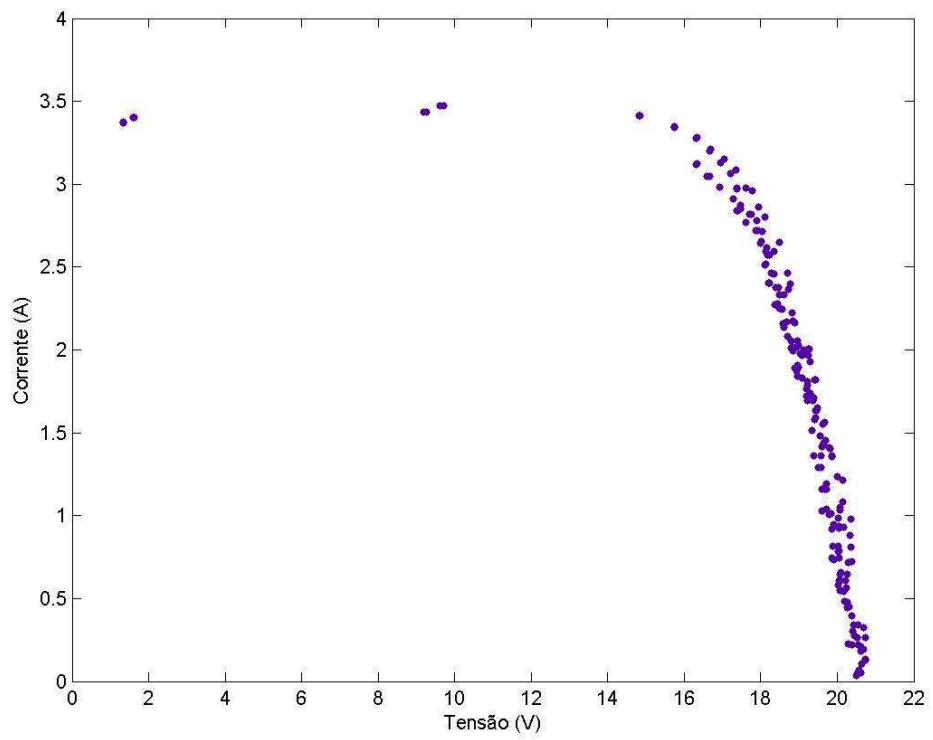


Figura 4.11 Conjunto de dados corrigidos tensão – corrente M60 – GSE.

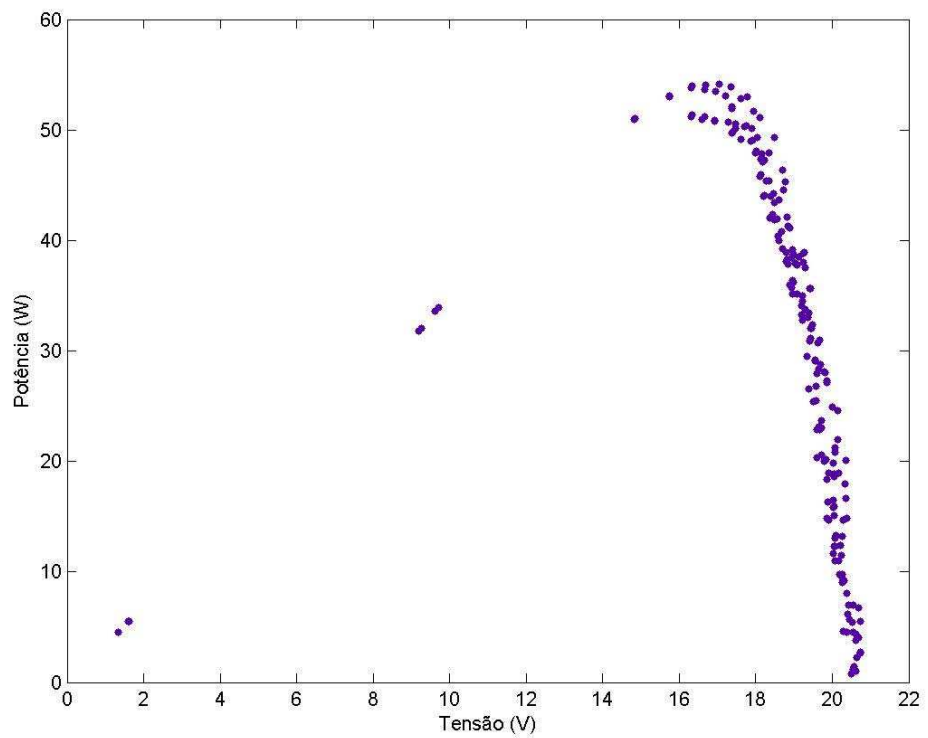


Figura 4.12 Conjunto de dados corrigidos tensão – potência M60 – GSE.

A partir dos conjuntos de dados M60 corrigido e M570 foram calculados os coeficientes de temperatura da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito para o GP e GSE. Os resultados são apresentados a seguir.

Para o gerador padrão:

$$KT_{VCA_{PADRÃO}} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{20,000 - 20,898}{49,40 - 40,27} = -0,0983 \text{ V/}^\circ\text{C} \quad [4.46]$$

$$KT_{ICC_{PADRÃO}} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{3,498 - 3,474}{49,40 - 40,27} = 0,0026 \text{ A/}^\circ\text{C} \quad [4.47]$$

Para o gerador sob ensaio:

$$KT_{VCA_{ENSAIO}} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{19,824 - 20,742}{49,97 - 40,54} = -0,0973 \text{ V/}^\circ\text{C} \quad [4.48]$$

$$KT_{ICC_{ENSAIO}} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{3,495 - 3,471}{49,97 - 40,54} = 0,0025 \text{ A/}^\circ\text{C} \quad [4.49]$$

A variação percentual para os coeficientes de temperatura da tensão de circuito aberto do GP e GSE em relação ao valor médio foi menor que $\pm 0,5\%$ e para os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito foi menor que $\pm 2,0\%$. Estes resultados demonstram a maior influência da temperatura na tensão de circuito aberto.

4.3.2 Estimação de Parâmetros do Modelo

São apresentados a seguir os resultados da aplicação do método dos mínimos quadrados não linear nos conjuntos de dados M60 e M570 do GP e GSE utilizando o modelo que incorpora a corrente foto-gerada, diodo de difusão e resistências série e paralela (Figura 2.1c). Os algoritmos de otimização utilizados para a minimização do erro foram os de Levenberg-Marquand e região confiável – Trust Region.

As Figuras 4.13 a 4.16 apresentam os resultados obtidos e os resíduos da aplicação do método para o GP e GSE e para os conjuntos de dados M60 e M570, respectivamente. Como se pode observar os resíduos possuem uma disposição aleatória em torno do zero, indicando uma boa qualidade da

estimação realizada. A variação que ocorre ao final, não indica uma tendência e é devida a duplicidade de pontos na coleta de dados.

O Quadro 4.4 apresenta os resultados da estimação de parâmetros com os valores dos parâmetros estimados e os resultados estatísticos com 95% de limites de confiança para os conjuntos de dados M60 e M570 de GP e GSE.

Os resultados estatísticos da estimação indicam uma boa qualidade da estimação realizada, ou seja, RQ e ARQ próximo de 1. Já os valores de SQE e RQME não próximos de zero são devidos à duplicidade de pontos no levantamento das curvas características.

Para a análise dos parâmetros do Quadro 4.4 deve ser observada a diferença de temperatura dos conjuntos de dados M60 e M570. Conforme o Quadro 4.2, para o conjunto de dados M60 a temperatura no GP é de 40,27 °C e no GSE é de 40,54 °C e para o conjunto de dados M570 a temperatura no GP é de 49,40 °C e no GSE é de 49,97 °C. Como os dados já foram corrigidos em relação à irradiação quando do cálculo dos coeficientes de temperatura, os dois conjuntos de dados M60 e M570 trabalham com nível de irradiação global inclinada de 1.035 W/m².

Conforme o Quadro 4.4, a maior discrepância encontrada nos parâmetros foi em relação à resistência paralela do GP e GSE. Esta discrepância pode ser explicada devido à pequena influência da resistência paralela no modelo, ou seja, baixa sensibilidade do modelo à resistência paralela e devido ao algoritmo utilizado para a estimação de parâmetros, que é sensível às condições iniciais impostas aos parâmetros.

Foram realizadas estimacões para diversos conjuntos de dados: M60, M150, M300, M450 e M570. A partir dos resultados da estimação dos parâmetros, foi desenvolvido um programa no Matlab para tratamento dos dados obtidos. O tratamento de dados consistiu na utilização dos coeficientes de temperaturas e dos parâmetros estimados para a translação dos parâmetros para a Condição Padrão de Teste – CPT. Os resultados da translação são apresentados no Quadro 4.5. Os parâmetros obtidos com o tratamento dos dados são utilizados na simulação do gerador fotovoltaico e comparados com ensaios realizados em laboratórios nacionais e internacionais para a validação dos procedimentos de testes e do modelo utilizado.

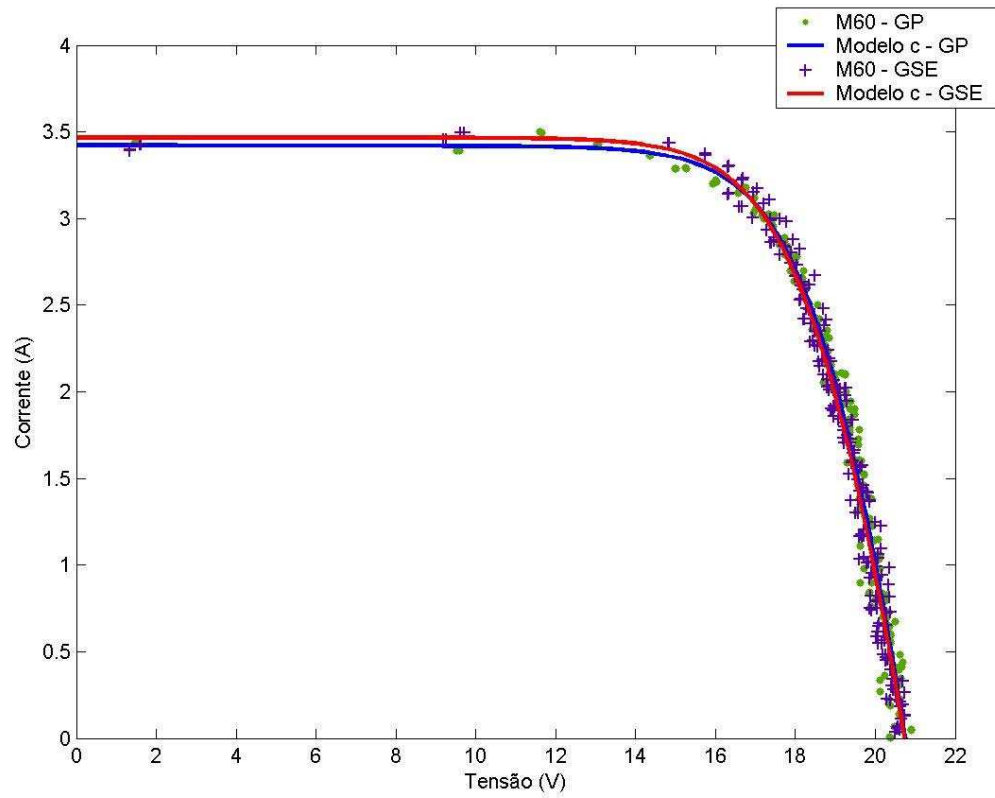


Figura 4.13 Modelo c estimado para o conjunto de dado M60 de GP e GSE.

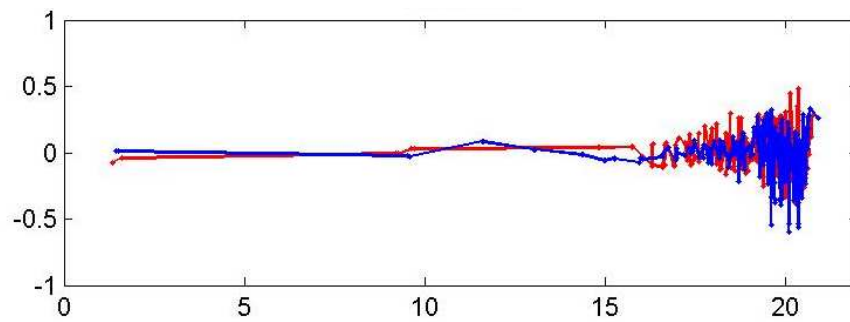


Figura 4.14 Resíduos do modelo c estimado para o conjunto de dado M60 de GP e GSE.

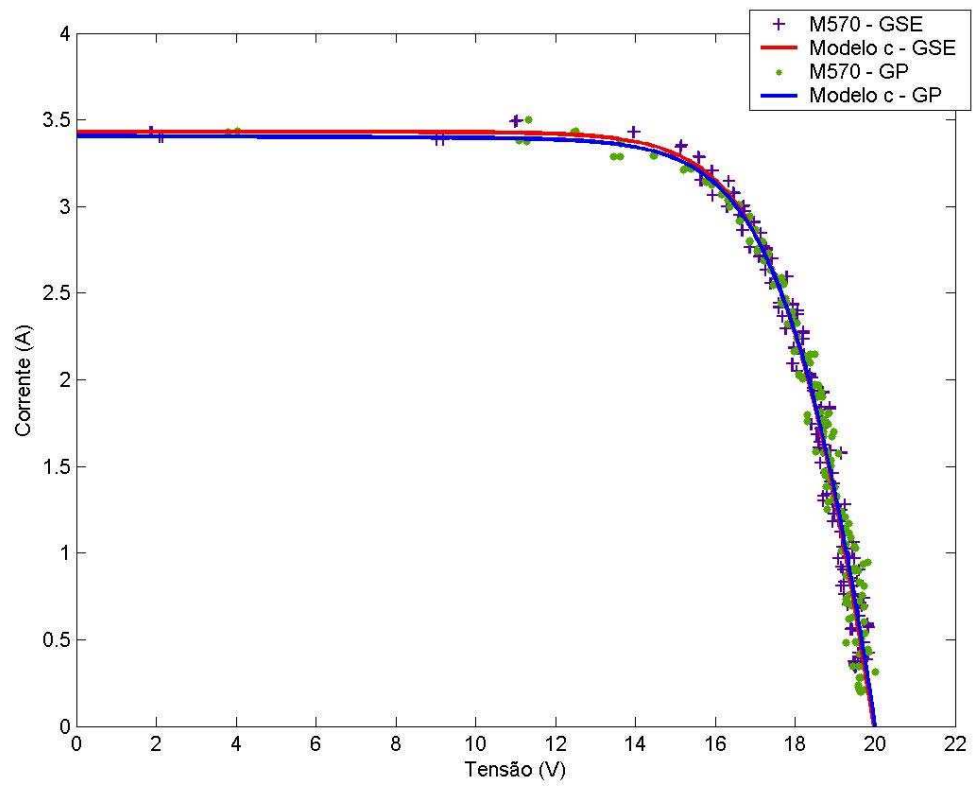


Figura 4.15 Modelo c estimado para o conjunto de dado M570 de GP e GSE..

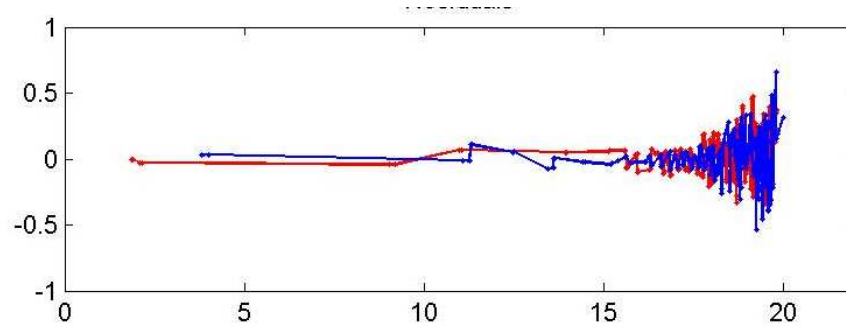


Figura 4.16 Resíduos do modelo c estimado para o conjunto de dado M570 de GP e GSE.

Quadro 4.4 Resultados da estimação de parâmetros.

Parâmetros	M60		M570	
	GP	GSE	GP	GSE
Corrente foto-gerada - I_L (A)	3,42	3,47	3,40	3,43
Corrente de saturação reversa - I_{01} (A)	$7,8 \times 10^{-8}$	$7,3 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-7}$
Resistência paralela - R_P (Ω)	2922	8125	1118	7341
Resistência série - R_S (Ω)	0,34	0,38	0,30	0,30
Fator de idealidade do diodo de difusão - n_1	1,2	1,2	1,19	1,2
Soma quadrática dos erros - SQE	5,9	4,9	6,6	6,0
Quadrado dos coeficientes de correlação múltipla - RQ	0,97	0,98	0,97	0,97
Ajuste de RQ - ARQ	0,97	0,97	0,97	0,97
Raiz quadrada média do erro - RQME	0,17	0,16	0,18	0,17

Quadro 4.5 Translação dos dados para a Condição Padrão de Teste - CPT.

Parâmetros	GP	GSE
Corrente de curto-circuito em CPT - I_{CCR} (A)	3,24	3,27
Tensão de circuito aberto em CPT - V_{CAR} (V)	22,5	22,5
Corrente de saturação reversa - I_{01} (A)	$18,8 \times 10^{-9}$	$19,5 \times 10^{-9}$
Resistência paralela - R_P (Ω)	1720	8869
Resistência série - R_S (Ω)	0,32	0,35
Fator de idealidade do diodo de difusão - n_1	1,19	1,18
Coefficiente de temperatura da corrente de curto-circuito - $K_{T_{CCR}}$ ($A/^\circ C$)	0,0026	0,0025
Coefficiente de temperatura da tensão de circuito aberto - $K_{T_{V_{CAR}}}$ ($V/^\circ C$);	-0,098	-0,097
Temperatura de operação nominal da célula - TONC	35,0	36,0

4.3.3 Validação do Estudo

Com a determinação dos coeficientes de temperatura, estimação e translação dos parâmetros foi possível a caracterização dos geradores fotovoltaicos. Os resultados foram levados ao modelo e simulados. Os resultados da simulação para o GP e GSE e as curvas do fabricante digitalizadas são apresentados nas Figuras 4.17 a 4.20.

Os Quadros 4.4 a 4.7 apresentam os percentuais de erros para a corrente de curto-circuito e para a tensão de circuito aberto do estudo comparativo entre o modelo obtido para o GP e para o GSE e as curvas do fabricante, respectivamente.

Pode ser observado na Figura 4.17 e no Quadro 4.6 que os erros percentuais máximos para a corrente de curto-circuito e para a tensão de circuito aberto para o GP foram de 5,57% e 1,86%, respectivamente. O erro máximo para a corrente de curto-circuito ocorreu para baixos níveis de irradiação, no caso 200 W/m², enquanto o erro máximo para a tensão de circuito aberto ocorreu para altos níveis de irradiação, no caso, 1.000 W/m². Pode ser observado, também, na Figura 4.18 e no Quadro 4.7, que os erros percentuais máximos foram iguais a 4,38% e 5,83%. Estes ocorreram para um nível de temperatura de 25 °C.

Para o GSE, Figura 4.19 e Quadro 4.8, os erros percentuais máximos para a corrente de curto-circuito e para a tensão de circuito aberto foram de 6,68% e 3,70%, respectivamente. Os erros máximos da corrente e da tensão acompanharam os níveis de irradiação obtidos com o GP. Observando a Figura 4.20 e o Quadro 4.9, os erros percentuais máximos foram iguais a 5,48% e 5,36%, ocorrendo, também, para uma temperatura de 25 °C.

Os erros percentuais obtidos do estudo comparativo da caracterização do GP e GSE com as curvas características digitalizadas do fabricante foram bem inferiores quando comparados com a margem de erro especificado pelo fabricante, que é de $\pm 10\%$. Estes resultados permitem a validação do procedimento utilizado no levantamento das curvas características e da metodologia utilizada na estimação e translação de parâmetros dos geradores fotovoltaicos.

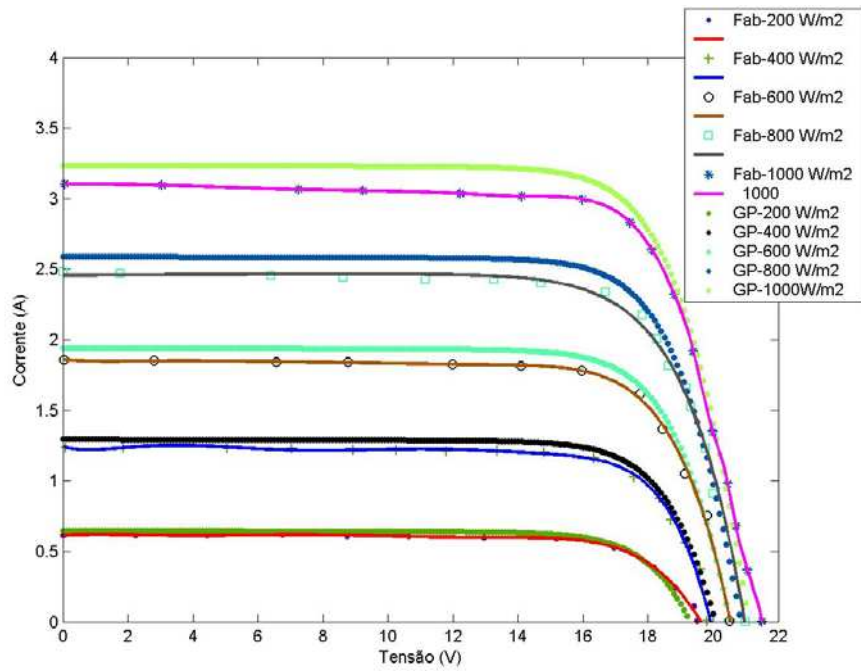
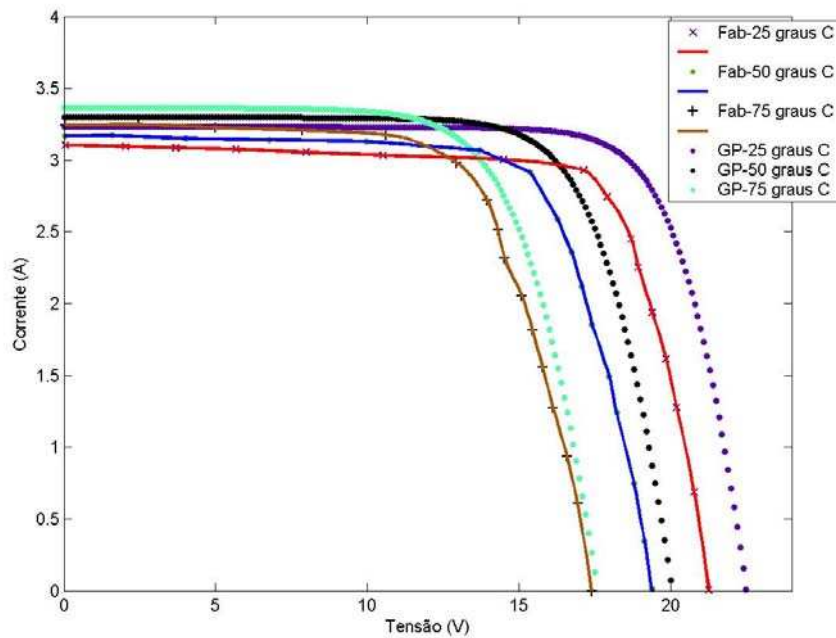


Figura 4.17 Curvas características tensão - corrente do GP e do fabricante parametrizadas em função da irradiação e para uma temperatura de 25 °C.



.Figura 4.18 Curvas características tensão - corrente do GP e do fabricante parametrizadas em função da temperatura e para uma irradiação de 1.000 W/m².

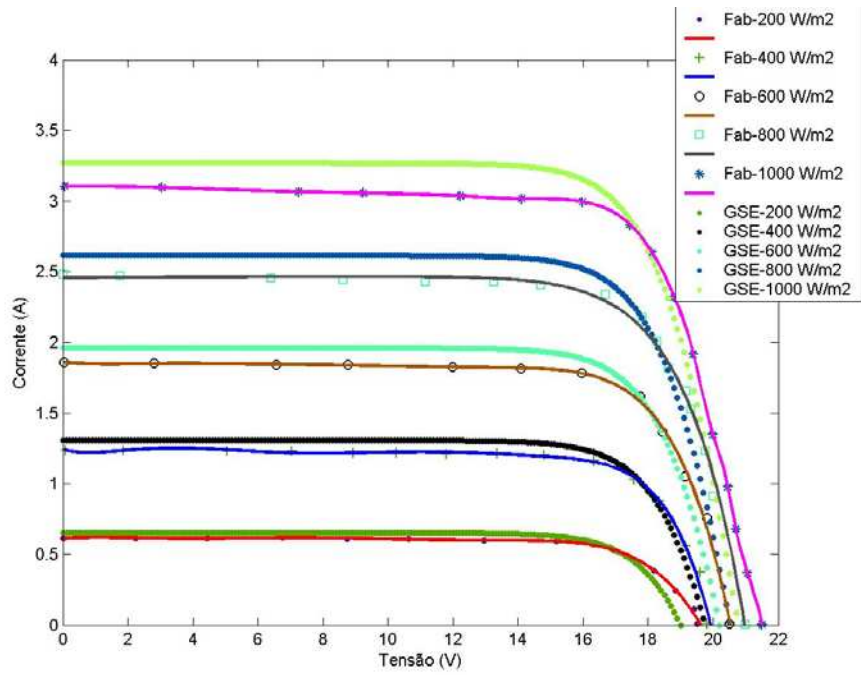


Figura 4.19 Curvas características tensão - corrente do GSE e do fabricante parametrizadas em função da irradiação e para uma temperatura de 25 °C.

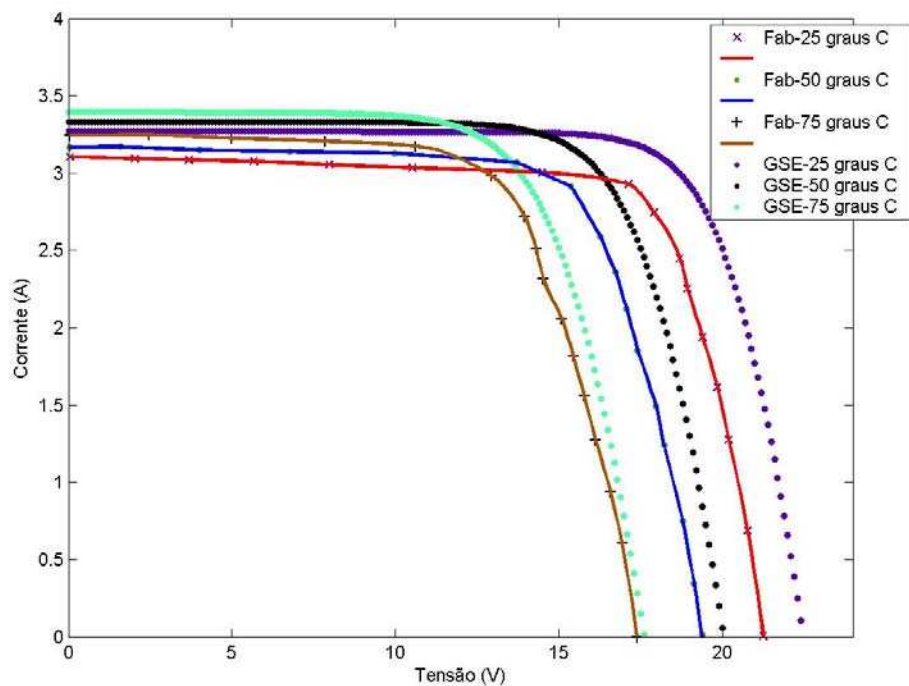


Figura 4.20 Curvas características tensão - corrente do GSE e do fabricante parametrizadas em função da temperatura e para uma irradiação de 1.000 W/m².

Quadro 4.6 Análise de Erro 1 – GP.

Irradiação	Percentual de erro %	Percentual de erro %
W/m²	Corrente curto-circuito	Tensão circuito aberto
1000	4,38	1,86
800	4,34	0,95
600	4,44	0,00
400	4,72	1,51
200	5,57	1,02

Quadro 4.7 Análise de Erro 2 – GP.

Temperatura	Percentual de erro %	Percentual de erro %
°C	Corrente curto-circuito	Tensão circuito aberto
25	4,38	5,83
50	4,10	3,17
75	3,7	1,13

Quadro 4.8 Análise de Erro 1 – GSE.

Irradiação	Percentual de erro %	Percentual de erro %
W/m²	Corrente curto-circuito	Tensão circuito aberto
1000	5,34	3,70
800	5,43	2,30
600	5,53	1,46
400	5,80	0,50
200	6,68	2,56

Quadro 4.9 Análise de Erro 2 – GSE.

Temperatura	Percentual de erro %	Percentual de erro %
°C	Corrente curto-circuito	Tensão circuito aberto
25	5,48	5,36
50	5,12	3,17
75	4,58	1,13

Um estudo comparativo final foi implementado em relação a ensaios realizados pelo fabricante, pelo Centro de Pesquisa em Engenharia Elétrica – CEPEL, da ELETROBRÁS e pelo Laboratório de Energias Renováveis dos Estados Unidos da América – NREL. Os resultados dos ensaios do fabricante foram obtidos a partir de dados do gerador fotovoltaico fornecidos pelo fabricante. Os ensaios do CEPEL foram realizados em uma amostra de um lote de geradores fotovoltaicos fornecidos à CEMIG. Os ensaios do NREL foram realizados em um gerador fotovoltaico que o fornecedor definiu como gerador padrão. Este gerador fotovoltaico é o mesmo que foi utilizado como referência, ou seja, gerador padrão nos ensaios realizados neste trabalho.

O CEPEL realizou ensaios externos em apenas uma amostra. O NREL realizou ensaios internos e externos no GP. Nos ensaios internos realizados pelo NREL foram utilizados dois tipos de simuladores solares: pulsado e contínuo. O simulador solar pulsado consiste do Simulador Spire 240A que utiliza uma lâmpada de Xenon de arco longo que é pulsada em uma frequência máxima de 15 Hz, sendo filtrada para simular o espectro global de referência, possuindo uma irradiação com uniformidade espacial de $\pm 3\%$ em uma área de 61 cm por 122 cm.

Para a realização do ensaio a lâmpada é pulsada aproximadamente 200 vezes e a cada pulso é realizada a leitura de tensão, corrente e temperatura. A resolução e limites de tensão e corrente são iguais a 0,1 mV a 100 V e 0,5 mA a 20 A, respectivamente.

O simulador solar contínuo consiste do Simulador Spectrolab X200 que utiliza uma lâmpada de Xenon de arco curto de 20 kW, sendo filtrada para simular o espectro global de referência, possuindo uma irradiação com uniformidade espacial de $\pm 3\%$ em uma área de 152 cm por 122 cm. A resolução e limites de tensão e corrente são iguais a 5 μ V a ± 300 V e $\pm 1,0$ μ A a ± 60 A, respectivamente. Nos ensaios externos realizados pelo NREL foi utilizado um sistema de medição externa padrão. O sistema permite ensaios sob céu limpo, com a irradiação entre 950 e 1050 W/m^2 e temperatura próxima de 25 °C. São utilizados um piranômetro e uma célula de referência de silício para determinar a irradiação global e um espectrômetro para determinar o conteúdo espectral da irradiação entre 350 e 1.100 nm. Um rastreador solar permite o correto posicionamento do sistema e os dados meteorológicos são

monitorados durante o ensaio. A resolução e limites de tensão e corrente são iguais a 5 μ V a ± 300 V e $\pm 1,0$ μ A a ± 60 A, respectivamente.

Os resultados do estudo comparativo são apresentados nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23 para o GP e nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26 para o GSE. As Figuras 4.21 e 4.24 apresentam as curvas características dos ensaios externos realizados pelo NREL e as curvas características do fabricante e do GP e do GSE, respectivamente. As Figuras 4.22 e 4.25 apresentam as curvas características dos ensaios internos realizados pelo NREL e as curvas características do fabricante e do GP e do GSE, respectivamente. Já as Figuras 4.23 e 4.26 apresentam as curvas características dos ensaios externos realizados pelo CEPEL e as curvas características do fabricante e do GP e do GSE, respectivamente.

O Quadro 4.10 apresenta as condições de ensaios e os principais parâmetros para os diversos ensaios realizados. Devido às condições de ensaio, os percentuais de erro que podem ser avaliados são apenas para o ensaio externo do GP realizado e os ensaios internos realizados pelo NREL. O Quadro 4.11 apresenta a análise de erros para estes ensaios.

Alguns pontos em relações aos ensaios apresentados no Quadro 4.10 são destacados a seguir:

1. A área do gerador utilizada para o cálculo da eficiência é diferenciada para os diversos ensaios. A área considerada neste trabalho foi apenas a área das células. Desta forma, a eficiência para os diversos ensaios varia na faixa de 13,1% a 15,0%;
2. Com a translação dos dados para a temperatura de 25 °C nos ensaios realizados neste trabalho, apenas os ensaio internos realizados no NREL e do fabricante podem ser comparados. Esta comparação é realizada no Quadro 4.11. Os ensaios externos realizados no NREL apresentam uma temperatura do gerador por volta de 15 °C
3. Apesar dos resultados apresentados não tratarem de um ensaio interlaboratorial, com condições controladas em todas as suas etapas, deve-se destacar a sua importância, pois os resultados obtidos são de ótima qualidade.

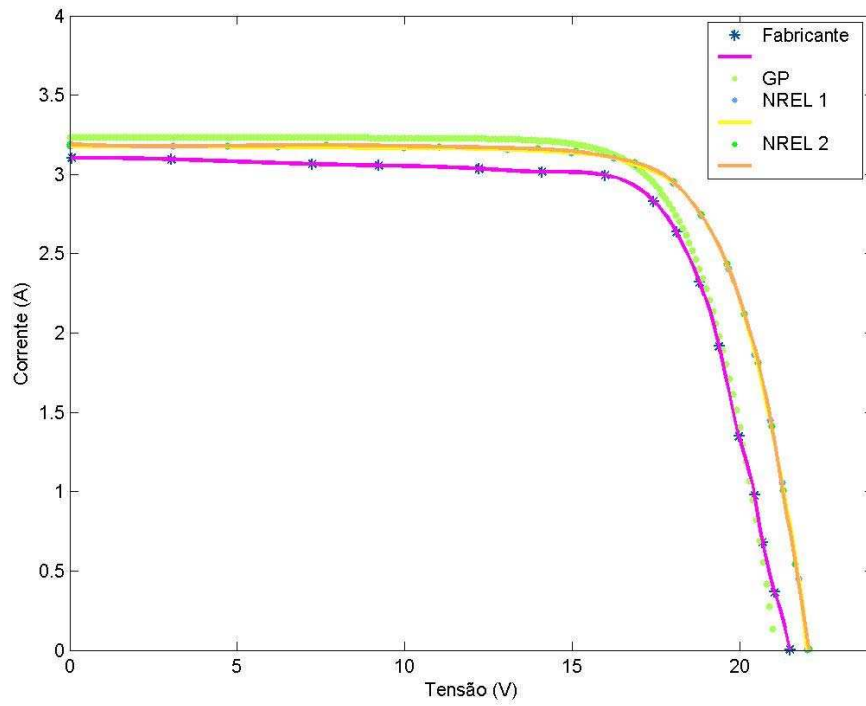


Figura 4.21 Curvas características do fabricante, do GP e de dois ensaios externos realizados no NREL para o GP.

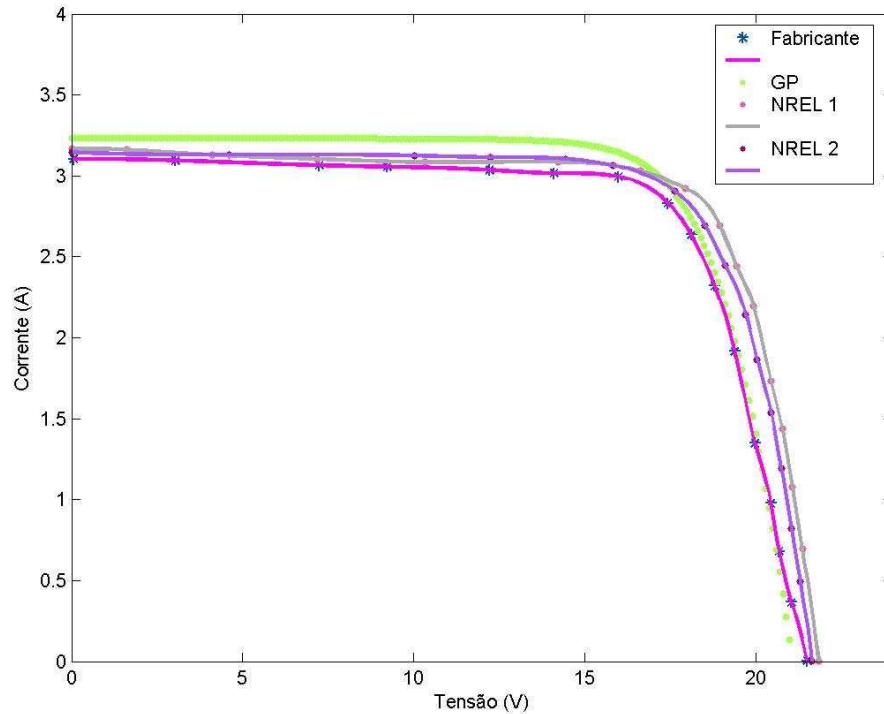


Figura 4.22 Curvas características do fabricante, do GP e de dois ensaios internos realizados no NREL para o GP.

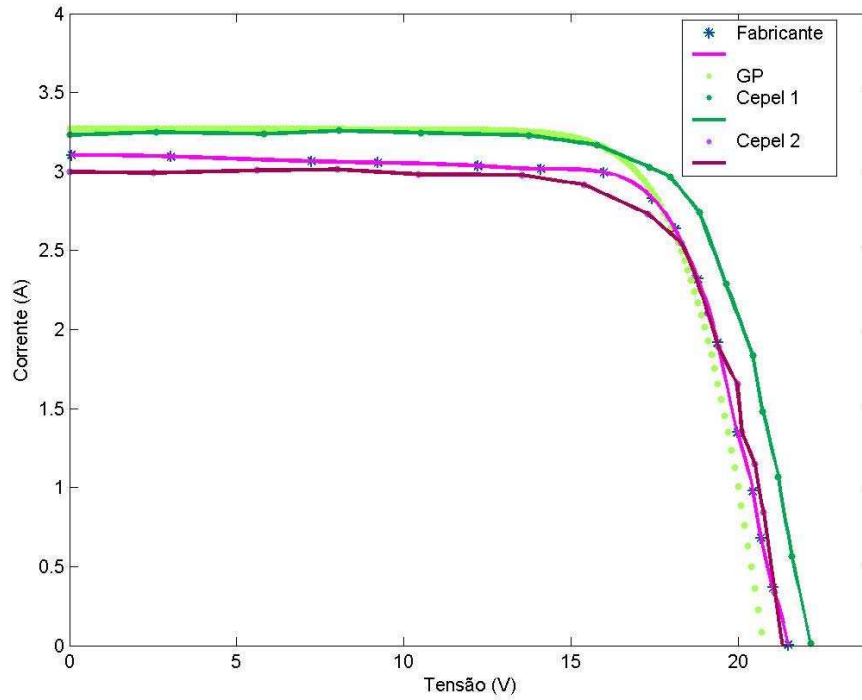


Figura 4.23 Curvas características do fabricante, do GP e de dois ensaios externos realizados no CEPEL.

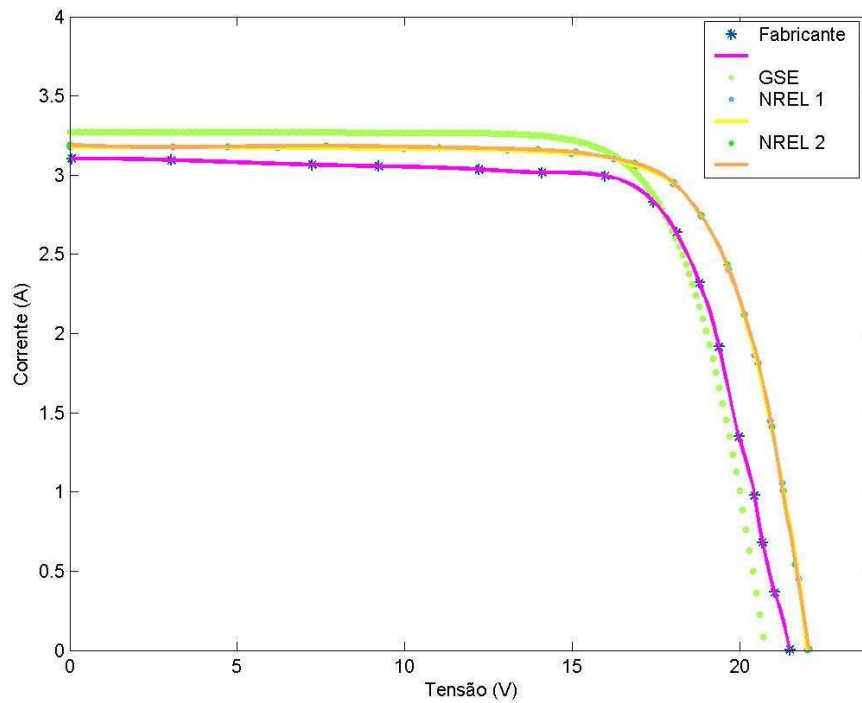


Figura 4.24 Curvas características do fabricante, do GSE e de dois ensaios externos realizados no NREL para o GP.

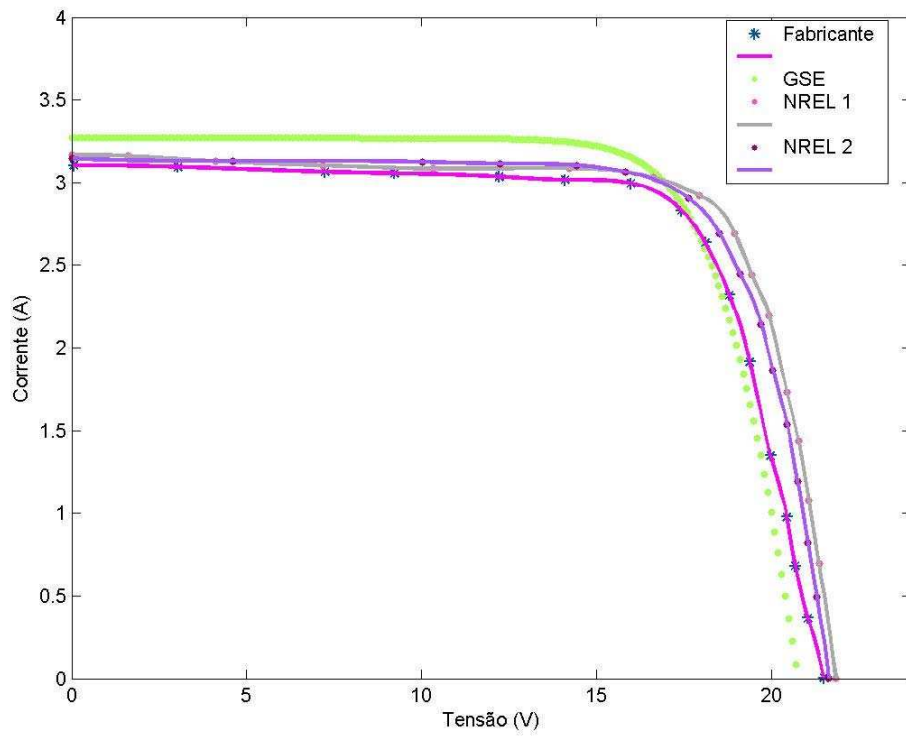


Figura 4.25. Curvas características do fabricante, do GSE e de dois ensaios internos realizados no NREL para o GP.

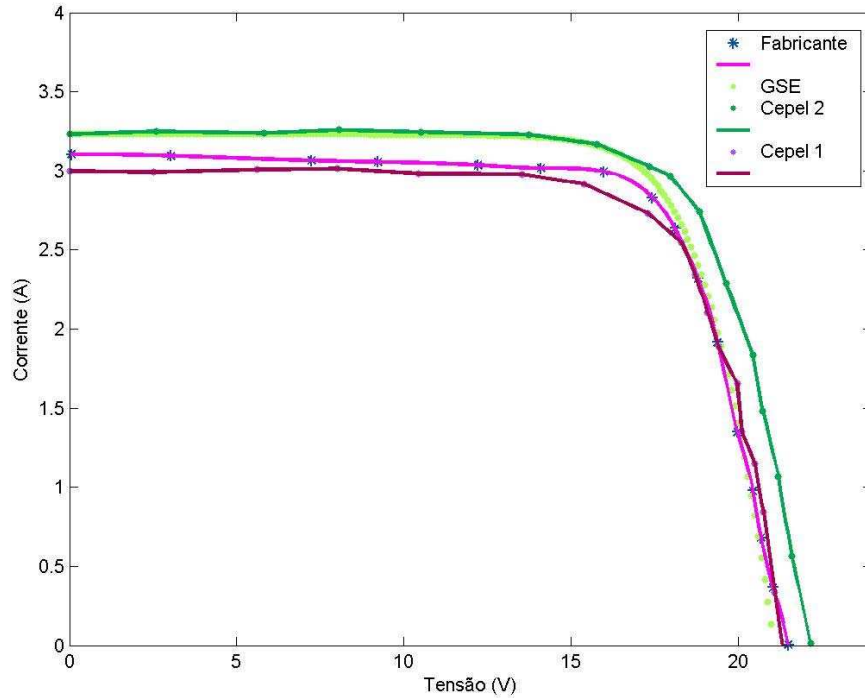


Figura 4.26 Curvas características do fabricante, do GSE e de dois ensaios externos realizados no CEPEL.

Quadro 4.10 Condições de ensaios e principais parâmetros para os diversos ensaios realizados.

Tipos de Ensaios	Área (cm²)	T_c (°C)	V_{CA} (V)	I_{CC} (A)	F_{PR} (%)	V_M (V)	I_M (A)	P_M (W)	η (%)
Gerador sob ensaio - externo	3420	25,0	20,76	3,27	75,1	16,7	3,0	51	14,9
Gerador padrão - externo	3420	25,0	21,1	3,23	75,5	17,1	3,0	51,5	15,0
Gerador padrão - interno – Spire 240A - NREL	3905,8	25,0	21,85	3,166	75,6	17,97	2,911	52,3	13,4
Gerador padrão - interno – Spectro Lab X200 - NREL	3905,8	25,1	21,65	3,135	75,6	17,65	2,909	51,33	13,1
Gerador padrão - externo 1 - NREL	3905,8	14,9	22,05	3,185	75,8	18,05	2,949	53,25	13,6
Gerador padrão - externo 2 - NREL	3905,8	11,7	22,02	3,179	75,8	18,04	2,926	53,11	13,6
Amostra Gerador fabricante	3905,8	25	21,5	3,1	75,17	16,7	3,0	50	-
Amostra Gerador - externo – Cepel	3905,8	30,3	22,2	3,23	70,7	17,06	2,97	53,34	-

Quadro 4.11 Análise de erros dos diversos ensaios realizados

Ensaio	Erro V_{CA}	Erro I_{CC}	Erro F_{PR}	Erro V_M	Erro I_M	Erro P_M
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
GSExGP	1,61	1,22	0,53	2,34	0,00	0,97
GPxGP Spire	3,43	1,98	0,13	4,84	2,97	1,53
GPxGP Spectro	2,54	2,94	0,13	3,12	3,00	0,33

Conforme o Quadro 4.11 os erros percentuais nos ensaios realizados neste trabalho e nos ensaios internos realizados no NREL, para os diversos parâmetros do GSE e do GP, foram menores que 4,84%, validando, desta forma, o estudo realizado.

4.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram estimados os parâmetros do modelo de geradores fotovoltaicos a partir do levantamento das curvas características. Foram determinados os coeficientes de temperatura da corrente de curto-circuito, da tensão de circuito aberto e da potência máxima, estimados os parâmetros do modelo do gerador fotovoltaico e validada a estimativa realizada por meio de estudo comparativo dos resultados de ensaios realizados em um laboratório nacional e um internacional.

Os coeficientes de temperatura da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito para o GSE e para o GP foram iguais a $-0,0973 \text{ V/}^\circ\text{C}$, $0,0025 \text{ A/}^\circ\text{C}$, $-0,0983 \text{ V/}^\circ\text{C}$ e $0,0026 \text{ A/}^\circ\text{C}$, respectivamente. Pode ser observado que os erros percentuais para os coeficientes de corrente e tensão são menores que $\pm 2,0\%$.

Na estimativa de parâmetros a maior discrepância encontrada foi na resistência paralela dos geradores sob ensaio e gerador padrão. Esta discrepância pode ser explicada devido à pequena influência da resistência paralela no modelo e devido ao algoritmo utilizado para a estimativa de parâmetros, que é sensível às condições iniciais impostas aos parâmetros.

A validação do estudo em relação às curvas do fabricante apresentou erros percentuais máximos para a corrente de curto-circuito e para a tensão de circuito aberto para o GSE foram de $6,68\%$ e $3,70\%$, respectivamente. Para o GP os erros foram de $5,57\%$ e $1,86\%$, respectivamente.

O estudo comparativo da caracterização dos geradores GP e GSE com ensaios realizados pelo fabricante, pelo CEPEL, da ELETROBRÁS e pelo NREL, apresentaram erros percentuais para os diversos parâmetros do GP e GSE menores que $4,84\%$. Estes resultados validam a caracterização de geradores fotovoltaicos realizada. Apesar de não se tratar de ensaio interlaboratorial, deve-se destacar a sua importância. Os custos de infraestrutura para a realização dos diversos ensaios realizados pelos laboratórios variam enormemente. Mas cada tipo de ensaio possui as suas especificidades e deve-se lembrar que para a realização de ensaios externos há a necessidade de condições climáticas adequadas.

CAPÍTULO 5 CONVERSOR ELETRÔNICO PARA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

5.1 INTRODUÇÃO

A maximização da eficiência na conversão de energia é essencial no desenvolvimento da sustentabilidade técnica e econômica de sistemas de energia solar fotovoltaica. Neste capítulo é realizado o estudo de técnicas de maximização da potência de saída de geradores fotovoltaicos que consistem de um conversor eletrônico seguidor do ponto de potência máxima.

A configuração básica de um sistema de energia solar fotovoltaica autônomo inclui os seguintes subsistemas: gerador fotovoltaico, rastreador solar, seguidor de potência máxima, controlador de carga, bateria, inversor e cargas em corrente contínua e alternada (DINIZ et al., 2002).

A metodologia de projeto de sistemas fotovoltaicos apresenta algumas especificidades: radiação com característica estocástica, necessidade de avaliação do desempenho energético dos geradores fotovoltaicos, adequação da carga ao ponto de máxima transferência de potência do gerador, necessidade de algoritmos de controle de carga de baterias, adequação do regime de funcionamento das cargas em corrente contínua e alternada e otimização do desempenho dos condicionadores de energia (seguidor de potência máxima, controladores de carga, inversores e reatores eletrônicos). Em todas estas iniciativas, um ponto a se destacar é a análise da viabilidade técnica e econômica.

Um Seguidor de Potência Máxima - SPM consiste de um casador de impedância dinâmico entre o gerador fotovoltaico e a carga. As pesquisas

focando incorporação ao sistema fotovoltaico deste dispositivo concentram-se no desenvolvimento de sistemas utilizando-se conversores eletrônicos microcontrolados de alto rendimento (HOHM e ROPP, 2003).

Atualmente, existem várias estratégias sendo pesquisadas, sendo priorizadas neste estudo as técnicas de perturbação e observação e de condutância incremental. Os algoritmos de controle permitem a otimização do sistema mesmo com a variação da irradiação solar e temperatura do gerador. Desta forma, o estudo do equipamento para a máxima transferência de potência é muito importante, contribuindo, também, para a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos (KOUTROULIS et al., 2003).

Inicialmente, foi realizado um estudo das configurações e aplicações de sistemas fotovoltaicos autônomos utilizados pela CEMIG nos programas de eletrificação rural. A partir deste estudo, o sistema foi especificado, dimensionado, simulado e montado, sendo o projeto do SPM realizado com base neste sistema. Foram projetados e simulados os circuitos de potência, comando e controle, que utilizam um microcontrolador, e definidos, também, os sensores e atuadores.

O circuito de potência do SPM consiste de um conversor cc/cc na configuração abaixadora - conversor *buck*. A definição por esta estrutura foi com base na configuração do arranjo e do nível de potência do gerador fotovoltaico. Geralmente, o conversor *buck* é utilizado como condicionador de energia nas técnicas de máxima transferência de potência e na carga de baterias (HADI et al., 2003). As etapas de desenvolvimento do estudo do conversor *buck* foram a descrição do funcionamento e modelagem em regime permanente do regime contínuo e descontínuo, modelagem para pequenos sinais em regime de condução contínua com malha de realimentação externa de tensão e corrente do gerador fotovoltaico, projeto, simulação, montagem e análise dos resultados do funcionamento do conversor *buck* como SPM. A modelagem dinâmica do conversor, também, foi realizada, também, por ser essencial no desenvolvimento de equipamentos. Nesta modelagem foram avaliados o comportamento discreto e a linearização das respostas. Entre as técnicas estudadas destacam-se: circuito equivalente com injeção de corrente e espaço de estados medianizados. Foi desenvolvido o modelo do conversor

utilizado no projeto e sua dinâmica foi estudada por meio de simulação (MOHAN e UNDERLAND, 1995).

No desenvolvimento dos algoritmos para o SPM, inicialmente realizou-se o estudo e desenvolvimento de algoritmos de máxima transferência de potência. O estado da arte dos algoritmos foi estabelecido com o estudo das principais técnicas. A partir deste estudo foram propostas estratégias para máxima transferência de potência objetivando a otimização da dinâmica e do rendimento do sistema. A seguir foram realizadas a modelagem e simulação do conjunto gerador fotovoltaico, conversor eletrônico com o algoritmo de máxima transferência de potência e carga. Com este desenvolvimento, os algoritmos foram implantados no protótipo utilizando-se o microcontrolador HC08 da FreeScale® (FREESCALE, 2006). A análise dos resultados e estudo comparativo dos algoritmos consistiu do monitoramento das principais variáveis elétricas e atmosféricas do sistema. A validação do estudo foi realizada com base na eficiência do algoritmo de máxima transferência de potência. Outros parâmetros foram também observados no estudo comparativo, tais como, resposta transitória, desempenho do conversor eletrônico, tempo de processamento dos algoritmos etc.

Os resultados demonstram um ganho de energia que, após a realização de uma avaliação econômica, deve validar a incorporação do conversor a um sistema fotovoltaico. A definição por um algoritmo de fácil implementação, não envolvendo processamento matemático excessivo, por exemplo, cálculo de derivadas - condutância incremental, é essencial para a viabilidade econômica do mesmo. O estudo desta técnica de máxima transferência de potência para sistemas fotovoltaicos tem demonstrado o potencial destas técnicas para a viabilização econômica de sistemas fotovoltaicos autônomos aplicados à eletrificação rural.

O objetivo geral foi projetar um sistema fotovoltaico autônomo com máxima transferência de potência. Sendo os objetivos específicos: dimensionar e simular sistema fotovoltaico autônomo com e sem máxima transferência de potência e modelar, simular, projetar e construir conversor eletrônico com seguidor do ponto de potência máxima.

5.2 MATERIAIS E MÉTODO

5.2.1 Seguidor de Potência Máxima

O gerador fotovoltaico possui um ponto de funcionamento no qual fornece potência máxima à carga. O ponto de funcionamento depende da carga acoplada ao gerador, sendo este ponto definido pela interseção da curva característica corrente-tensão do gerador e da carga. Para a maximização da energia gerada é necessário um conversor eletrônico cc/cc de acoplamento entre o gerador fotovoltaico e a carga e algoritmos de controle de modo a manter o gerador fotovoltaico sempre no ponto de máxima transferência de potência. Este conversor eletrônico funciona como um casador de impedância dinâmico entre o gerador fotovoltaico e a carga.

Para o equacionamento do ponto de potência máxima supõe-se que o ponto de operação do gerador fotovoltaico é igual a V e I , sendo a potência gerada dada por (PATEL, 1999):

$$P = V I \quad [5.1]$$

Supondo uma variação Δ no ponto de funcionamento, tem-se:

$$P + \Delta P = (V + \Delta V)(I + \Delta I) \quad [5.2]$$

$$P + \Delta P = V I + V \Delta I + I \Delta V + \Delta V \Delta I \quad [5.3]$$

Desprezando-se o termo da variação em tensão e corrente, tem-se:

$$\Delta P = V \Delta I + I \Delta V \quad [5.4]$$

No ponto de potência máxima, a taxa de variação da potência deve ser zero; desta forma, têm-se:

$$\Delta P = 0 \quad [5.5]$$

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad [5.6]$$

Onde,

$$\frac{dV}{dI} = Z_d = \text{Impedância dinâmica do gerador fotovoltaico} \quad [5.7]$$

$$\frac{V}{I} = Z_e = \text{impedância estática do gerador fotovoltaico} \quad [5.8]$$

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam as curvas características tensão-corrente, com a reta de carga, e tensão-potência, com a curva de potência de carga. Foram utilizados os resultados da simulação do modelo c (C1 e C2) geradores fotovoltaicos que incorporam as resistências série e paralela, obtidos no Capítulo 4, e os resultados obtidos com a simulação do gerador fotovoltaico acoplado a uma carga resistiva de 3Ω , obtidos no Capítulo 2. Como pode ser observado o ponto de operação encontra-se em um nível de potência sempre abaixo do ponto de potência máxima. Para trazer o ponto de operação para próximo do ponto de potência máxima é necessário um conversor eletrônico funcionando como casador de impedância dinâmico entre o gerador e a carga e algoritmos de controle que utilizam os princípios de equalização das impedâncias estática e dinâmica, medição das taxas de variação da potência e medição da tensão de circuito aberto.

Um diagrama de blocos do SPM é apresentado na Figura 5.3 e consiste de:

1. Gerador fotovoltaico: arranjo de módulos fotovoltaicos;
2. Circuito de potência (conversor cc/cc): permite a conexão do gerador fotovoltaico à carga e por meio do chaveamento de seu interruptor eletrônico, é viabilizada a máxima transferência de potência;
3. Sensores e atuadores: sensores de irradiação solar, temperatura do gerador fotovoltaico e ambiente, tensão e corrente de saída do gerador, condicionadores de sinais das variáveis a serem realimentadas e acionador dos chaveadores do conversor cc/cc;
4. Circuito de comando e controle (sistema de desenvolvimento): consiste de um microcontrolador que executa o algoritmo de máxima transferência de potência e, a partir da aquisição de dados, por meio de conversores Analógicos/Digitais, determina o ponto de potência máxima;
5. Carga: neste estudo a carga consiste de uma resistência.
6. Os sensores das variáveis atmosféricas são utilizados para validar o estudo por meio da modelagem, estimação de parâmetros e simulação do sistema desenvolvido.

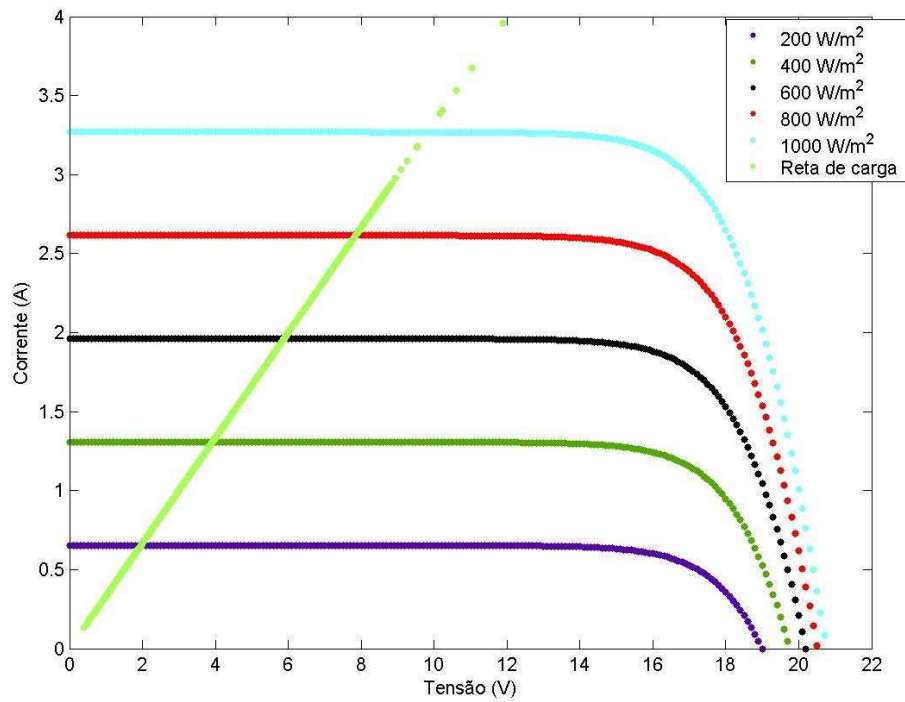


Figura 5.1 Curvas características tensão-corrente parametrizadas em função da irradiação e reta de carga para uma resistência igual a 3 Ω.

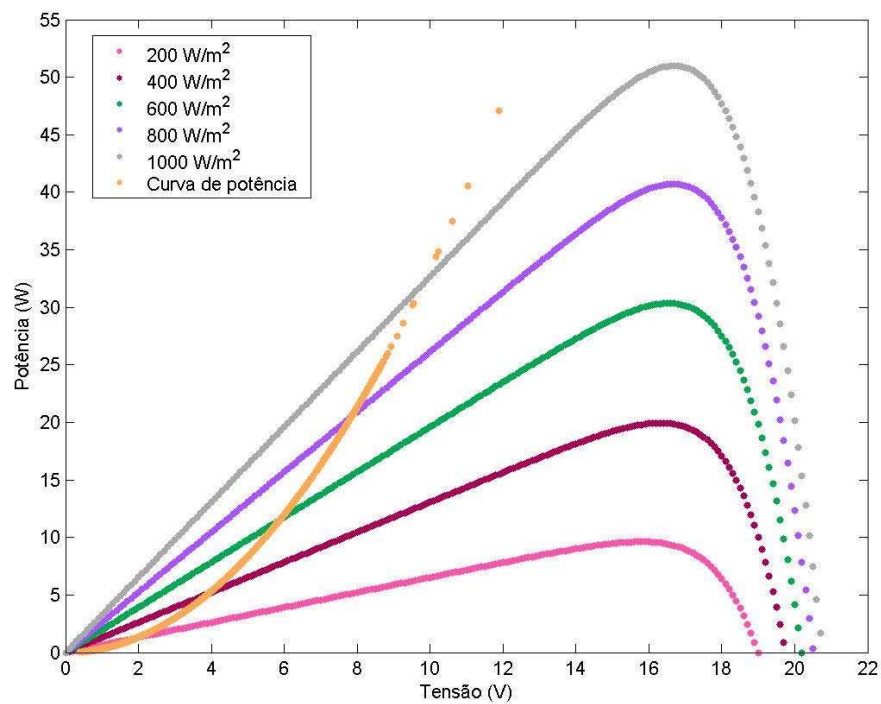


Figura 5.2 Curvas características tensão-potência parametrizadas em função da irradiação e curva de potência da carga para uma resistência igual a 3 Ω.

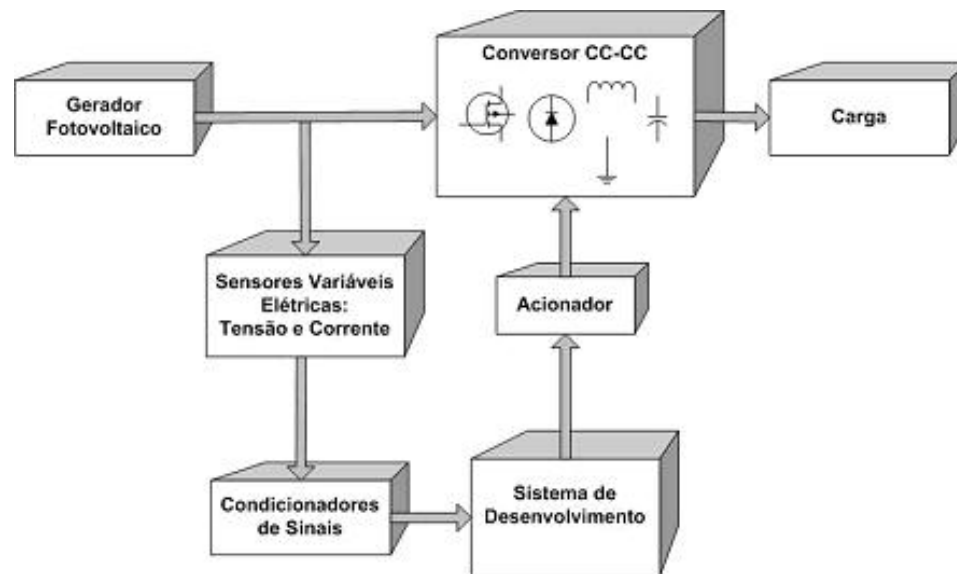


Figura 5.3 Diagrama de blocos do Seguidor de Potência Máxima – SPM.

5.2.2 Conversor Eletrônico CC/CC Abaixador de Tensão

O desenvolvimento do conversor eletrônico obedeceu à seguinte metodologia: determinação de especificações, avaliação das tecnologias disponíveis, montagem do protótipo e análise dos resultados. A determinação do conjunto de especificações contemplou uma visão geral da aplicação, requisitos de funcionamento, do ambiente e mecânico. Foi realizado o estudo das tecnologias disponíveis visando à definição da estrutura do conversor eletrônico, chaveadores, componentes passivos e circuitos integrados. A metodologia de projeto considerou os requisitos de desempenho, constantes de projeto, variáveis de projeto, otimização, simulação, montagem do conversor, realização de testes e análise dos resultados.

Para o projeto do conversor, as seguintes etapas foram adotadas: definição da estrutura do conversor, dimensionamento do conversor, modelagem, simulação, montagem e testes.

Foi realizada a modelagem dinâmica do conversor eletrônico chaveado, por ser essencial no desenvolvimento de equipamentos. Nesta modelagem foi avaliado o comportamento discreto e a linearização da resposta. Entre as técnicas estudadas destacam-se a do circuito equivalente com injeção de corrente e espaço de estados medianizados. Foi desenvolvido o modelo do

conversor utilizado no projeto e sua dinâmica foi estudada por meio de simulação (ERICKSON, 1997 e KASSAKIAN et al., 1991).

A descrição do funcionamento e modelagem em regime permanente do conversor abaixador em regime contínuo e descontínuo é apresentada a seguir. A Figura 5.4 apresenta a estrutura do conversor abaixador, que consiste da fonte de alimentação contínua (gerador fotovoltaico), dois chaveadores eletrônicos (transistor de potência e diodo de roda livre), um filtro passa baixa e a carga. O princípio de funcionamento consiste do chaveamento do transistor, permitindo o chaveamento da tensão no filtro e carga. O tempo que o transistor conecta a fonte ao filtro e carga determina a potência entregue a carga. Desta forma, o controle é realizado por meio da Modulação por Largura de Pulso - MLP. As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam resultados da simulação do conversor abaixador utilizando os parâmetros de projeto e uma frequência de chaveamento de 25 kHz.

O sinal de controle do chaveador (MLP) é o ciclo de trabalho e é igual a:

$$D_c = \frac{t_1}{T_c} \quad [5.9]$$

Em que

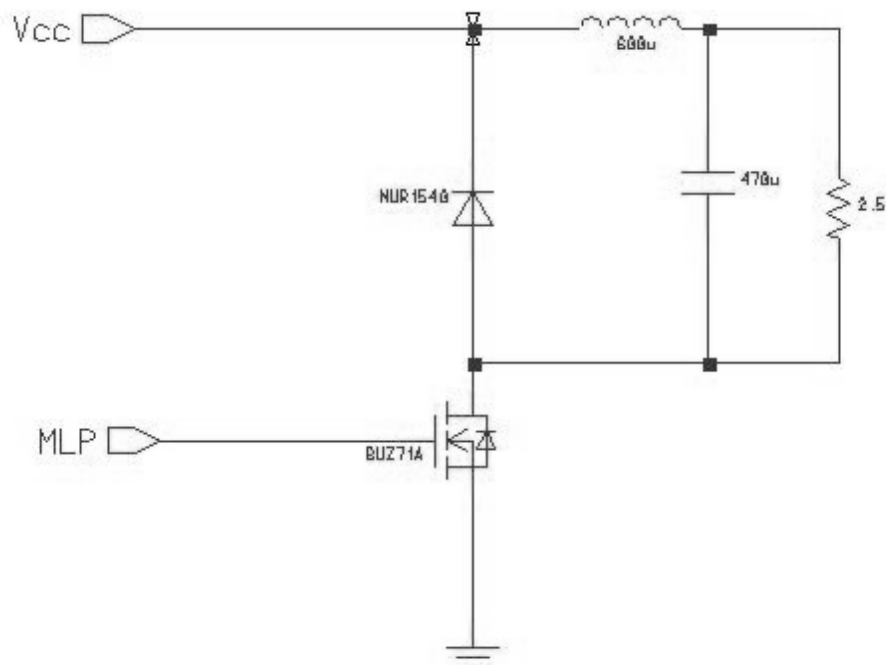


Figura 5.4 Estrutura do conversor abaixador de tensão.

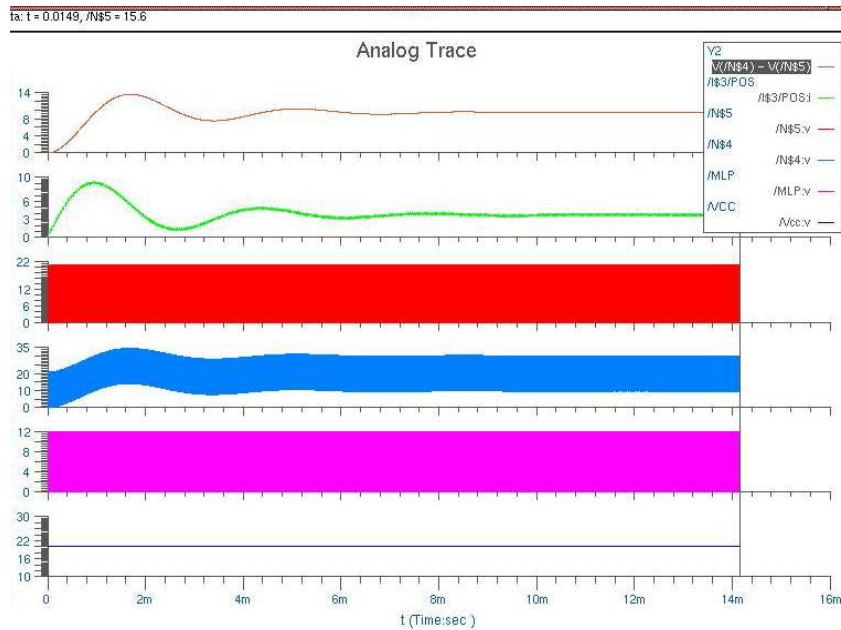


Figura 5.5 Resultados da simulação (de cima para baixo): tensão na carga, corrente no indutor do filtro, tensão no chaveador, tensão do potencial positivo da carga em relação ao terra, sinal de modulação (MLP) e tensão de alimentação.

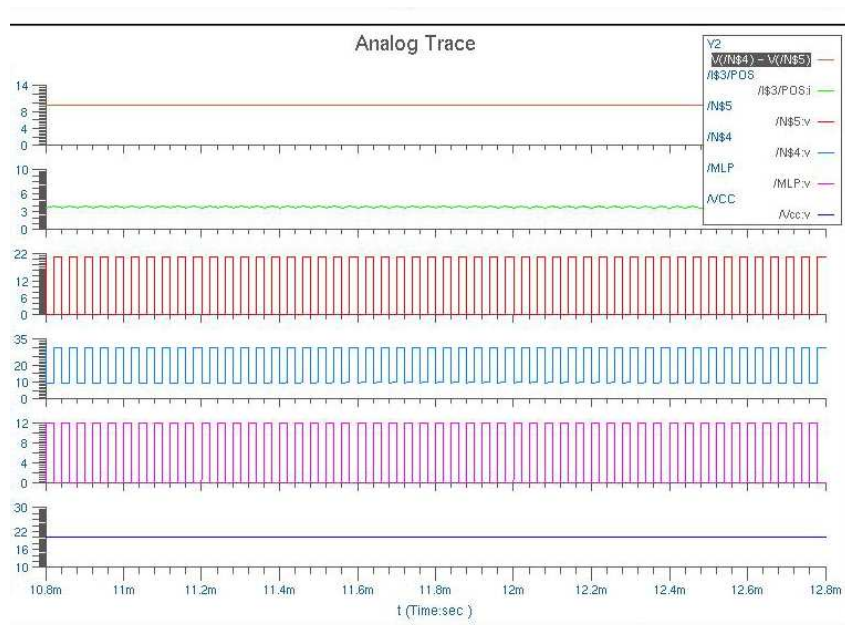


Figura 5.6 Detalhe das formas de ondas da Figura 5.5.

- t_1 - tempo que o transistor conecta a fonte à carga e filtro (s);
- T_C - período de chaveamento (s);
- D_C - ciclo de trabalho;

Esta técnica de comando é denominada Modulação por Largura de Pulso - MLP. A tensão média na carga é dada por:

$$V_S = D_C V_E \quad [5.10]$$

em que

V_S - tensão de saída (V)

V_E - tensão de entrada (V)

Como o ciclo de trabalho é sempre menor que a unidade, a tensão na carga pode variar de zero ao valor da tensão de entrada. Se a eficiência do conversor é igual à unidade, tem-se:

$$D_C = \frac{V_S}{V_E} = \frac{I_E}{I_S} \quad [5.11]$$

em que

I_S - corrente de saída (A)

I_E - corrente de entrada (A)

Na modelagem do sistema são consideradas a resistência de condução do chaveador (R_{DSon}), a queda de tensão no diodo de roda livre (V_d), e a componente alternada da tensão contínua de saída é igual a zero.

Em regime permanente e regime contínuo de corrente no indutor do filtro de saída tem-se a seguinte expressão para a tensão no indutor:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad [5.12]$$

e

$$\Delta I_L = \frac{V_L}{L} \Delta T \quad [5.13]$$

Durante o tempo de fechamento do chaveador tem-se:

$$\Delta I_{L t_1} = \frac{V_E - V_{RDS} - V_S}{L} t_1 \quad [5.14]$$

Durante o tempo de abertura do chaveador tem-se:

$$\Delta I_{L t_2} = \frac{V_S + V_D}{L} t_2 \quad [5.15]$$

em que:

$$T_C = t_1 + t_2 \quad [5.16]$$

Considerando-se o balanço volts-segundo no indutor, tem-se:

$$V_S = (V_E - V_{RDS}) D_C - V_D (1 - D_C) \quad [5.17]$$

Em regime permanente e regime descontínuo de corrente no indutor do filtro de saída têm-se as seguintes expressões:

1. Durante o tempo de fechamento do chaveador:

$$\Delta I_{L t_1} = \frac{V_E - V_{RDS} - V_S}{L} t_1 = \frac{V_E - V_{RDS} - V_S}{L} D_C T_C = I_P \quad [5.18]$$

em que

I_P - valor de pico da corrente no indutor (A)

2. Durante o tempo de abertura do chaveador:

$$\Delta I_{L t_2} = \frac{V_S + V_D}{L} t_2 \quad [5.19]$$

em que:

$$T_C = t_1 + t_2 + t_3 \quad [5.20]$$

Considerando-se o balanço volts-segundo no indutor e o intervalo no qual a corrente é zero e a tensão na carga é igual $V_S (t_3)$, tem-se:

$$V_S = \frac{(V_E - V_{RDS}) D_C - V_D (1 - D_C)}{T_C - t_3} \quad [5.21]$$

A modelagem de conversores cc/cc chaveados permite a obtenção de altos requisitos de desempenho de projeto e consiste na caracterização da função de transferência, bem como das propriedades de entrada-saída. Os conversores chaveados possuem uma característica discreta, sendo, portanto sistemas não lineares. Geralmente são aplicadas técnicas de linearização, tais como, medianização (averaging) para o estudo da dinâmica. Com este artifício pode-se utilizar as técnicas de análise de circuitos lineares invariantes no tempo e de projeto de sistemas de controle clássico. Porém este método é limitado, não provendo uma solução completa. A técnica de espaço de estados é uma ferramenta mais ampla e poderosa para a modelagem de sistemas dinâmicos, incorporando modelos medianizados e chaveados e permitindo a

análise, simulação e controle em regime transitório e permanente. Porém, com a incorporação dos elementos parasitas do conversor a análise torna-se mais complexa. A seguir são apresentadas as etapas para a modelagem por circuito equivalente com injeção de corrente em regime de condução contínua de corrente (CHETTY, 1986). Com esta modelagem, a aplicação da técnica de diagrama de Bode para a análise da dinâmica do conversor é direta (KUO, 1995 e DORF e BISHOP, 1998).

As convenções e notações utilizadas na análise são:

$d1 T_c + d2 T_c = T_c$ - período de chaveamento;

$T_c = 1 / f_c$

f_c - freqüência de chaveamento;

$d1 T_c$ - intervalo durante o qual o transistor está conduzindo e o diodo bloqueado;

$d2 T_c$ - intervalo durante o qual o transistor está bloqueado e o diodo conduzindo.

A primeira etapa consiste em identificar as partes lineares e não-lineares do circuito do conversor e linearizar as partes não-lineares. A parte não-linear do conversor determina a corrente média injetada na parte linear do circuito.

A segunda etapa consiste em escrever as equações do conversor relacionando-se o circuito do conversor às formas de ondas de tensão e corrente, tais como, derivada da corrente no indutor, corrente média do indutor em um período de chaveamento ($i_{média}$) e tensão de saída = $V_S = i_{média}Z$, onde Z é a impedância de saída.

A terceira etapa consiste na solução para regime permanente, que é obtida zerando-se as derivadas e perturbações. Já que as equações obtidas na etapa 2 são lineares, pode-se aplicar o teorema da superposição e perturbar o sistema pela introdução de uma pequena variação alternada em um ponto de funcionamento em regime permanente. Como as entradas de atuação independentes são V_E e D_C , a perturbação nestas duas entradas causa as perturbações em i e v . Fazendo-se as aproximações para pequenos sinais bem menores que 1, os termos de segunda ordem são desprezados e obtém-se um conjunto de equações lineares; apenas a parte alternada que descreve o

comportamento em baixa frequência para pequenos sinais do conversor é retida.

As propriedades em regime permanente são:

1. Derivada da corrente do indutor igual a zero;
2. $v_E \rightarrow V_E$;
3. $v_S \rightarrow V_S$;
4. $v_S = V_S + \hat{v}_S$;
5. $i_{m\acute{e}dia} = I_{m\acute{e}dia} + \hat{i}_{m\acute{e}dia}$.

As variáveis em maiúsculo indicam valores em regime permanente e a variáveis com o sinal (^) indicam perturbações com pequenas amplitudes.

A quarta etapa consiste em utilizar o conjunto de equações obtidas na etapa 3, e a partir delas obter-se as funções de transferências de entrada-saída e controle-saída.

A quinta etapa consiste na utilização das mesmas equações da etapa 4, para obter um circuito equivalente que represente as propriedades do conversor de entrada e saída em baixa frequência para pequenos sinais.

A seguir são apresentadas as funções de transferência entrada-saída e controle-saída para o conversor buck obtidas com a aplicação das etapas estabelecidas:

$$\frac{\hat{v}_S(s)}{\hat{v}_E(s)} = (d1) \frac{1 + s R_C C}{1 + \frac{s (R_C C + L)}{R} + \frac{s^2 L C (R + R_C)}{R}} \quad [5.22]$$

$$\frac{\hat{v}_S(s)}{\hat{d1}(s)} = (V_E) \frac{1 + s R_C C}{1 + \frac{s (R_C C + L)}{R} + \frac{s^2 L C (R + R_C)}{R}} \quad [5.23]$$

em que

- \hat{v}_S - perturbação com pequena amplitude na tensão de saída em regime permanente (V);
- \hat{v}_E - perturbação com pequena amplitude na tensão de entrada em regime permanente (V);

s	- operador laplaciano;
R_C	- resistência série do capacitor do filtro de saída (Ω);
C	- capacitor do filtro de saída (F);
L	- indutor do filtro de saída (H);
R	- resistência de carga (Ω);
\hat{d}_1	- perturbação com pequena amplitude no ciclo de trabalho da condução (s).

As principais especificações de desempenho de um regulador estão relacionadas a regulação cc, impedância de saída, resposta transiente e rejeição de linha (áudio suscetibilidade). Todas essas propriedades estão relacionadas ao ganho da malha do conversor e ao deslocamento de fase. O ganho da malha é o produto dos ganhos do conversor e de todos os componentes da malha de realimentação e o deslocamento de fase é a soma dos deslocamentos de fase do conversor e de todos os componentes da malha de realimentação. O ganho da malha e sua fase determinam a estabilidade do sistema.

5.2.3 Sistema de Desenvolvimento Digital

Para a implementação dos algoritmos de máxima transferência de potência do Seguidor de Potência Máxima foi utilizado o microcontrolador 68HC908QT4, cujo projeto de desenvolvimento foi realizado pela Motorola[®] do Brasil – FreeScale[®]. A definição por este microcontrolador deveu-se ao seu alto desempenho, programação simples, facilidade de interfaceamento e baixo custo. Inicialmente, são apresentados a arquitetura interna do microcontrolador e seus principais registradores que definem os principais parâmetros de funcionamento. A seguir, é apresentado o ambiente de desenvolvimento e programação, denominado CodeWarrior[®], da MetroWerks[®], que permite a programação em linguagem C do microcontrolador (FREESCALE, 2006).

As principais características do microcontrolador 68HC908QT4 são memória flash com capacidade de 4096 bytes, memória RAM com capacidade de 128 bytes, cinco pinos de entrada/saída e 1 pino de entrada, temporizador/Contador de 16 bits com dois canais, conversor analógico/digital

de 8 bits com quatro canais, interrupção, tensão de operação de 3 ou 5 V, 8 MHz de velocidade do barramento interno e oscilador interno de 3,2 MHz programável. A Figura 5.7 apresenta a pinagem e a Figura 5.8 a arquitetura interna do microcontrolador 68HC908QT4 (PEREIRA, 2004).

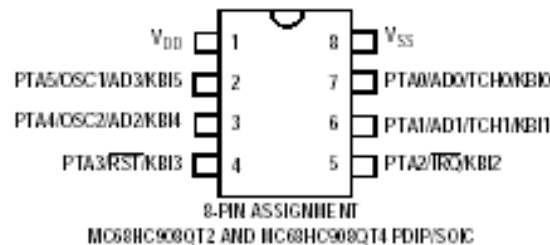


Figura 5.7 Pinagem do MC68HC908QT4 (FREESCALE, 2006).

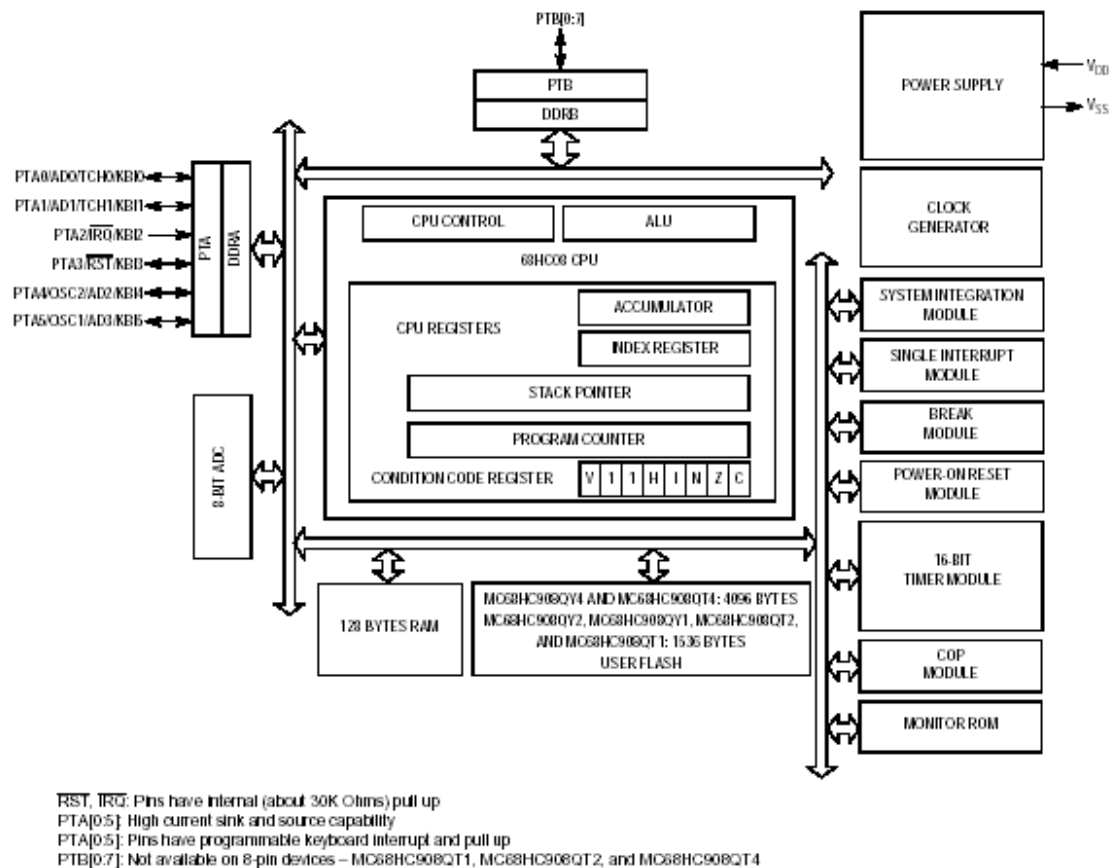


Figura 5.8 Arquitetura do MC68HC908QT4 (FREESCALE, 2006).

O Codewarrior[®] é o ambiente de desenvolvimento e consiste de editor, montador assembly, compilador C, linker, processor expert (assistente de periféricos) e simulador. A Figura 5.9 apresenta uma janela do Codewarrior[®] e a Figura 5.10 apresenta uma foto da placa de circuito impresso que permite a

gravação do programa desenvolvido no circuito integrado, cuja comunicação é realizada através da porta serial RS232. Para a implementação do programa é necessário programar vários módulos internos do HC08, tais como, registradores de configuração 1 e 2 e temporizadores. Esta programação é realizada no programa principal antes do anel infinito (*loop forever*).

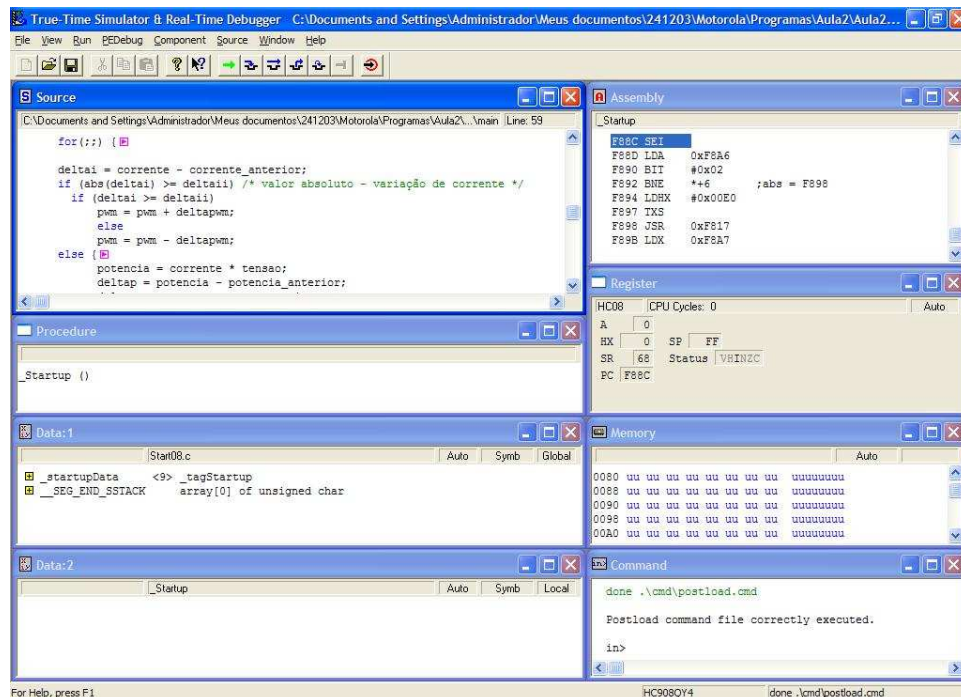


Figura 5.9 Ambiente de desenvolvimento Codewarrior® (FREESCALE, 2006).



Figura 5.10 Gravador do microcontrolador (FREESCALE, 2006).

5.2.4 Algoritmos de Máxima Transferência de Potência

Os algoritmos de máxima transferência de potência a serem implementados no Seguidor de Potência Máxima utilizam os seguintes princípios básicos: (a) injeção periódica de pequeno sinal de corrente no barramento do gerador com a medição da impedância estática ($Z_e=V/I$) e dinâmica ($Z_d=dV/dI$) e controle da tensão de operação até a equalização das impedâncias, ou seja, $Z_d = - Z_e$; (b) medição da taxa de variação da potência em relação à tensão e aumento da tensão de operação enquanto a taxa de variação da potência for positiva; e (c) medição da tensão de circuito aberto de uma célula no mesmo ambiente do gerador. Para a maioria das células a razão entre a tensão no ponto de máxima potência e a tensão de circuito aberto é igual a uma constante K . Portanto, é estabelecido o valor da tensão de operação como sendo K vezes a tensão de circuito aberto (PATEL, 1999).

Algoritmos mais recentes incorporam técnicas de otimização, tais como, ajuste de curvas, redes neurais e lógica nebulosa. Atualmente, as pesquisas para maximização da transferência de potência concentram-se no desenvolvimento de sistemas utilizando-se conversores eletrônicos micro-controlados ou com processadores de sinais. Estes equipamentos permitem a otimização dos algoritmos mesmo com variações rápidas da radiação solar e temperatura (HUA e LIN, 2003).

O desenvolvimento dos algoritmos de máxima transferência de potência implantados no conversor obedeceu aos seguintes passos:

1. Estudo e desenvolvimento de algoritmos de máxima transferência de potência: aqui o estado da arte dos algoritmos foi estabelecido com o estudo das principais técnicas. A partir deste estudo foram propostas estratégias para máxima transferência de potência objetivando a otimização da dinâmica e do rendimento do sistema;
2. Modelagem e simulação do conjunto gerador fotovoltaico, conversor eletrônico com o algoritmo de máxima transferência de potência e carga. A partir do estudo da dinâmica deste sistema foi projetado um controlador digital para otimizar a resposta, tendo em vista variações das condições atmosféricas e de carga. A validação teórica do projeto do controlador digital foi implementada por meio de simulação;

3. Implantação dos algoritmos no protótipo: com os estudos realizados foi desenvolvido o algoritmo para implantação no protótipo utilizando o microcontrolador HC08 da Motorola / FreesScale®;
4. Análise dos resultados e estudo comparativo: a partir da implantação dos algoritmos, as principais variáveis elétricas e atmosféricas do sistema foram monitoradas e analisadas. A validação do estudo foi realizada com base na eficiência do algoritmo de máxima transferência de potência. Outros parâmetros foram também observados no estudo comparativo, tais como, resposta transitória, desempenho do conversor eletrônico, tempo de processamento dos algoritmos etc.

O procedimento para o desenvolvimento do algoritmo de máxima transferência de potência a ser implantado no SPM consistiu do estudo dos algoritmos, definição por um algoritmo de fácil implementação e bom desempenho.

O fluxograma do primeiro algoritmo investigado é apresentado na Figura 5.11. Este algoritmo é denominado Perturbação e Observação - P&O e seu princípio de funcionamento consiste na modificação do ponto de funcionamento do gerador fotovoltaico por meio da alteração do ciclo de trabalho - D_c do conversor abaixador - perturbação e pela observação do efeito desta alteração na potência do gerador fotovoltaico. Apesar de fácil implementação, este algoritmo apresenta alguns inconvenientes, tais como, oscilação em torno do ponto de potência máxima, difícil localização do ponto, ou erro para variações rápidas da irradiação (HOHM e ROPP, 2003).

Duas variantes do algoritmo P&O que minimizam as oscilações e erros para variações rápidas de irradiação consistem da observação da tensão do gerador fotovoltaico antes da observação e perturbação da potência do gerador. A tensão é mais sensível às variações de irradiação e temperatura. A Figura 5.12 apresenta o fluxograma do algoritmo P&O modificado I. Neste algoritmo é observada a alternância de sinal da diferença das tensões no instante atual e anterior. Já no algoritmo P&O modificado II, Figura 5.13, é observado apenas se ocorreu variação de tensão. Estas variantes minimizam as oscilações, mas para variações rápidas de irradiação podem ainda ocorrer erros na localização do ponto de potência máxima.

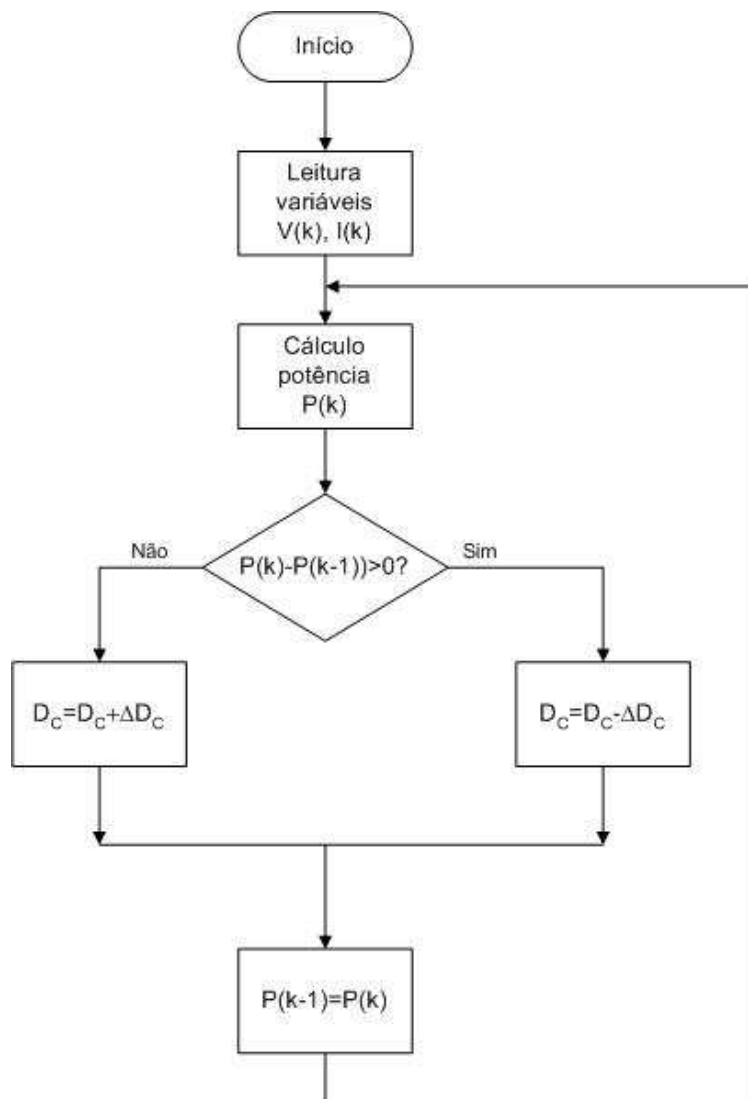


Figura 5.11 Fluxograma do algoritmo Perturbação e Observação - P&O.

O fluxograma do segundo algoritmo investigado é apresentado na Figura 5.14. Este algoritmo é denominado Condutância Incremental - CI e seu princípio de funcionamento consiste na observação da tensão e corrente do gerador fotovoltaico, sendo a tensão observada inicialmente por ser mais sensível a variações de irradiação e temperatura. Caso ocorra variação da tensão no gerador, a condutância dinâmica é comparada com a condutância estática. No ponto de potência máxima a condutância dinâmica é igual a menos a condutância estática (HOHM e ROPP, 2003).

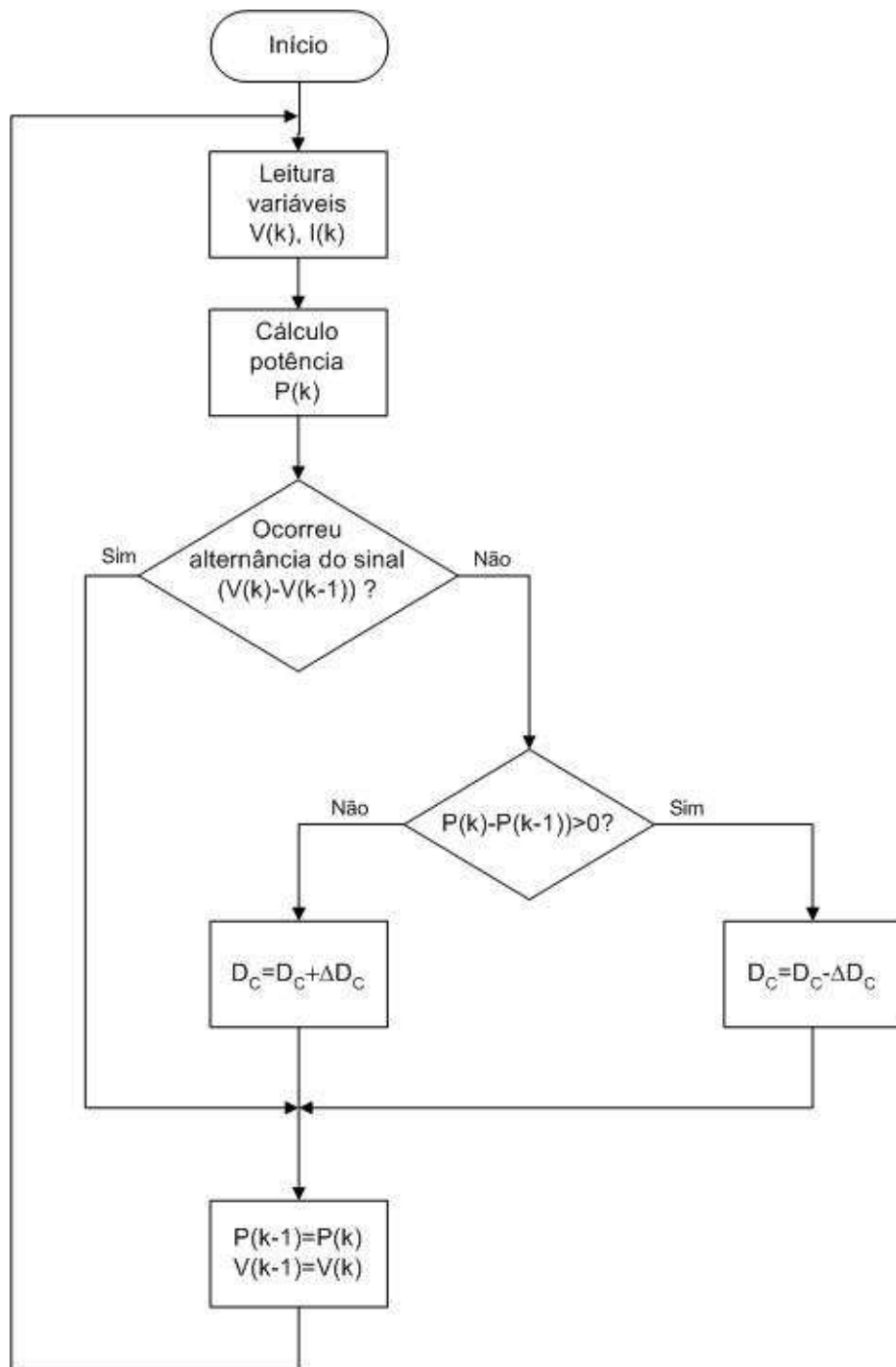


Figura 5.12 Fluxograma do algoritmo P&O variante I.

O fluxograma do terceiro algoritmo investigado denominado Tensão Constante – TC é apresentado na Figura 5.15. Seu princípio de funcionamento baseia-se na razão K_V entre a tensão no ponto de potência máxima e a tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico (HOHM e ROPP, 2003).

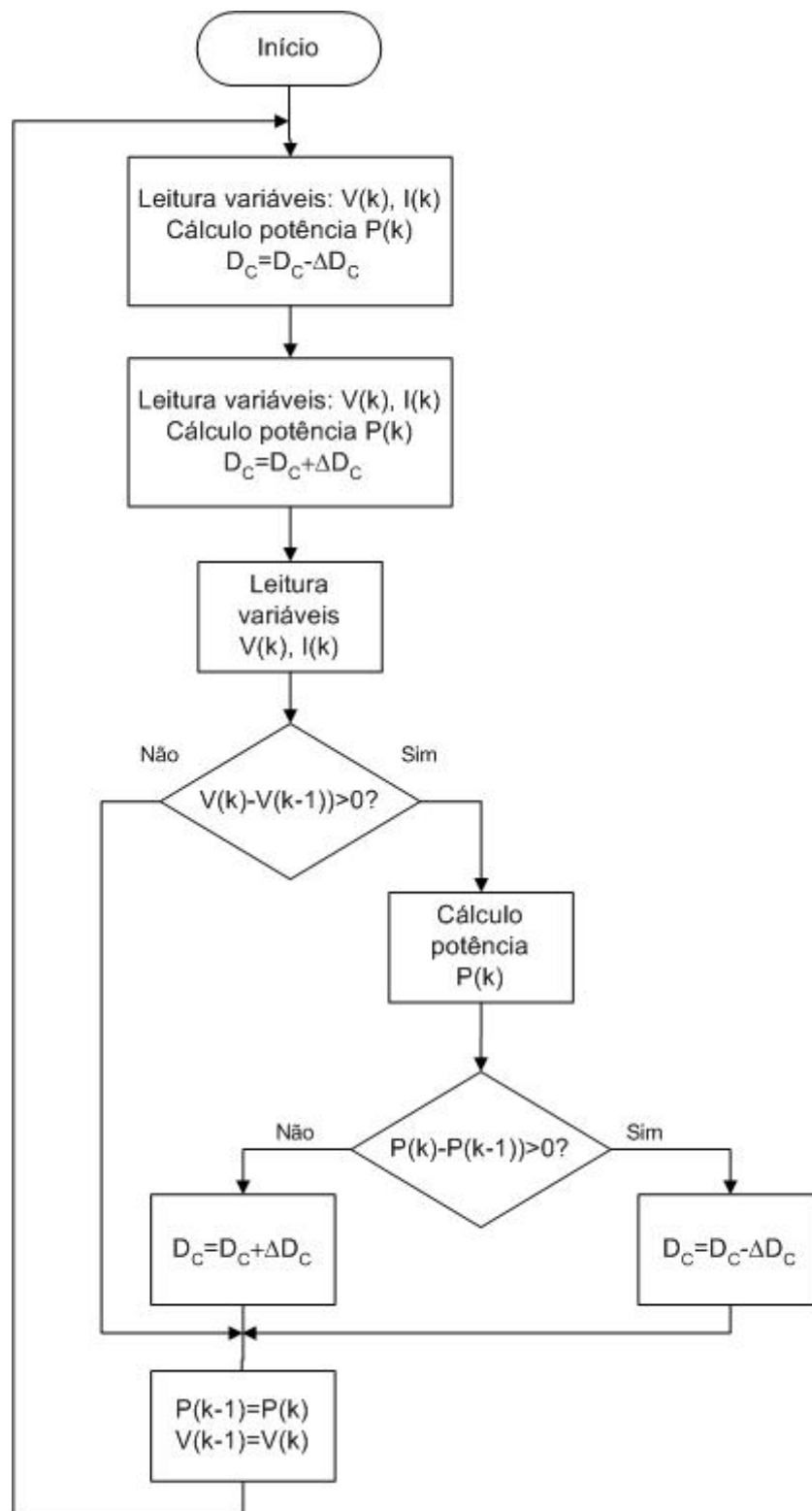


Figura 5.13 Fluxograma do algoritmo P&O variante II.

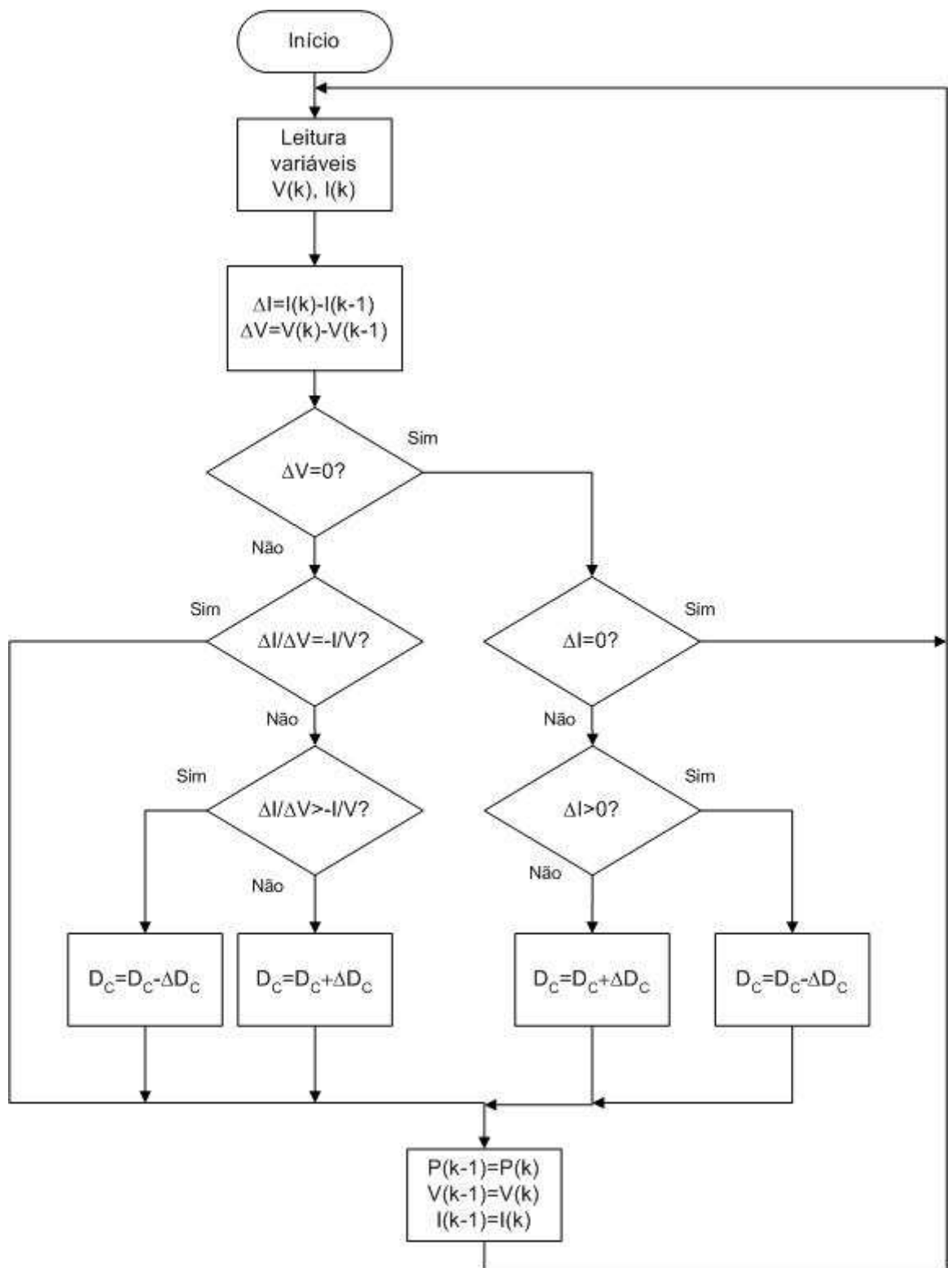


Figura 5.14 Fluxograma do algoritmo Condutância incremental - CI.

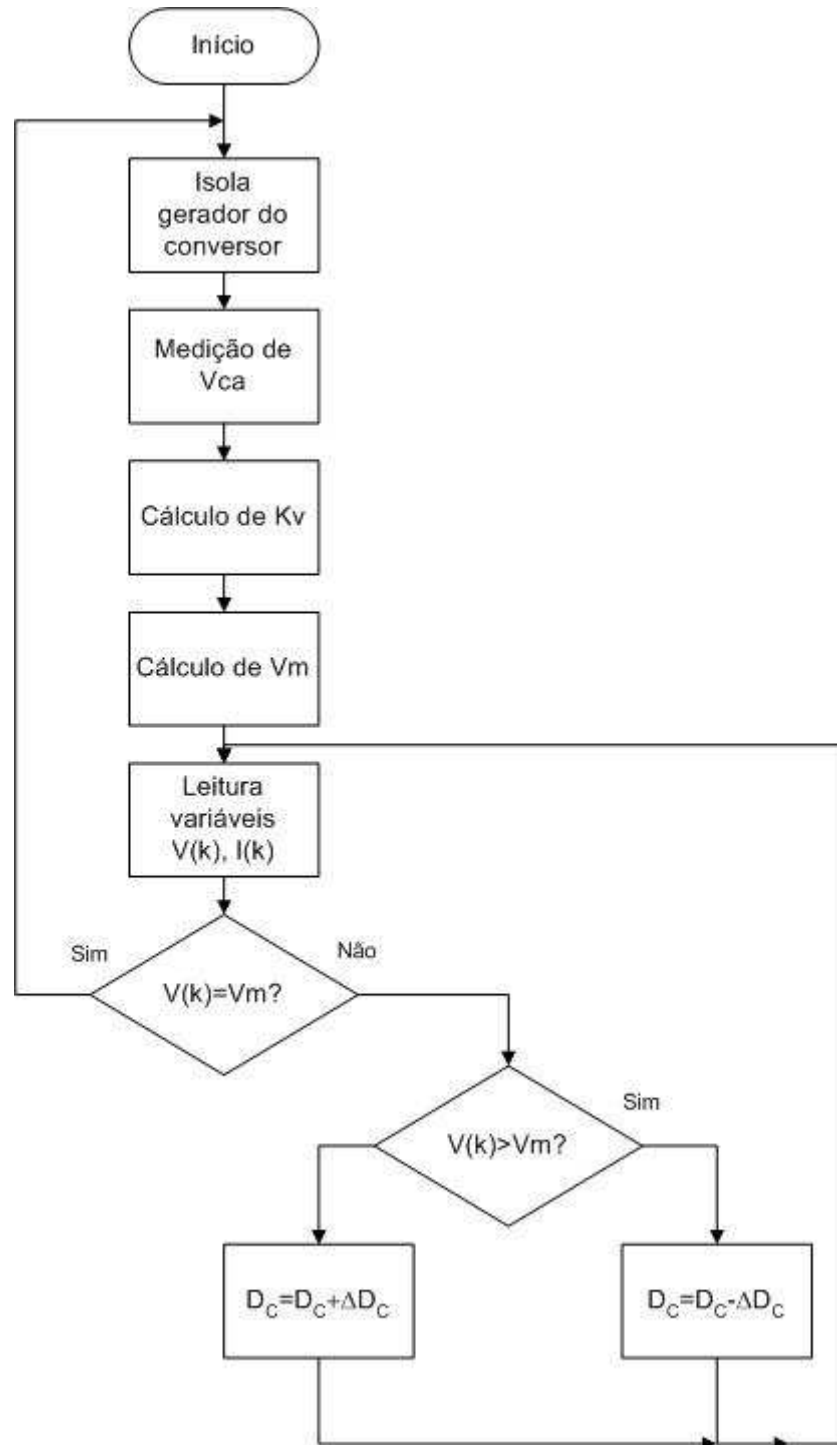


Figura 5.15 Fluxograma do algoritmo Tensão Constante - TC.

O fluxograma do quarto algoritmo investigado denominado Corrente Constante – CC é apresentado na Figura 5.16. Seu princípio de funcionamento baseia-se na razão K_i entre a corrente no ponto de potência máxima e a corrente de curto-circuito do gerador fotovoltaico (HOHM e ROPP, 2003).

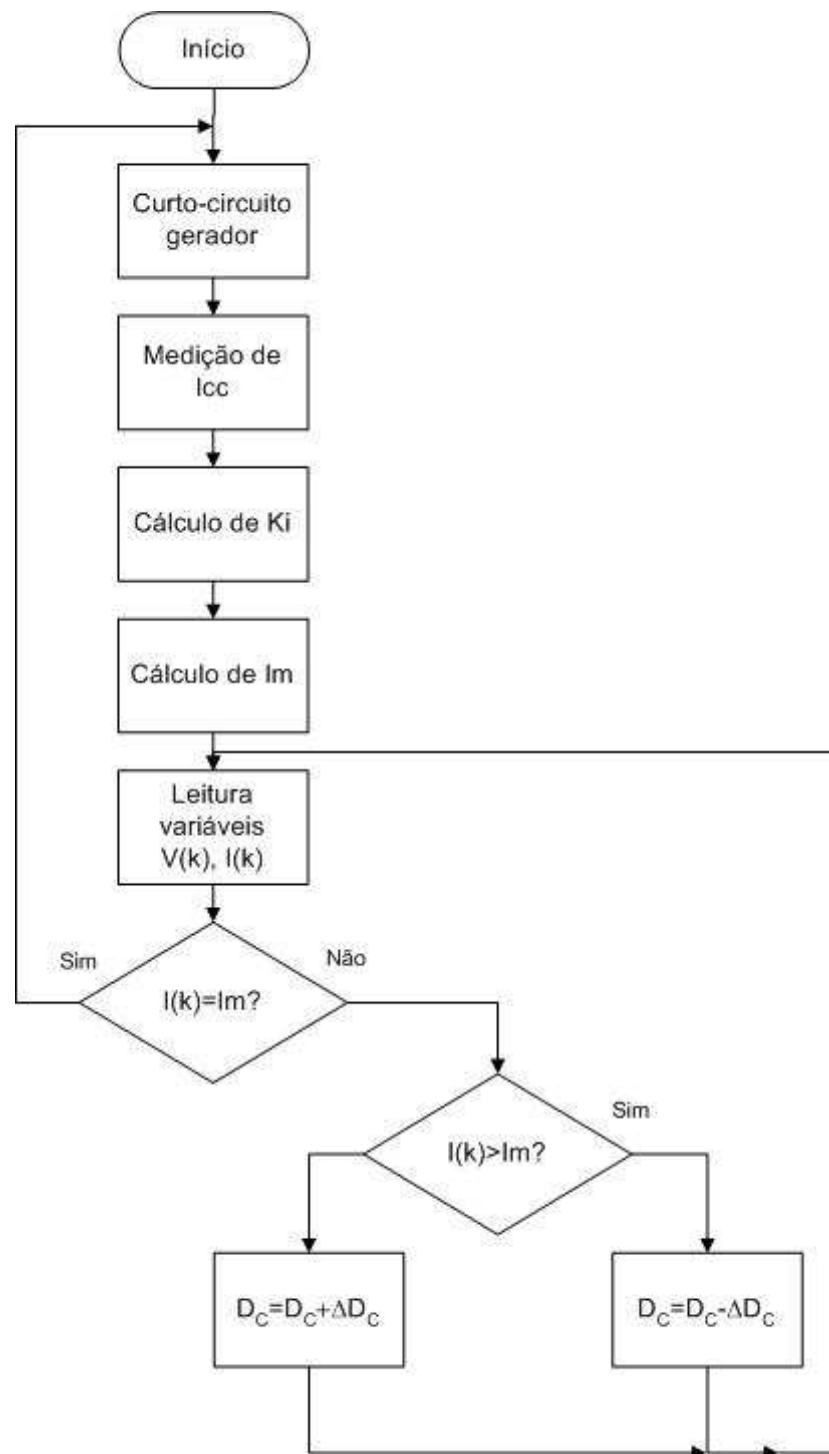


Figura 5.16 Fluxograma do algoritmo Corrente Constante - CC.

O algoritmo implementado neste trabalho pode ser considerado como uma variante dos algoritmos P&O e CI. O fluxograma é apresentado na Figura 5.17 e o princípio de funcionamento baseia-se na perturbação do ponto de funcionamento e a observação, tanto da potência, quanto da tensão e corrente do gerador fotovoltaico.

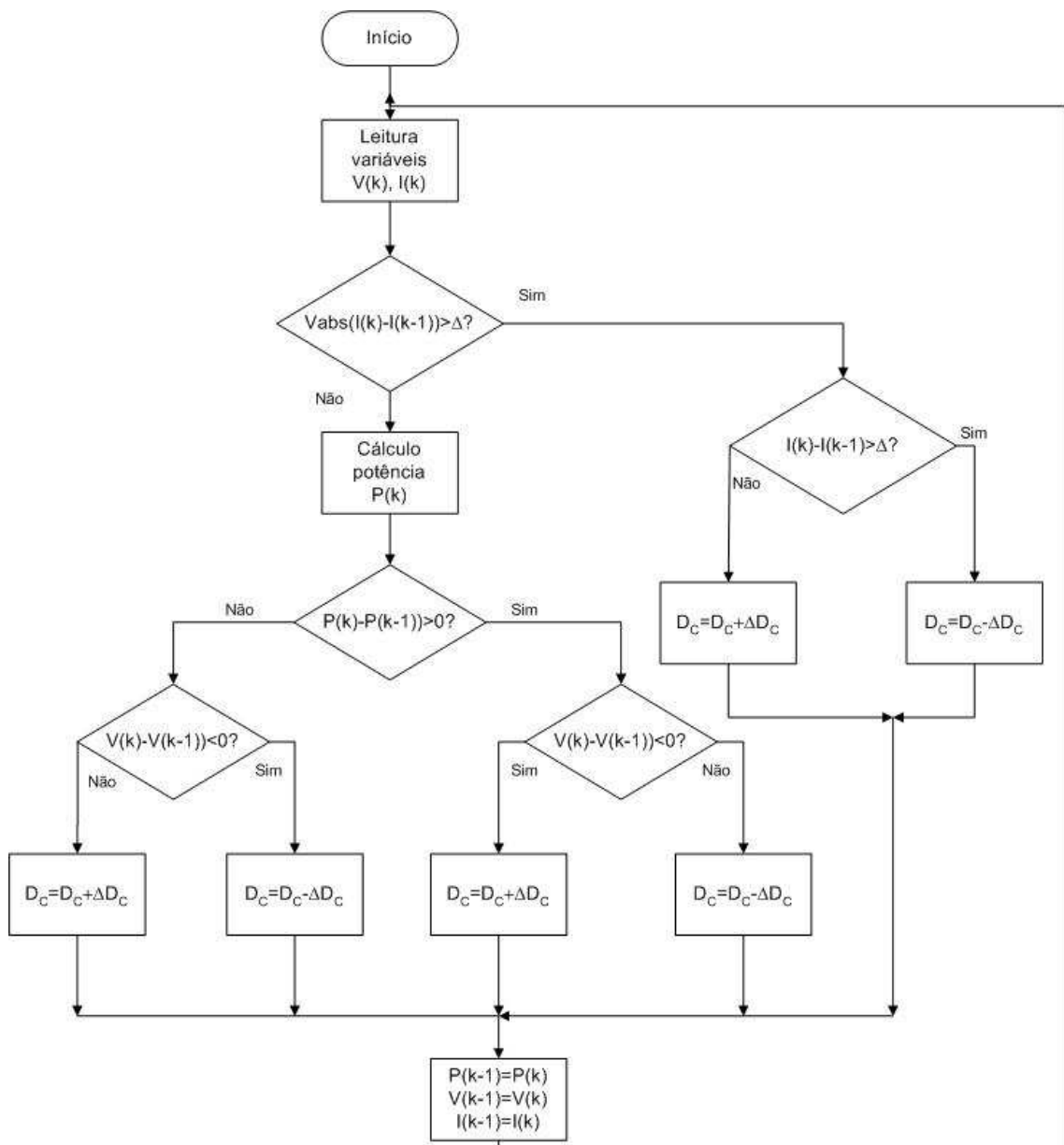


Figura 5.17 Fluxograma do algoritmo implementado.

Inicialmente, verifica-se a ocorrência de mudança de sinal da taxa de variação da corrente. Em caso positivo, verifica-se a ocorrência de aumento da amplitude da corrente superior a um Δi . Conforme o resultado, decrementa-se ou incrementa-se o ciclo de trabalho. Com esta análise do sinal da taxa de variação de corrente atende-se ao fator preponderante que é a irradiação. Caso não tenha ocorrido mudança de sinal da taxa de variação da corrente, calcula-se a nova potência e verifica-se a ocorrência de aumento da amplitude da potência superior a um Δp . Conforme o resultado, decrementa-se ou incrementa-se o ciclo de trabalho, após avaliação da tensão. Com a análise da potência e da tensão atende-se as variações de temperatura (HUA e LIN, 2003).

Esta variante otimiza o funcionamento do algoritmo do SPM em termos da minimização das oscilações em torno do ponto de potência máxima e da dinâmica para variações rápidas das condições atmosféricas.

A partir dos resultados da simulação do sistema é realizada a validação do estudo com base na eficiência do algoritmo de máxima transferência de potência, como definido a seguir (HOHM e ROPP, 2003):

$$\eta_{mtp} = \frac{\int_0^t P_{saída}(t) dt}{\int_0^t P_{máxima}(t) dt} \quad [5.24]$$

em que:

- η_{mtp} - eficiência do conversor com máxima transferência de potência;
- $P_{saída}$ - potência de saída do gerador fotovoltaico para uma determinada irradiação e temperatura. ;
- $P_{máxima}$ - potência máxima de saída para uma determinada irradiação e temperatura.

Outros parâmetros podem ser também observados no estudo comparativo, tais como, resposta transitória, desempenho do conversor eletrônico, tempo de processamento dos algoritmos, etc.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Gerador Fotovoltaico sem e com Seguidor de Potência Máxima

Os resultados do estudo comparativo do gerador fotovoltaico acoplado a uma carga resistiva sem e com SPM, por meio de simulação, são apresentados a seguir. Neste estudo foi utilizado o modelo de gerador fotovoltaico que incorpora as resistências série e paralela em Condição Nominal de Operação – CNO (modelo C2) e os parâmetros para simulação apresentados no Capítulo 2. O programa do SPM calcula para cada ponto de irradiação e de temperatura os valores da tensão e corrente do ponto de potência máxima. Os resultados da simulação do gerador acoplado diretamente a uma carga resistiva com valor igual a 3Ω e acoplado por meio do SPM são apresentados nas Figuras 5.18 a 5.22. A Figura 5.18 apresenta as tensões do gerador fotovoltaico sem e com SPM. Como pode ser observado a tensão do gerador sem SPM alcançou o valor máximo de 12 V, enquanto com SPM a tensão do gerador permaneceu na faixa de 16 a 18 V, próximo do valor da tensão do ponto de potência máxima. A Figura 5.19 apresenta as correntes do gerador fotovoltaico sem e com SPM. Como pode ser observado houve um pequeno decréscimo na corrente com SPM, tendendo ao valor do ponto de potência máxima.

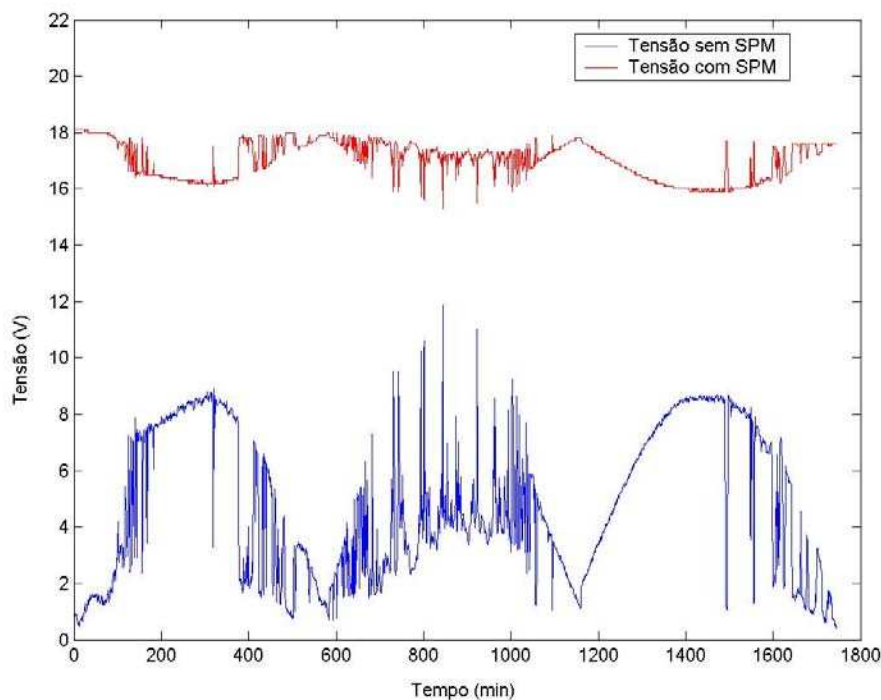


Figura 5.18 Tensão do gerador sem e com SPM.

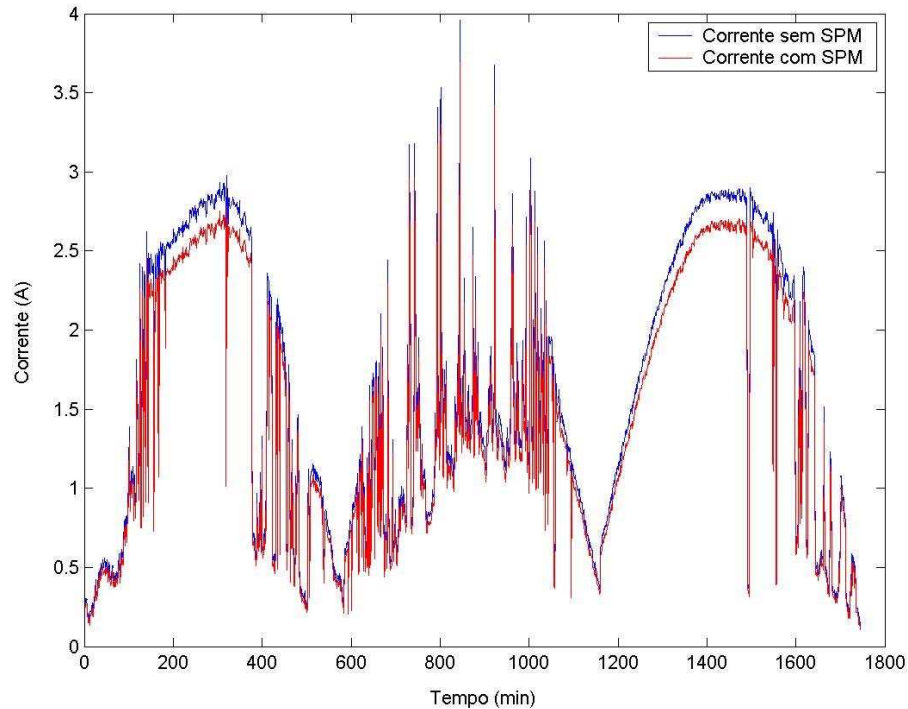


Figura 5.19 Corrente do gerador sem e com SPM.

A Figura 5.20 apresenta as potências do gerador sem e com SPM. Como pode ser observado a potência do gerador sem SPM alcançou o valor de no máximo 25 W, enquanto com SPM a potência do gerador permaneceu sempre no ponto de potência máxima. A eficiência em relação aos pontos de potência máxima, apresentada na Figura 5.21, evidencia este fato, pois a eficiência em relação aos pontos de potência máxima para o gerador sem SPM alcançou no máximo 60%, enquanto com o SPM a eficiência foi de 100%. O ganho de potência com SPM, apresentado na Figura 5.22, é sempre maior que a unidade e para baixos níveis de irradiação pode chegar próximo a 40. Para uma melhor visualização do SPM, são apresentadas nas Figuras 5.23 e 5.24 as curvas tensão-corrente e tensão-potência, respectivamente, e os pontos de funcionamento sem e com SPM. As curvas foram obtidas utilizando o modelo C1 em CPT. Os parâmetros da simulação do modelo foram estimados no Capítulo 4. Pode ser observado que os pontos de funcionamento com SPM estão localizados no joelho das curvas, evidenciando o funcionamento do SPM nos pontos de potência máxima, enquanto sem SPM os pontos de funcionamento estão localizados na região em que o gerador se comporta como uma fonte de corrente, com a tensão não ultrapassando o valor de 12 V.

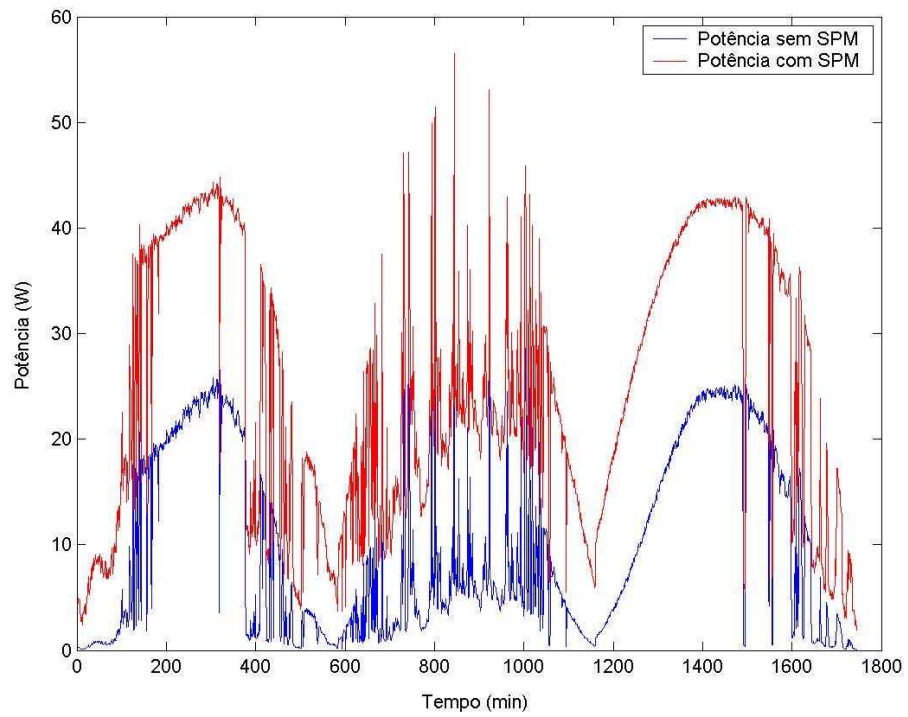


Figura 5.20 Potência no gerador sem e com SPM.

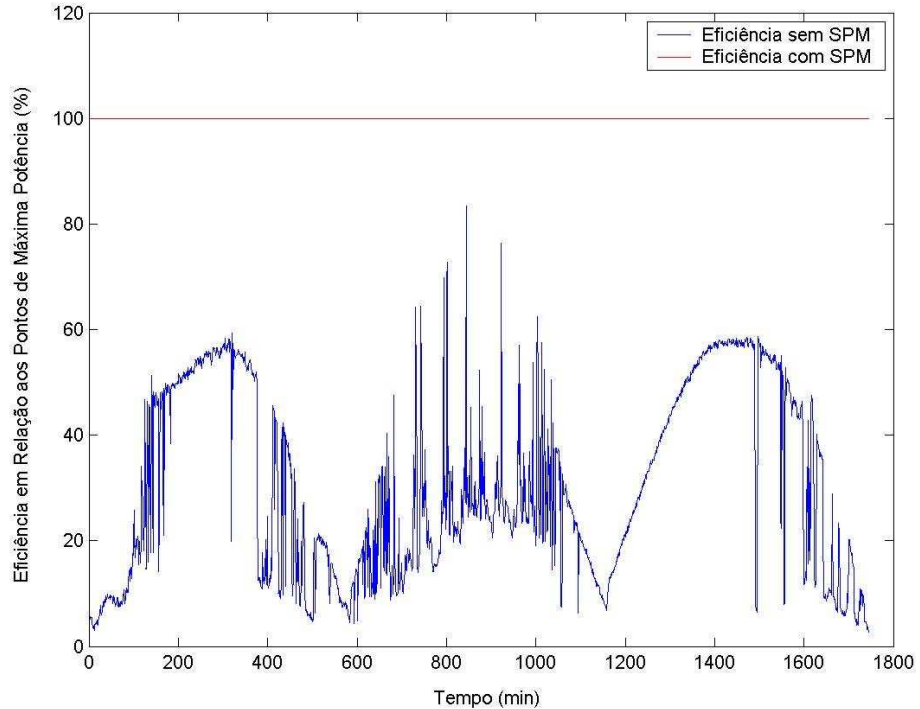


Figura 5.21 Eficiência em relação aos pontos de máxima potência sem e com SPM.

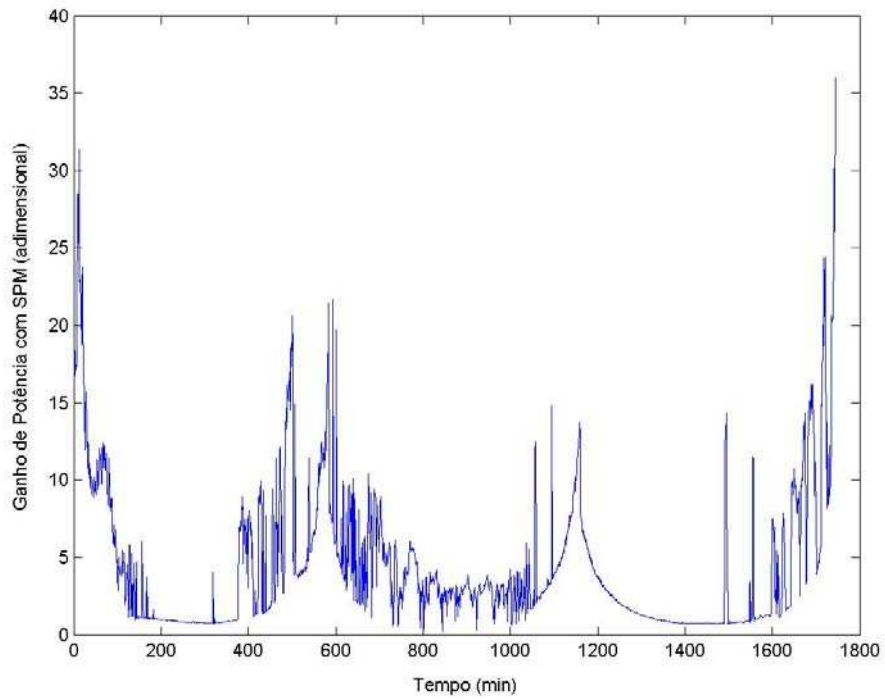


Figura 5.22 Ganho de potência com o SPM.

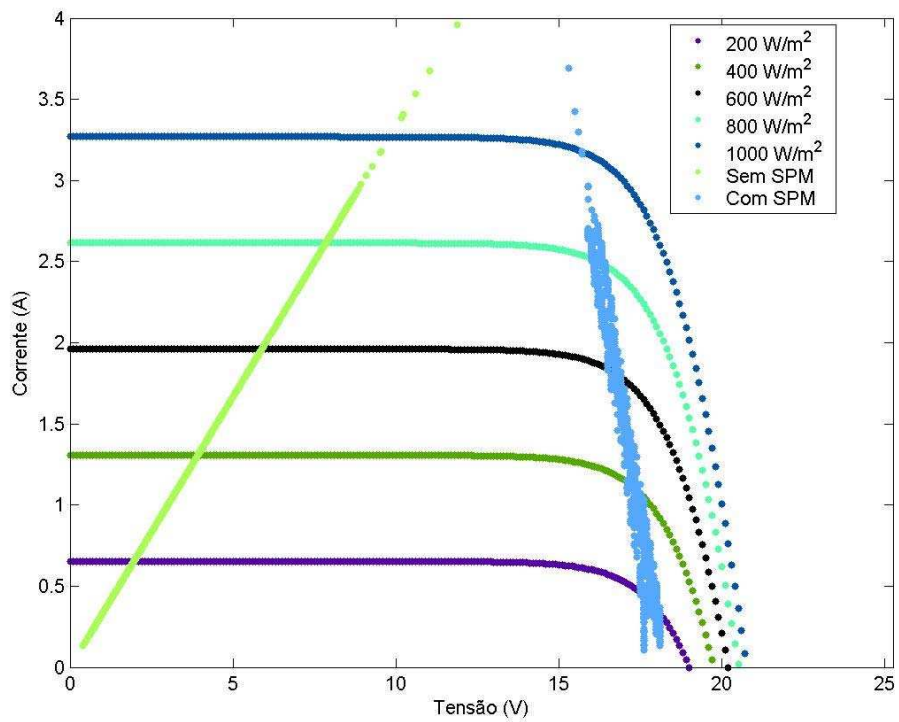


Figura 5.23 Curvas características tensão-corrente parametrizadas em função da irradiação e pontos de funcionamento sem e com SPM para a Condição Padrão de Teste - CPT.

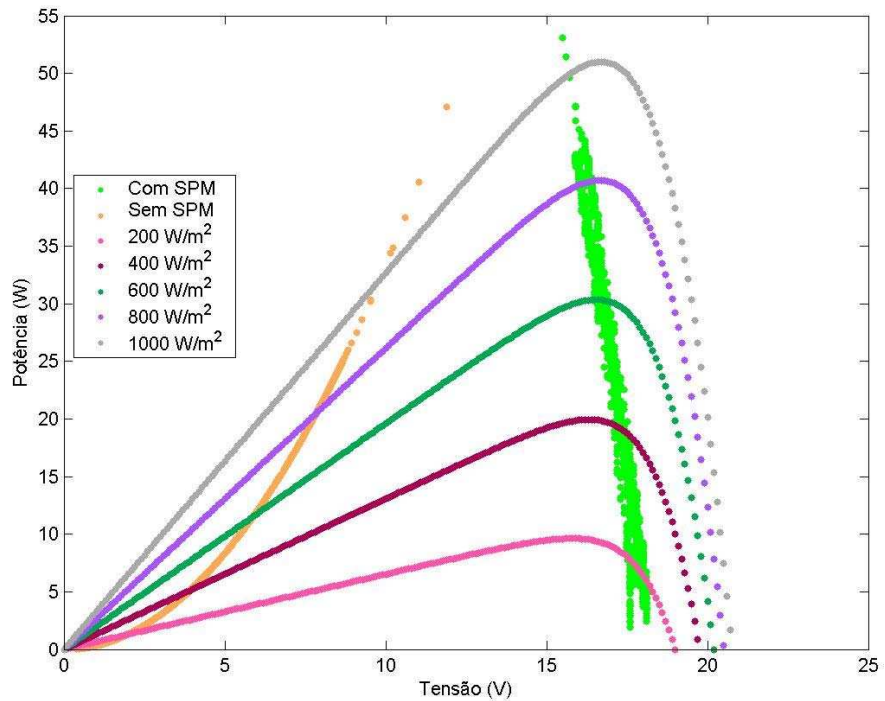


Figura 5.24 Curvas características tensão-potência parametrizadas em função da irradiação e pontos de funcionamento sem e com SPM para Condição Padrão de Teste - CPT.

Para evidenciar a influência da temperatura no funcionamento do SPM, as Figuras 5.25 e 5.26 apresentam as curvas características tensão-corrente e tensão-potência, respectivamente, em Condição Nominal de Operação – CNO e os pontos de funcionamento sem e com SPM. Como pode ser observado, os pontos de potência máxima nas curvas características tensão-corrente e tensão-potência, tanto para a CPT, quanto para a CNO, não refletem em sua totalidade, o funcionamento do gerador fotovoltaico com SPM. Isto se deve à variação de temperatura do gerador fotovoltaico. A CPT não reflete esta dinâmica; já a CNO reflete esta dinâmica da temperatura, mas é dependente da irradiação. Se ocorrer variações rápidas de irradiação a resposta do modelo não é adequada. Como a influência da temperatura é preponderante na tensão de circuito aberto, o algoritmo do SPM deve incorporar a avaliação da amplitude da tensão e, se possível, de mudanças de sinal da taxa de variação da tensão.

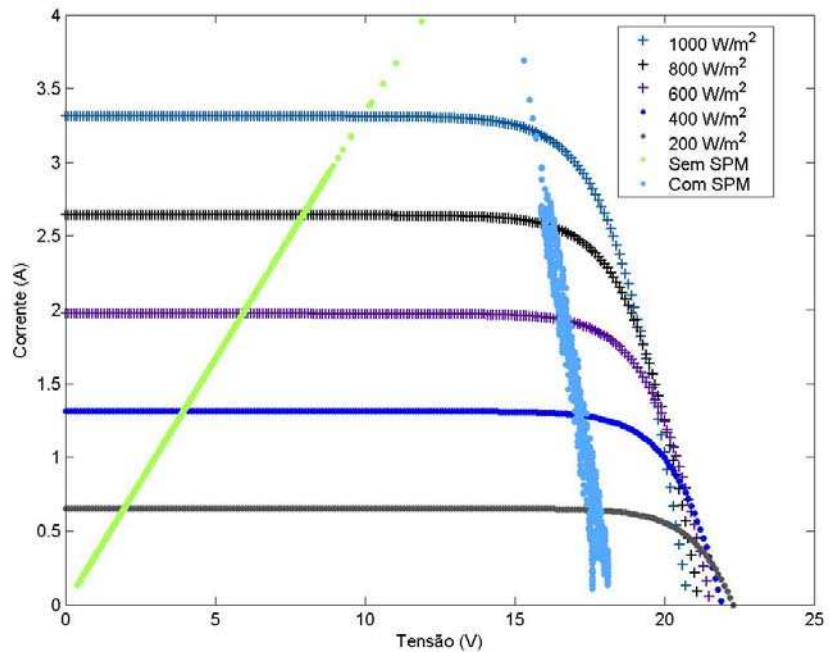


Figura 5.25 Curvas características tensão-corrente parametrizadas em função da irradiação e pontos de funcionamento sem e com SPM para Condição Nominal de Operação – CNO.

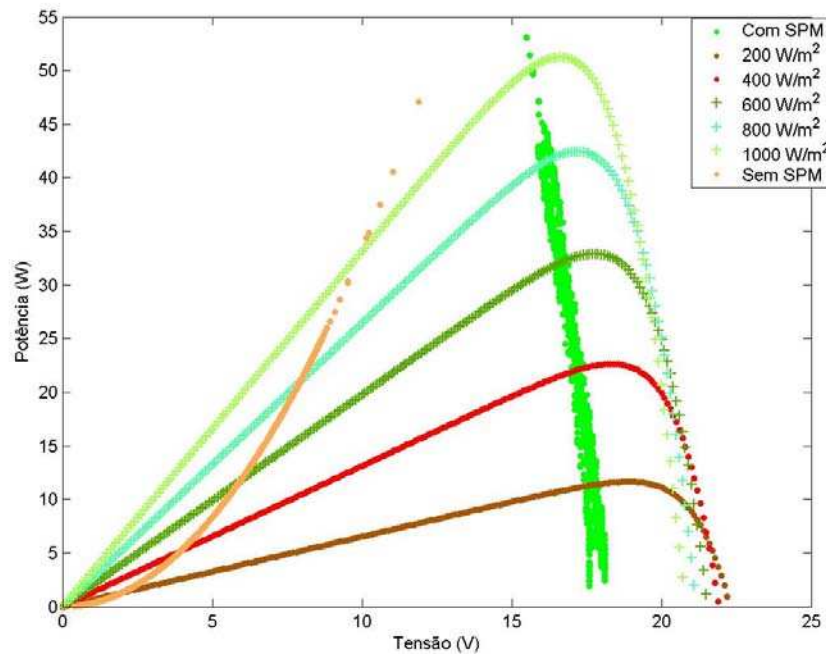


Figura 5.26 Curvas características tensão-potência parametrizadas em função da irradiação e pontos de funcionamento sem e com SPM para Condição Nominal de Operação – CNO.

5.3.2 Protótipo do Seguidor de Potência Máxima

O sistema completo do seguidor de potência máxima é composto do gerador fotovoltaico, sensor de tensão, sensor de corrente, condicionadores de sinais, sistema de desenvolvimento (portas de entrada, conversor analógico/digital, algoritmo de máxima transferência de potência e modulador por largura de pulso), acionador do chaveador, conversor eletrônico e carga resistiva. A estrutura de potência consiste de um conversor cc-cc abaixador de tensão.

O sistema possui duas realimentações, sendo a corrente e tensão do gerador fotovoltaico. As realimentações de corrente e tensão utilizam sensores de efeito Hall. Os sinais realimentados são condicionados e lidos pelos conversores analógico/digital do microcontrolador HC08. A saída de Modulação por Largura de Pulso – MLP do HC08 alimenta o acionador do chaveador, que consiste de um Transistor Bipolar com Porta Isolado - IGBT. As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam o diagrama elétrico e uma fotografia do seguidor de potência máxima, respectivamente.

Os algoritmos implementados no microcontrolador possuem um sistema de partida lenta para minimizar a corrente de partida. O sistema é inicializado com uma tensão de referência mínima de forma a produzir uma largura de pulso mínima para acionar o transistor e minimizar a corrente de partida no conversor abaixador.

As etapas de implementação do algoritmo e o funcionamento do sistema são apresentadas a seguir. A leitura das variáveis tensão e corrente do gerador fotovoltaico é realizada por meio de sensores de tensão e corrente de efeito Hall. A utilização de sensores de efeito Hall permite o isolamento do circuito de potência do circuito de controle e comando. Estes sinais são filtrados e amplificados por meio dos condicionadores de sinais e são lidos por dois conversores analógico/digital do microcontrolador. Os conversores trabalham com uma taxa de amostragem de 4 vezes a frequência máxima dos sinais de entrada.

O algoritmo de máxima potência detecta a variação da irradiação solar por meio da variação da corrente. Caso ocorra uma variação da irradiação solar, que é detectada pelo valor absoluto da leitura de corrente atual menos a

leitura de corrente no instante anterior – período de amostragem, e este valor for maior que um determinado Δ de corrente, determina-se um aumento ou diminuição da corrente (irradiação). No caso de aumento ou diminuição da corrente, gera-se um novo ciclo de trabalho do modulador por largura de pulso e o ciclo do algoritmo reinicia-se.

A variação da temperatura do gerador tem influência maior na tensão. Para compensar esta influência, após a observação da potência, a tensão do gerador é avaliada.

Caso ocorra uma variação da irradiação solar, calcula-se a potência atual, e verifica-se a ocorrência de variação de potência. Se a variação de potência for positiva, verifica-se a ocorrência de variação da tensão no gerador. Caso a tensão diminua, incrementa-se o ciclo de trabalho e o algoritmo reinicia-se. Caso contrário, decrementa-se o ciclo de trabalho.

Sendo a variação de potência negativa, verifica-se a ocorrência de variação da tensão. Caso a tensão diminua, decrementa-se o ciclo de trabalho e o algoritmo reinicia-se. Caso contrário, incrementa-se o ciclo de trabalho.

A Modulação por Largura de Pulso - MLP foi implementada digitalmente de forma a permitir a máxima transferência de potência entre o gerador e a carga. O microcontrolador HC08 possui um pino de saída com MLP. Esta modulação é implementada por meio do temporizador do HC08. A frequência de chaveamento foi estabelecida em 25 kHz. Com esta frequência tem-se a redução dos componentes reativos e ausência de ruído audível.

O pino de saída do modulador por largura de pulso do HC08 atua no circuito acionador do chaveador. Geralmente, há a necessidade de adaptação do pulso de comando gerado pelo sistema ao chaveador. Esta adaptação, que é realizada pelo circuito acionador, consiste de isolamento, amplificação e proteções.

A necessidade de filtragem dos sinais a serem realimentados, ou seja, tensão e corrente do gerador fotovoltaico e o filtro de saída do conversor abaixador tornam a dinâmica do sistema lenta. Desta forma para variações rápidas de irradiação os algoritmos devem ser otimizados de forma a minimizar os atrasos inerentes ao circuito.

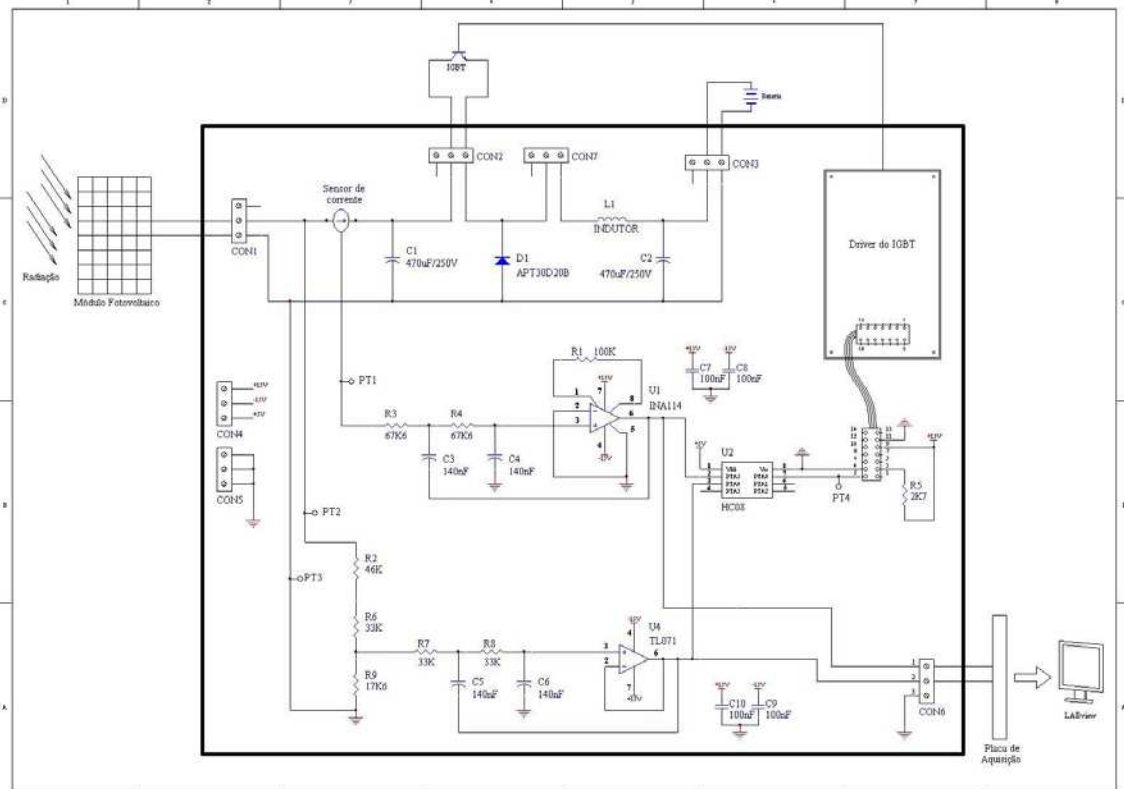


Figura 5.27 Diagrama elétrico do seguidor de potência máxima.

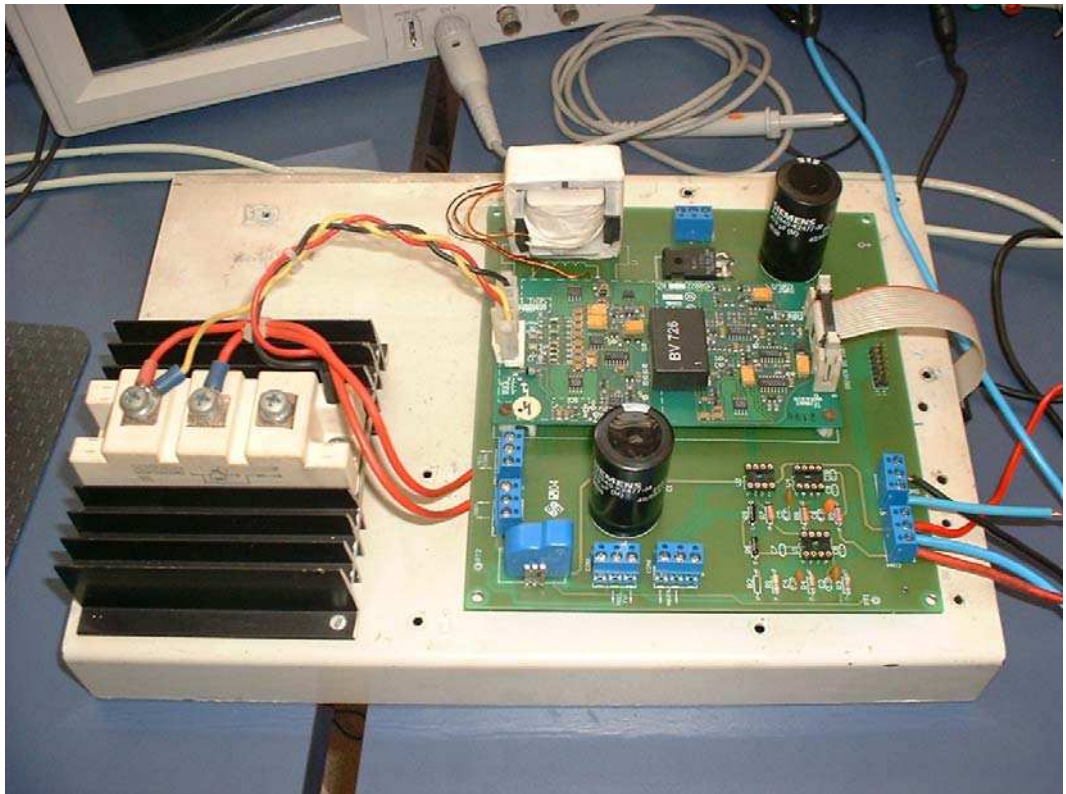


Figura 5.28 Fotografia do protótipo do seguidor de potência máxima.

5.3.3 Monitoramento e Análise

Com a implantação do algoritmo de máxima transferência de potência no microcontrolador HC08 do seguidor de potência máxima, foi montada a bancada para monitoramento e análise de desempenho, apresentada na Figura 5.29. A bancada consiste de: gerador fotovoltaico, sensores de irradiação, sensores de tensão e corrente, condicionadores de sinais, seguidor de potência máxima e carga resistiva. Nas medições das variáveis atmosféricas foi utilizada a estação meteorológica WMR918 da Oregon Cientific®. Para a medição da temperatura do gerador fotovoltaico foram utilizados termopares tipo K e um módulo de aquisição de dados da ADAM® e um conversor 485/232. O sistema utilizado no monitoramento da irradiação e das variáveis elétricas consistiu de uma placa de aquisição de dados PCI-6024E da National Instruments® e o programa para monitoramento foi desenvolvido utilizando a plataforma LABVIEW®, também, da National Instruments®.

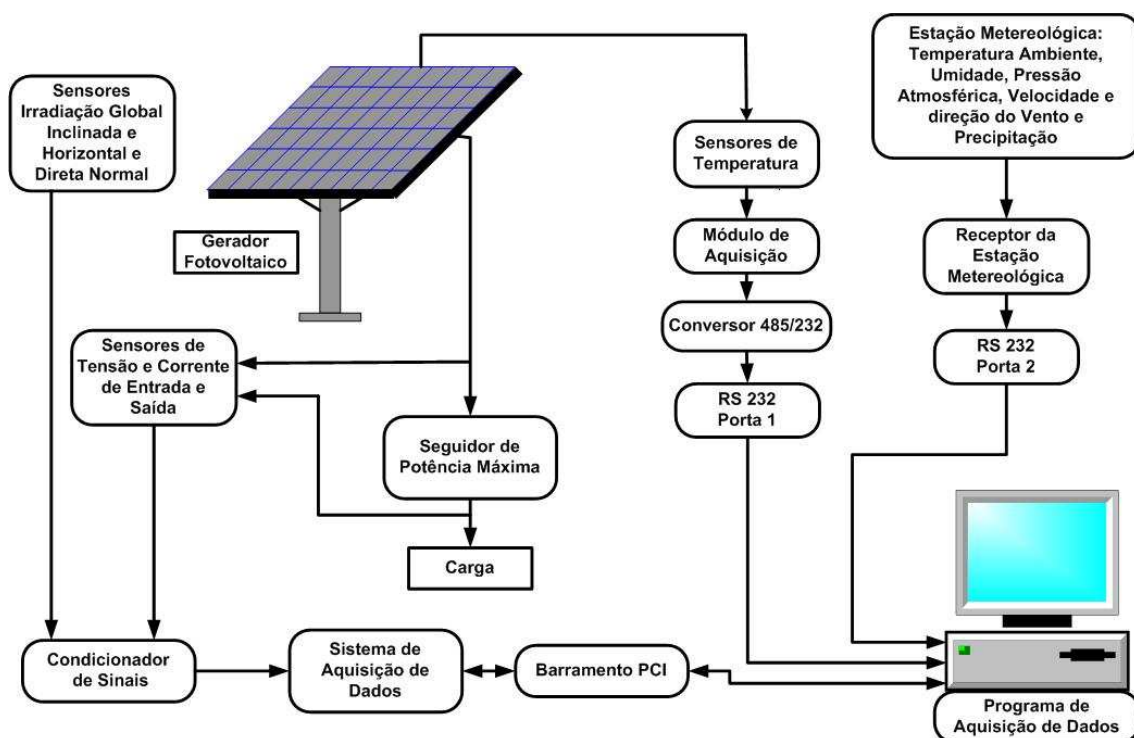


Figura 5.29 Diagrama da bancada de monitoramento e análise de desempenho do seguidor de potência máxima.

São apresentados a seguir os resultados do monitoramento, análise de desempenho do Seguidor de Potência Máxima - SPM e estudo comparativo. Os parâmetros utilizados na simulação para a realização do estudo comparativo são apresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 Parâmetros da carga e gerador fotovoltaico.

Resistência de carga – R (Ω)	2,55
Corrente de curto-circuito em CPT - I_{CCR} (A)	3,27
Tensão de circuito aberto em CPT - V_{CAR} (V)	22,5
Corrente de saturação reversa - I_{01} (A)	$19,5 \times 10^{-9}$
Resistência paralela - R_P (Ω)	8869
Resistência série – R_S (Ω)	0,35
Fator de idealidade do diodo de difusão – n_1	1,18
Coefficiente de temperatura de I_{CCR} - KT_{ICCR} ($A/^\circ C$)	0,0025
Coefficiente de temperatura da V_{CAR} - KT_{VCAR} ($V/^\circ C$)	-0,097
Temperatura de operação nominal da célula - TONC	36,0

Durante a realização do monitoramento o Sol encontrava-se encoberto, com níveis de irradiação direta normal abaixo de 100 W/m^2 . A irradiação global inclinada e global horizontal são devidas à irradiação difusa, com níveis em torno de 600 e 400 W/m^2 , respectivamente. A Figura 5.30 apresenta as irradiações solares monitoradas. A temperatura do gerador fotovoltaico durante a realização do monitoramento foi igual a $42,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$. A partir dos parâmetros do gerador e da carga e dos dados de irradiação e temperatura, o sistema foi simulado sem e com SPM. Os resultados do monitoramento do SPM são apresentados em conjunto com os resultados da simulação nas Figuras 5.30 a 5.36. As correntes e tensões do gerador são apresentadas nas Figuras 5.31 e 5.32, respectivamente, sendo elas: resultado da simulação sem SPM, resultado da simulação com SPM e resultado prático monitorado com SPM. Como pode ser observado houve um pequeno decréscimo na corrente do gerador com SPM, quando comparado com a simulação sem SPM. O valor tende ao da corrente do ponto de potência máxima, confirmando os resultados obtidos anteriormente. A simulação com SPM e o resultado experimental com SPM apresentaram uma boa concordância, conforme a Figura 5.31.

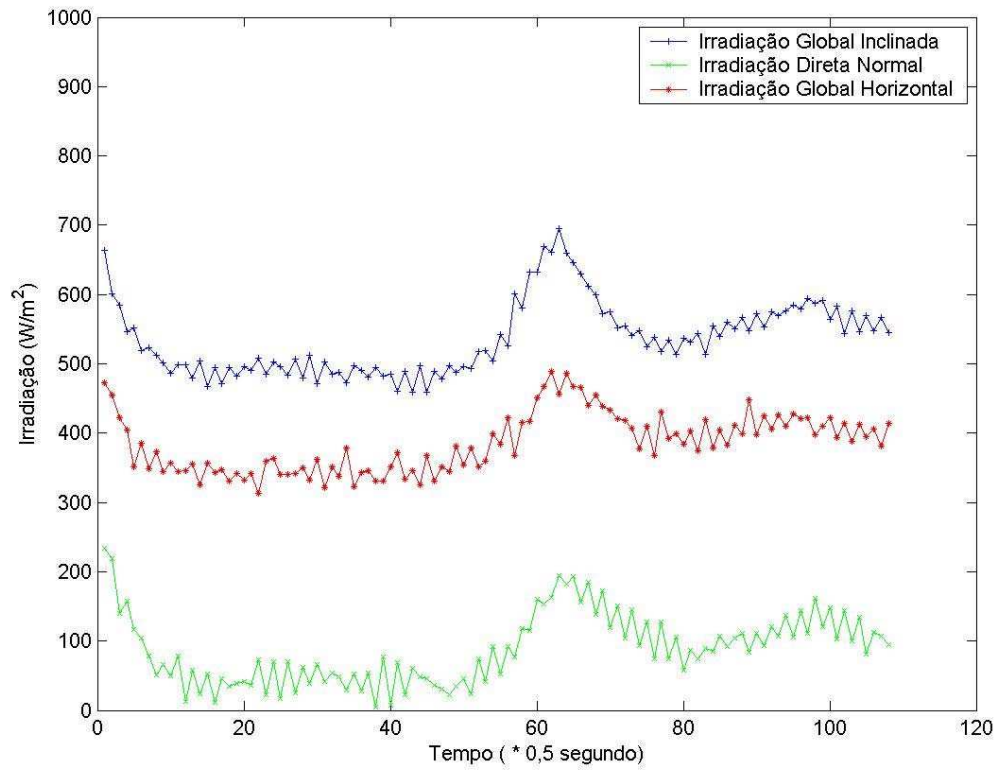


Figura 5.30 Perfis de irradiação solar monitorados

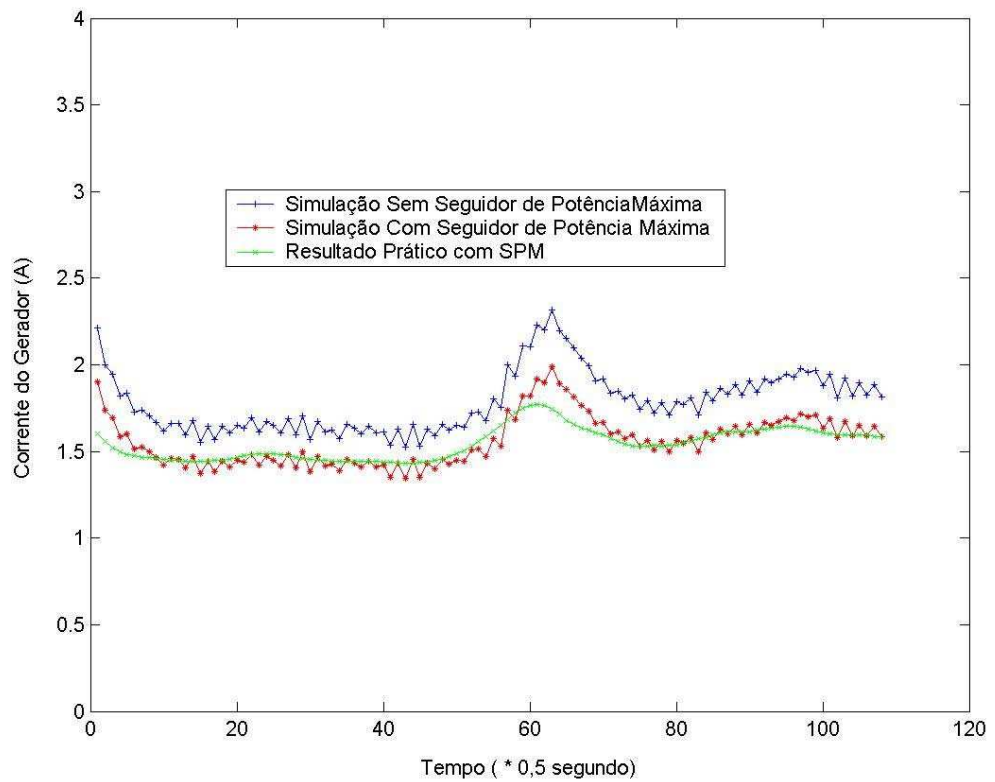


Figura 5.31 Formas de onda da corrente do gerador fotovoltaico.

Já o resultado experimental da tensão do gerador com SPM quando comparado com o resultado da simulação com SPM, não apresentaram uma boa concordância, conforme a Figura 5.32. Houve um acréscimo substancial, da ordem de 10 V, quando comparada ao valor da tensão na simulação sem SPM, tendendo ao valor da tensão do ponto de potência máxima. Pode ser observado, também, que com o aumento da irradiação global inclinada, de aproximadamente 500 W/m^2 para 700 W/m^2 , ocorreu um aumento da tensão.

As Figuras 5.33 e 5.34 apresentam as potências do gerador fotovoltaico e as eficiências em relação ao ponto de potência máxima, respectivamente. Como pode ser observado, o algoritmo apresentou uma eficiência em torno de 80%, enquanto sem SPM a eficiência foi em torno de 30%, ocorrendo um aumento de aproximadamente 50% na eficiência. Com o aumento da irradiação, acima de 700 W/m^2 , a eficiência do algoritmo ultrapassou 90%.

O algoritmo não respondeu adequadamente para níveis de irradiação abaixo de 700 W/m^2 . A corrente apresentou boa concordância, já a tensão, que sofre uma influência maior da temperatura, ficou aproximadamente 3,0 V abaixo do valor do ponto de potência máxima.

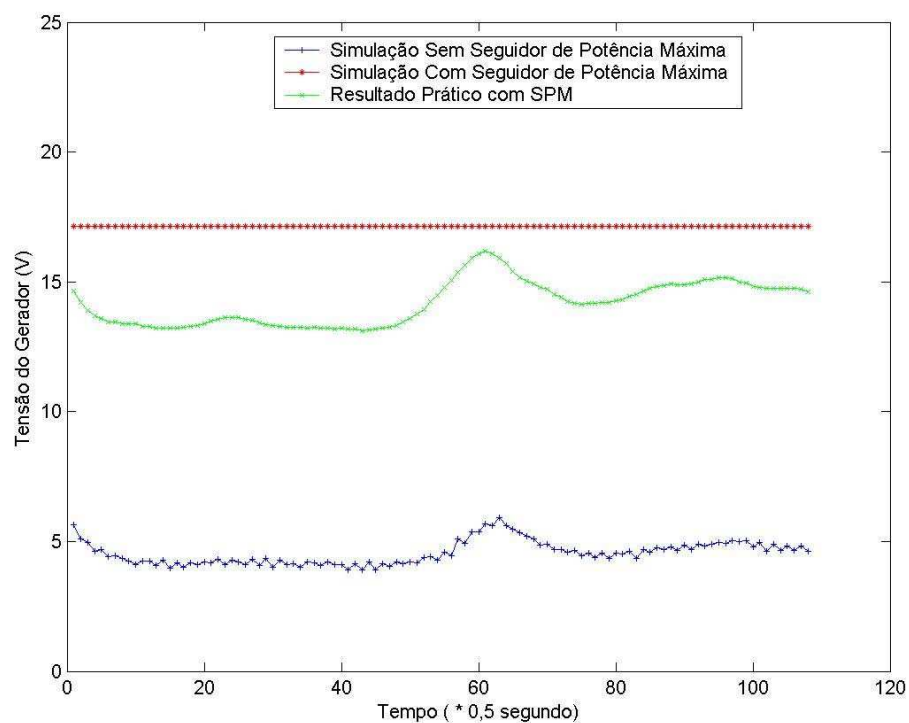


Figura 5.32 Formas de onda da tensão do gerador fotovoltaico.

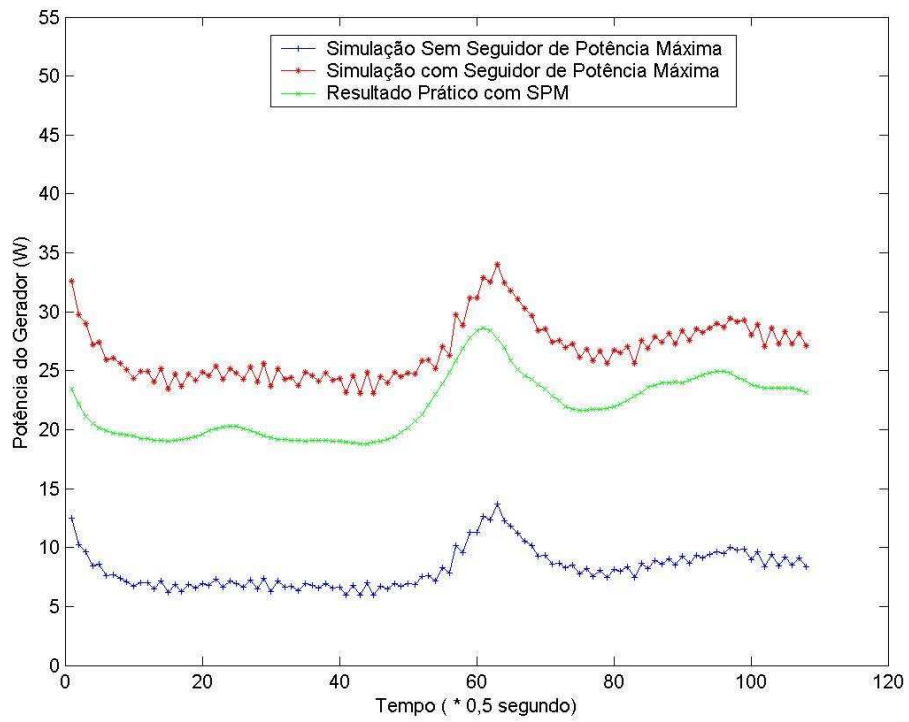


Figura 5.33 Formas de onda da potência do gerador fotovoltaico.

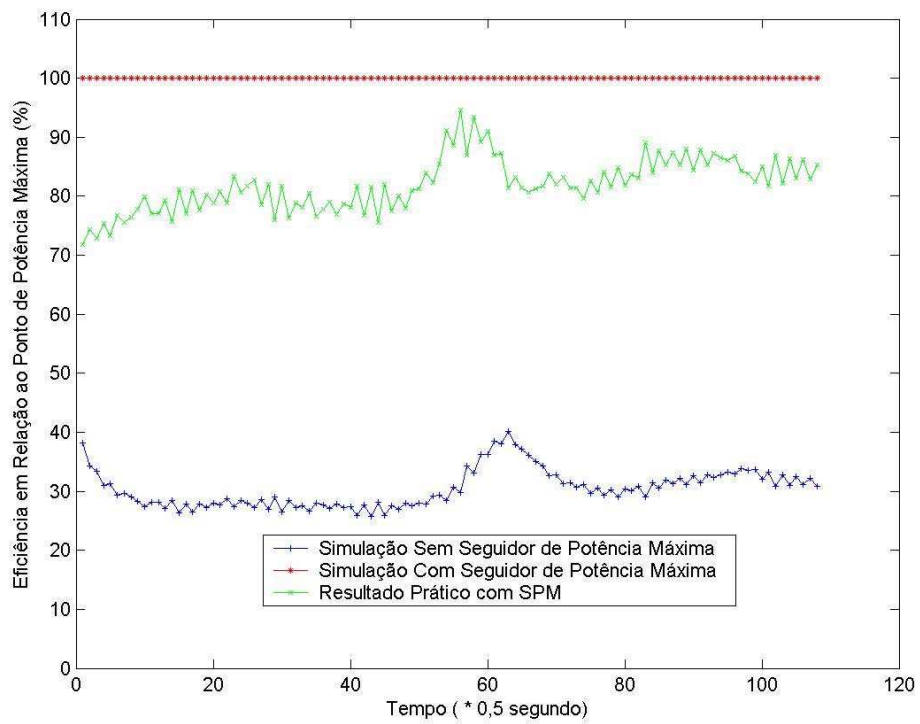


Figura 5.34 Curvas de eficiências em relação aos pontos de potência máxima.

Para uma melhor visualização dos resultados do SPM, são apresentadas nas Figuras 5.35 e 5.36 as curvas características tensão versus corrente e tensão versus potência, respectivamente, e os pontos de funcionamento com SPM. Como demonstrado pelas curvas de eficiência, Figura 5.34, o SPM trabalha próximo dos pontos de potência máxima, alcançando no máximo 90% de eficiência.

Pode ser observado que os pontos de funcionamento com SPM estão localizados próximos do joelho das curvas, evidenciando o funcionamento do SPM nos pontos de potência máxima. Os pontos de funcionamento encontram-se entre as curvas características referentes a 400 W/m^2 e 600 W/m^2 . No entanto a irradiação global inclinada medida ultrapassa o valor de 600 W/m^2 . Esta diferença pode ser explicada pelo modelo utilizado na simulação. O modelo consistiu do C1 em Condição Padrão de Teste - CPT.

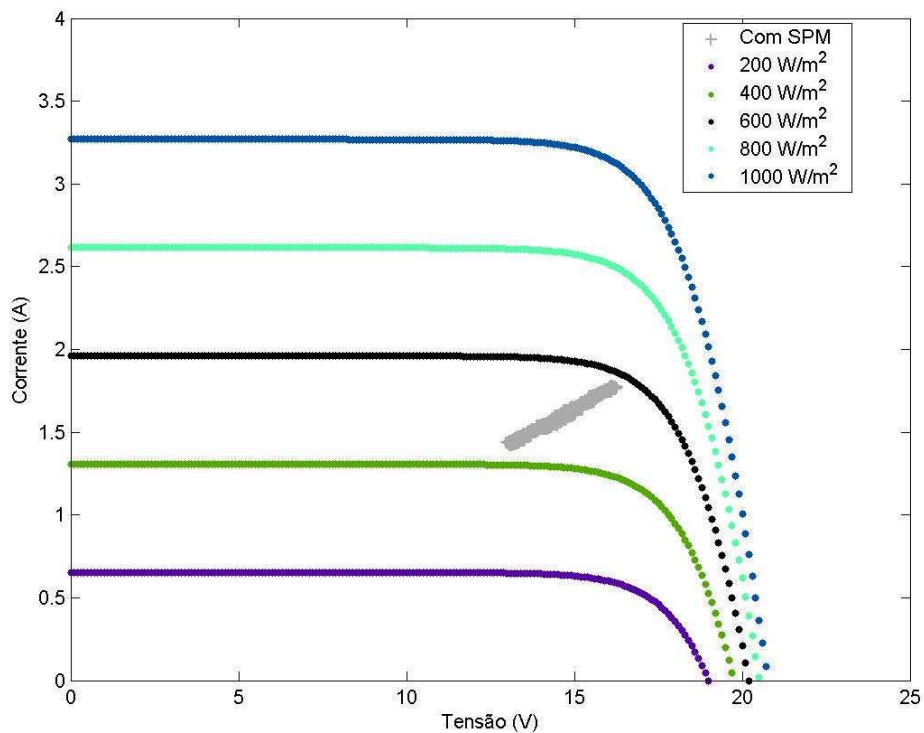


Figura 5.35 Curvas características tensão versus corrente e pontos de funcionamento com seguidor de potência máxima.

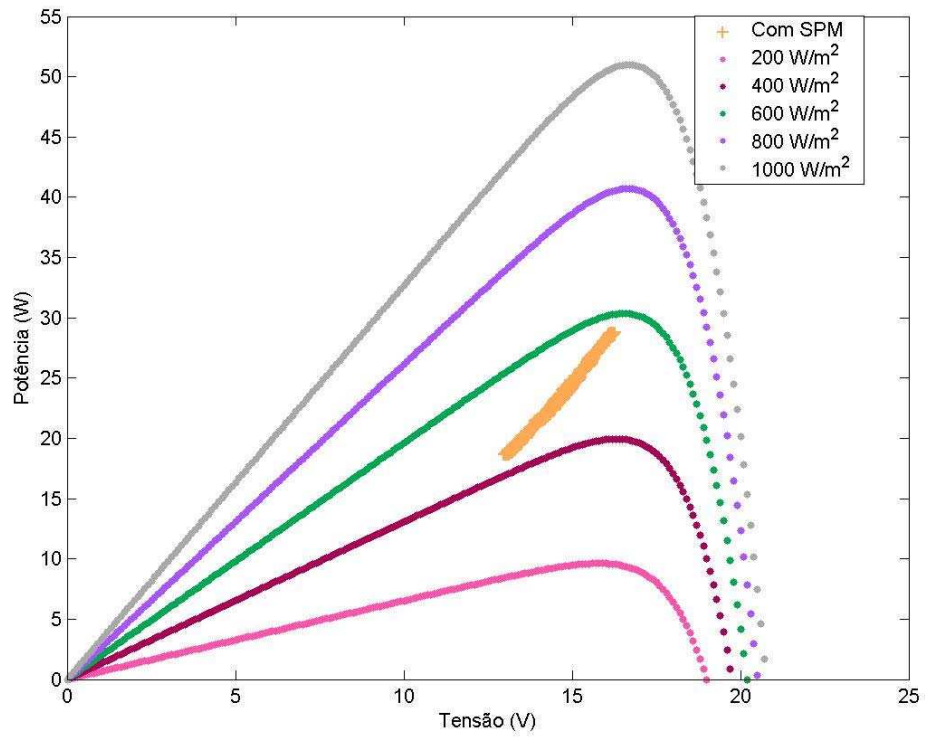


Figura 5.36 Curvas características tensão versus potência e pontos de funcionamento com seguidor de potência máxima.

5.4 CONCLUSÃO

Os resultados do estudo comparativo por meio de simulação do gerador fotovoltaico acoplado a uma carga resistiva, de valor igual a 3Ω , sem e com Seguidor de Potência Máxima - SPM foram apresentados. No estudo foi utilizado o modelo de gerador fotovoltaico que incorpora as resistências série e paralela em Condição Nominal de Operação – CNO e os parâmetros para simulação apresentados no Capítulo 2. Os resultados obtidos com a simulação permitem observar uma elevação substancial da tensão do gerador e uma pequena diminuição da corrente do gerador com o seguidor de potência máxima. Estas variações de corrente e tensão tendem aos valores da corrente e tensão do ponto de potência máxima. A eficiência em relação aos pontos de potência máxima, evidencia este fato, pois a eficiência em relação aos pontos de potência máxima para o gerador sem SPM alcançou no máximo 60%, enquanto com o SPM a eficiência foi de 100%. Foram apresentadas, também, as curvas características tensão-corrente e tensão-potência e os pontos de funcionamento sem e com SPM. Como observado, os pontos de potência máxima nas curvas tensão-corrente e tensão-potência não refletem em sua totalidade o funcionamento do gerador com SPM. Isto é devido à variação de temperatura do gerador fotovoltaico; já a condição nominal de operação reflete esta dinâmica da temperatura, Temperatura de Operação Nominal da Célula – TONC, mas dependente da irradiação. Se ocorrer variações rápidas de irradiação a resposta do modelo não é adequada.

Os resultados do monitoramento do seguidor de potência máxima foram apresentados em conjunto com os resultados da simulação do gerador sem e com seguidor de potência máxima. No perfil obtido durante a realização do monitoramento o Sol encontrava-se encoberto, com níveis de irradiação direta normal abaixo de 100 W/m^2 . Como se pôde observar, o algoritmo apresentou uma eficiência em torno de 80%, alcançando no máximo 90% de eficiência, enquanto sem SPM a eficiência foi em torno de 30%, ocorrendo um aumento de aproximadamente 50% na eficiência.

O estudo da técnica de máxima transferência de potência para sistemas fotovoltaicos tem demonstrado o potencial desta técnica para a viabilização econômica de sistemas fotovoltaicos autônomos aplicados à eletrificação rural.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho foram apresentadas duas iniciativas para o desenvolvimento da sustentabilidade técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos aplicados à eletrificação rural. A caracterização de geradores fotovoltaicos e o desenvolvimento de protótipo de seguidor de potência máxima promovem os programas de qualidade de equipamentos e periféricos e maximizam o aproveitamento da energia solar fotovoltaica.

A caracterização de geradores fotovoltaicos consistiu inicialmente do desenvolvimento de modelos e de programas de simulação. Foram investigados os modelos analíticos a parâmetros concentrados, linear de Myers, interpolação, de Anderson e de Blaesser. Os modelos analíticos foram investigados inicialmente, tendo como parâmetros concentrados a corrente foto-gerada, corrente de saturação reversa dos diodos de difusão e recombinação e as resistências série e paralela. As influências das resistências série e paralela e da temperatura nas curvas características foram analisadas. Finalmente, foram investigados os modelos utilizados para avaliação da produção de energia, que utilizam modelos comportamentais e coletas de dados de campo. A partir da modelagem realizada foram desenvolvidos programas de simulação utilizando o MATLAB[®]. Estes programas utilizam os modelos analíticos a circuitos equivalentes a parâmetros concentrados. Todos os modelos foram simulados e a partir dos resultados obtidos foi realizada a definição por um modelo que melhor representasse a característica elétrica do gerador e com menor grau de complexidade. O modelo escolhido foi o que incorpora os seguintes parâmetros concentrados: corrente foto-gerada, diodo

de difusão e resistências série e paralela. Para a análise da dinâmica do modelo foram utilizados perfis de irradiação e de temperatura para a simulação de um gerador fotovoltaico acoplado diretamente a uma carga resistiva de valor igual a $3,0 \Omega$. O resultado da simulação apontou para uma eficiência em relação aos pontos de potência máxima menor que 60%, sendo o valor da eficiência função do valor da carga resistiva.

A segunda etapa na caracterização de geradores fotovoltaicos consistiu do levantamento das curvas características, cujo procedimento desenvolvido mostrou-se eficaz e de fácil execução. Foram realizados dois ensaios que permitiram a análise da repetibilidade de resultados. A variação percentual durante o levantamento das curvas foi de $\pm 1,0\%$ para a irradiação global inclinada, $\pm 2,0\%$ para a irradiação global horizontal e $\pm 2,5\%$ para a irradiação direta normal. Os perfis de temperatura nas partes de trás do Gerador Sob Ensaio – GSE e do Gerador Padrão - GP apresentaram uma variação de temperatura de $9,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e $9,5 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Com esta faixa de variação de temperatura e com a irradiação global inclinada variando menos que $\pm 1,0\%$ durante o ensaio, foi possível a determinação dos coeficientes de temperatura da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito. Os coeficientes calculados para o GSE foram iguais a $-0,0973 \text{ V}/^\circ\text{C}$ e $0,0025 \text{ A}/^\circ\text{C}$ e para o GP foram iguais a $-0,0983 \text{ V}/^\circ\text{C}$ e $0,0026 \text{ A}/^\circ\text{C}$. Como pode ser observado os erros percentuais foram menores que $\pm 2,0\%$.

A última etapa na caracterização dos geradores consistiu da estimação dos parâmetros do modelo selecionado a partir do levantamento das curvas características. Inicialmente, foram estimados os parâmetros do modelo dos geradores fotovoltaicos e a estimação foi validada por meio de estudo comparativo com os resultados de ensaios realizados pelo fabricante e por um laboratório nacional e um internacional. Os erros percentuais obtidos com este estudo foram menores que $5,0\%$. Na estimação de parâmetros a maior discrepância encontrada foi na resistência paralela do GSE e GP. Esta discrepância pode ser explicada devido a baixa sensibilidade do modelo à resistência paralela e devido ao algoritmo utilizado para a estimação de parâmetros, cujos critérios de convergência são dependentes das condições iniciais impostas aos parâmetros.

A segunda iniciativa, que consistiu do desenvolvimento do Seguidor de Potência Máxima – SPM, foi realizada tendo como ponto de partida os resultados da caracterização dos geradores fotovoltaicos. Com o modelo do gerador e com os parâmetros estimados foi realizado um estudo comparativo, por meio de simulação, do gerador fotovoltaico acoplado a uma carga resistiva de valor igual a 3Ω , sem e com SPM. A eficiência em relação aos pontos de potência máxima para o gerador sem SPM alcançou no máximo 60%, enquanto com SPM a eficiência foi de 100%. Foram realizados, a seguir, o projeto e montagem do protótipo do SPM e a montagem de uma bancada para o seu monitoramento. O objetivo foi a análise da eficiência do algoritmo de máxima transferência de potência. A eficiência obtida foi em torno de 80%, alcançando um máximo de 90%, enquanto sem SPM a eficiência foi em torno de 30%, ocorrendo um aumento de aproximadamente 50% na eficiência com o SPM. Os resultados obtidos demonstram o potencial desta tecnologia para a viabilização econômica de sistemas fotovoltaicos autônomos aplicados à eletrificação rural.

Para a realização de trabalhos futuros são apresentadas as seguintes sugestões:

1. Cálculo e análise das incertezas nas medições realizadas durante o levantamento das curvas características;
2. Estudo de novas técnicas de identificação de sistemas e estimação de parâmetros, tais como, redes neurais e lógica nebulosa;
3. Estudo dos conversores elevador de tensão e abaixador e elevador de tensão aplicados à máxima transferência de potência em geradores fotovoltaicos;
4. Estudo comparativo e otimização dos algoritmos de máxima transferência de potência;
5. Análise da disponibilidade energética de um sistema fotovoltaico autônomo sem e com seguidor de potência máxima;
6. Análise econômica do protótipo desenvolvido.

BIBLIOGRAFIA

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, Brasília, 153 p., 2002.
- ARAKI, K., YAMAGUCHI, M., Novel Equivalent Circuit Model and Statistical Analysis in Parameters Identification, Solar Energy Materials & Solar Cells, 75, 2003, 457-466, Elsevier Science Ltd.
- ASTM E1036M-96: Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells, 1996.
- BLAS, M. A., TORRES, J. L., PRIETO, E., GARCÍA, A., Selecting a Suitable Model for Characterizing Photovoltaic Devices, Renewable Energy, 25, 2002, 371-380, Elsevier Science Ltd.
- CASTAÑER, L., SILVESTRE, S., Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice, 358 p., 2002, John Wiley & Sons, England.
- CHETTY, P.R.K., Switch-Mode Power Supply Design, TAB Books, 1986.
- CURVE FITTING TOOLBOX, User's Guide, Version 1, The MathWorks, 2002.
- DINIZ, A. S. A. C., FRANÇA, E. D., TOMÉ, J. L., CARVALHO, F. W., BORGES, D., CANARA, C. F., An Utility's Photovoltaic Commercialization Initiative: Progress of the Luz Solar Program for Rural Electrification, Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth, IEEE, 1476 –1480, 2002.

- DORF, R. C., BISHOP, R. H., Sistemas de Controle Modernos, Addison Wesley Longman, 1998.
- ERICKSON, R. W., Fundamental of Power Electronics, Chapman & Hall, 1997.
- FREESCALE; disponível em: <<http://freescale.com>>, acesso em: 10/03/06.
- GOETZBERGER, A., LUTHER, J., WILLEKE, G., Solar cell: past, present, future, Solar Energy Material & Solar Cells, 74, 2002, 1-11, Elsevier.
- GOW, J. A., MANNING, C. D., Development of a Photovoltaic Array Model for use in Power Electronics Simulation Studies, IEE Proc. – Electr. Power Appl., Vol. 146, N. 2, March, 1999.
- GREEN, MARTIN A., Solar Cells, Operating Principles, Technology and System Applications, Prentice-Hall International, 1982.
- GREEN, MARTIN A., Third Generation Photovoltaics: Ultra-high Conversion Efficiency at Low Cost, Progress in Photovoltaics: Res. and Appl., 9, 2, 2001, 123-135, John Wiley & Sons.
- HADI, H., TOKUDA, S., RAHARDJO, S., Evaluation of Performance of Photovoltaic System with Maximum Power Point, Solar Energy Materials & Solar Cells, 75, 2003, 673-678, Elsevier Science.
- HOHM, D. P., ROPP, M. E., Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms, Progress in Photovoltaics: Res. and Appl., 11, 2003, 47-62, John Wiley & Sons.
- HUA, C., LIN, J., An On-line MPPT Algorithm for Rapidly Changing Illuminations of Solar Arrays, Renewable Energy, 28, 2003, 1129-1142, Elsevier Science.
- IEC 61215: Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic Modules – Design qualification and type approval, 1993.
- IEC 60904-1: Photovoltaic Devices – Part 1: Measurement of Photovoltaic Current-Voltage Characteristics, 1987.
- IEEE 1262-1995: Recommended Practice for Qualification of Photovoltaic Modules.

- IKEGAMI, T., MAEZONO, T., NAKANISHI, YAMAGATA, Y., EBIHARA, K.,
Estimation of Equivalent Circuit Parameters of PV Module and Its
Application to Optimal Operation of PV System, *Solar Energy Materials &
Solar Cells*, 67, 2001, 389-395, Elsevier Science.
- ISO 9847 – Solar Energy – Calibration of field pyranometers by comparison to
a reference pyranometer, 1998.
- KASSAKIAN, J. G., SCHLECHT, N. F., VERGHESE, G. C., *Principles of Power
Electronics*, Addison Wesley, 1991.
- KAZMERSKI, L. L., *Photovoltaics: a Review of Cell and Module Technologies,
Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 1, Nos. 1/2, pp. 71-170,
1997, Elsevier Science.
- KING, D. L., KRATOCHVIL, J. A., BOYSON, W. E., *Temperature Coefficients
for PV Modules and Arrays: Measurements Methods, Difficulties, and
Results*, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29 –
October 3, 1997, Anaheim, California.
- KOUTROULIS, E., KALAITZAKIS, K., *Development of an Integrated Data
Acquisition System for Renewable Energy Sources Systems Monitoring,
Renewable Energy*, 28, 2003, 139-152, Elsevier Science.
- KUO, B. C., *Automatic Control Systems*, Prentice Hall, 1995.
- KUSAKAWA, M., NAGAYOSHI, H., KAMISAKO, K., KUROKAWA, K., *Further
Improvement of a Transformless, Voltage-Boosting Inverter for AC Modules,
Solar Energy Material & Solar Cells*, 67, 2001, 379-387, Elsevier Science.
- KYOSERA SOLAR; disponível em: <<http://kyocerasolar.com>>, acesso em:
03/11/05.
- LORENZO, M., PÉREZ, M., EZPELETA, A., ACEDO, J., *Design of Tracking
Photovoltaic Systems with a Single Vertical Axis*, *Progress in Photovoltaics:
Res. and Appl.*, 10, 2002, 533-543, John Wiley & Sons.
- MACHADO NETO, L. de V. B. ; DINIZ, A. S. A. C. ; CABRAL, C. V. T. ;
OLIVEIRA FILHO, D. . *Reliability and Compatibility in PV Systems:
Development of Testing Procedures*. In: VIII World Renewable Energy

Congress, 2004, Denver. Proceedings of VIII World Renewable Energy Congress. Denver : Elsevier, 2004. v. 1. p. 1-6.

MACHADO NETO, L. de V. B. ; ZARATE, L. ; DINIZ, A. S. A. C. ; SOARES, D.; VIMIEIRO, R. . Representation of Curves Current-Voltage of Photovoltaic Modules via Artificial Neural Network. In: VIII IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, 2004, Marbella. Proceedings of VIII IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, 2004. v. 1. p. 266-271.

MACHADO NETO, L. de V. B. ; DINIZ, A. S. A. C. ; CABRAL, C. V. T. ; OLIVEIRA FILHO, D. . Procedimentos de Ensaio de Equipamentos para Sistemas Fotovoltaicos Isolados Aplicados à Eletrificação Rural. In: XII Congresso Ibérico y VII Congresso Ibero Americano de Energia Solar, 2004, Vigo. Libro de Actas del XII Congresso Ibérico y VII Congresso Ibero Americano de Energia Solar. Vigo: Universidade de Vigo, 2004. v. 2. p. 831-836.

MACHADO NETO, L. de V. B. ; DINIZ, A. S. A. C. ; CABRAL, C. V. T. ; OLIVEIRA FILHO, D. ; CORTIZO, P. C. . Técnicas de Máxima Transferência de Potência em Sistemas Fotovoltaicos Isolados. In: XII Congresso Ibérico y VII Congresso Ibero Americano de Energia Solar, 2004, Vigo. Libro de Actas del XII Congresso Ibérico y VII Congresso Ibero Americano de Energia Solar. Vigo: Universidade de Vigo, 2004. v. 2. p. 879-884.

MACHADO NETO, L. de V. B. ; DINIZ, A. S. A. C. ; CABRAL, C. V. T. ; OLIVEIRA FILHO, D. . Avaliação de Desempenho e Identificação de Falhas em Sistemas Fotovoltaicos Isolados Aplicados á Eletrificação Rural. In: XII Congresso Ibérico y VII Congresso Ibero Americano de Energia Solar, 2004, Vigo. Libro de Actas del XII Congresso Ibérico y VII Congresso Ibero Americano de Energia Solar. Vigo: Universidade de Vigo, 2004. v. 2. p. 885-890.

MACHADO NETO, L. de V. B. ; OLIVEIRA, L. G. M. ; CABRAL, C. V. T. ; OLIVEIRA FILHO, D. ; CORTIZO, P. C. ; DINIZ, A. S. A. C. . Development of Models for Test Performance of PV Modules. In: 3rd World Conference

- on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, Osaka. Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 2003. v. 3. p. 2501-2504.
- MATSUKAWA, H., KOSHIISHI, K., KOIZUMI, H., KUROKAWA, K., HAMADA, M., BO, L., Dynamic Evaluation of Maximum Power Point Tracking Operation with PV Array Simulator, Solar Energy Materials & Solar Cells, 75, 2003, 537-546, Elsevier Science.
- MELLO, L. F. P. de, Análise e Projeto de Fontes Chaveadas, Editora Érica, 1996.
- MOHAN, N., UNDERLAND, T. M., ROBBINS, W. P., Power Electronics: Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, 1995.
- MÖLLER, H. J., Semiconductors for Solar Cells, Artech House, 1993
- MORANTE, F., Demanda Energética em Solar Home Systems, Dissertação Mestrado, IEE/PIPGE Universidade de São Paulo, USP, 2000, São Paulo, Brasil.
- NAFEH, A. E. S. A., FAHMY, F. H., EL-ZAHAB, E. M. A., Evaluation of a Proper Controller Performance for Maximum-Power Point Tracking of a Stand-Alone PV System, Solar Energy Materials & Solar Cells, 75, 2003, 723-728, Elsevier Science.
- NBR 12136 MB 3477: Módulos fotovoltaicos – Determinação de características fotoelétricas, 12/1991, ANBT, 1991.
- NBR 12302 NB 1386: Dispositivos fotovoltaicos – Correção das curvas características corrente versus tensão ($I \times V$), em função da temperatura, 12/1991, ABNT, 1991.
- NBR 13770: Termopar – Calibração por Comparação com Termoresistência de Referência – JAN 1997.
- OPTIMIZATION TOOLBOX, User's Guide, Version 3, The MathWorks, 2002.
- PATEL, M. R., Wind and Solar Power Systems, CRC Press, 1999.
- PEREIRA, F., Microcontroladores HC908Q: Teoria e Prática, Editora Érica, 2004.

- POPPE, M. K., Reestruturação do PRODEEM, Anais de Seminário, 2002.
- POTTEAU, E., DESMETTRE, D., MATTERA, F., BACH, O., MARTIN, J. L., MALBRANCHE, P., Results and Comparison of Seven Accelerated Cycling Test Procedures for the Photovoltaic Application, Journal of Power Sources, 113, 2003, 408-413, Elsevier Science.
- RENEWABLE ENERGY WORLD, Volume 6, Number 1, January-February 2003, James & James Science Publishers, UK.
- ROGERS, E., Understanding Buck Power Stages in Switchmode Power Supplies, Application Report, March 1999, SLVA057, Texas Instruments, disponível em: <<http://www.ti.com>>, acesso em: 25/10/05.
- SANTOS, R. R., Procedimento para a Eletrificação Rural Fotovoltaica Domiciliar no Brasil: uma Contribuição a partir de Observações de Campo; Tese (Doutorado) – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 221 p., São Paulo, 2002.
- VENKATARAMAN, P., Applied Optimization with MATLAB Programming, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- WINROCK INTERNATIONAL, TRADE GUIDE on Renewable Energy in Brazil, October 2002, Sponsored by: U. S. Agency for International Development, Bureau for Economic Growth, Energy Program Agriculture and Trade (EGAT), USAID/Brazil Office of Energy, disponível em: <<http://www.winrock.org.br>>, acesso em: 22/03/03.
- YAMAMOTO, S., PARK, J. S., TAKATA, M., SASAKI, K., HASHIMOTO, T., Basic Study on the Prediction of Solar irradiation and its Application to Photovoltaic-Diesel Hybrid Generation System, Solar Energy Materials & Solar Cells, 75, 2003, 577-584, Elsevier Science.