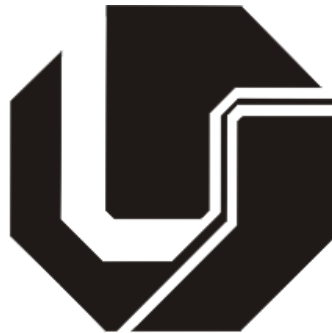


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ESTUDO DO SOMBREAMENTO PARCIAL EM MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA RESISTÊNCIA SÉRIE E DAS
REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

WALTENIR ALVES DE FARIA

Uberlândia

2014

WALTENIR ALVES DE FARIA

**ESTUDO DO SOMBREAMENTO PARCIAL EM MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA RESISTÊNCIA SÉRIE E DAS
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia,
como exigência parcial para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fontes Alternativas de Energia.

Orientador: Prof. José Roberto Camacho, PhD (UFU)

Uberlândia

2014

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Daiane e minhas filhas Ana Luiza e Andressa que sempre me apoiaram para alcançar este objetivo de vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que sempre esteve do meu lado e iluminou meus caminhos para alcançar este objetivo.

Ao meu orientador prof. José Roberto Camacho que me apoiou, inspirou e acreditou em minha capacidade para trilhar esta busca pelo conhecimento.

À minha amada esposa Daiane de Fátima H. B. Alves que teve muita paciência e dedicação nos momentos de dificuldades encontradas no desenvolvimento deste projeto.

Ao Núcleo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Uberlândia e o Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí que cederam espaço e equipamentos para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos Fernando Barbosa Matos, Júlio César Ferreira, Eduardo Silva Vasconcelos e Jucelino Cardoso Marciano que muito me deram força e sempre tinham uma palavra de motivação para os momentos de desânimo.

FARIA, Waltenir A. **ESTUDO DO SOMBREAMENTO PARCIAL EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA RESISTÊNCIA SÉRIE E DAS REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS**. 2014. 132 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG.

RESUMO

Diante dos cenários de aumento da população mundial, da concentração de CO₂, dos custos dos combustíveis, do consumo mundial de energia e das alterações climáticas, surgiu a necessidade de se buscar por fontes de energias alternativas. Neste contexto, a energia solar fotovoltaica, fruto de investigações e investimentos realizados nas últimas cinco décadas, teve um grande impacto na última década, registrando um aumento significativo na produção de células e módulos fotovoltaicos e instalações de sistemas fotovoltaicos no mundo todo. Um dos objetivos deste trabalho foi estudar o comportamento de módulos fotovoltaicos mediante situações de sombreamento parcial em diferentes condições de temperatura e radiação solar. Dentro deste cenário de sombreamento parcial que causa impacto praticamente em todos os parâmetros elétricos de um módulo, foi feito o estudo e cálculo da resistência série dos módulos nas condições de sombreamento parcial propostas para verificar a relação entre o valor da resistência série e o estado de sombreamento parcial, possibilitando uma possível identificação do estado de sombreamento a partir do monitoramento da resistência série. Outro objetivo deste trabalho foi aplicar recursos de Inteligência Artificial (IA) na modalidade de Redes Neurais Artificiais (RNAs) para, após o devido treinamento e aprendizado das RNAs a partir do banco de dados colhidos em campo sob condições de sombreamento parcial, elas poderem identificar os parâmetros do módulo fotovoltaico dentro das diversas condições de sombreamento parcial propostas. Para a busca dos objetivos deste trabalho foram utilizados quatro módulos fotovoltaicos sendo dois de 40 W de potência nominal com mais de quinze anos de fabricação, cedidos pelo Instituto Federal Goiano (IFGoiano) Campus Urutaí, da cidade de Urutaí-GO e dois novos e sem uso, de 75 W de potência nominal cedidos pelo Núcleo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Palavras-chave: Energias Alternativas, Módulo Fotovoltaico, Sombreamento Parcial, Resistência Série, Redes Neurais Artificiais.

FARIA, Waltenir A. **ESTUDO DO SOMBREAMENTO PARCIAL EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ATRAVÉS DA RESISTÊNCIA SÉRIE E DAS REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS**. 2014. 132 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG.

ABSTRACT

Given the scenarios of increasing world population, the concentration of CO₂, fuel costs, global consumption of energy and climate change, there was a need to search for alternative energy sources. In this context, solar photovoltaic, the result of research and investments over the past five decades, had a great impact in the last decade, recording a significant increase in the production of photovoltaic cells and modules and installations of photovoltaic systems worldwide. One of the goals of this work was to study the behavior of PV modules by partial shading situations in different conditions of temperature and solar radiation. Within this partial shading scenario that impacts virtually all electrical parameters of a module, the study and calculation of the series resistance of the modules was done in conditions of partial shading proposals to verify the relationship between the value of the series resistance and the state of shading partial, allowing identification of a possible state of shading from monitoring the resistance series. Another objective of this work was to apply Artificial Intelligence (AI) resources in the form of Artificial Neural Networks (ANN) to, after the proper training and learning of ANN from the database collected in the field under conditions of partial shade, they can identify the parameters of the PV modules within the various conditions of partial shading proposals. To pursue the objectives of this work four photovoltaic modules were used, two with 40 W nominal power with over fifteen years of manufacturing, assigned by the Instituto Federal de Goiás (IFGoiano) Urutaí Campus, at the city of Urutaí-GO and two new without any use of 75 W nominal power assigned by the Center for Research on Alternative Energy Sources, School of Electrical Engineering, Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Keywords: Alternative Energy, Photovoltaic Module, Partial Shading, Series Resistance, Artificial Neural Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Efeito Fotoelétrico – elétrons emitidos devido incidência de luz sobre a placa metálica.....	21
Figura 2.2: Módulo composto de 36 células ligadas em série. (Fonte: Carneiro, 2010)	21
Figura 2.3: Ligação em série de células fotovoltaicas (Fonte: Carneiro, 2010).	22
Figura 2.4: Hierarquia de agrupamento de células. (Fonte: Carneiro, 2010)	22
Figura 2.5: Esquema básico de um sistema fotovoltaico autônomo. (Fonte: www.mpptsolar.com)	23
Figura 3.1: Circuito equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica.	36
Figura 3.2: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica não ideal.	38
Figura 3.3: Curvas $I-V$ e $P-V$ simuladas para o módulo <i>ASE-Américas, Inc.</i> de 40 W.	40
Figura 3.4: Curvas $I-V$ e $P-V$ simuladas para o módulo da <i>SolarWorld</i> de 75 W.	40
Figura 3.5: Simulação do efeito da temperatura com a radiação constante sobre o módulo de 40 W.	42
Figura 3.6: Efeitos reais da temperatura sobre o módulo da <i>ASE-Américas, Inc.</i>	42
Figura 3.7: Simulação do efeito da temperatura com a radiação constante sobre o módulo de 75 W.	42
Figura 3.8: Efeitos reais da temperatura, com radiação constante, sobre o módulo de 75 W.	43
Figura 3.9: Efeitos da radiação na curva $I-V$ com temperatura constante no módulo da <i>ASE-Américas, Inc.</i>	43
Figura 3.10: Efeitos da radiação na curva $P-V$ com temperatura constante no módulo da <i>ASE-Américas, Inc.</i>	44
Figura 3.11: Efeitos da radiação na curva $I-V$ com temperatura constante no módulo da <i>SolarWorld</i>	44
Figura 3.12: Efeitos da radiação na curva $P-V$ com temperatura constante no módulo da <i>SolarWorld</i>	45
Figura 4.1: Módulos de 40 W da <i>ASE-Américas, Inc.</i> cedidos pelo IFGoiano – Campus Urutaí.	49
Figura 4.2: Módulos de 75 W da <i>SolarWorld</i> cedidos pelo Núcleo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Uberlândia.	49
Figura 4.3: Interface do <i>mini KLA</i> utilizado na coleta de dados.	50
Figura 4.4: Identificação das células do módulo para localização do sombreamento parcial e a representação da conexão dos diodos <i>by-pass</i>	51

Figura 4.5: Tipos de sombreamento parcial de 3% da área fotovoltaica dos módulos de 40 W e de 75 W.....	52
Figura 4.6: Tipos de sombreamento parcial de 6% da área fotovoltaica dos módulos de 40 W e de 75 W.....	52
Figura 4.7: Curvas $I-V$ e $P-V$ sem sombreamento dos módulos de 40 W da ASE-Américas, Inc.	53
Figura 4.8: Curvas $I-V$ e $P-V$ sem sombreamento dos módulos de 75 W da SolarWorld.....	53
Figura 4.9: Curvas $I-V$ e $P-V$ dos dois módulos de 75 W com sombreamento nas células 1 e 19 com e sem os diodos <i>by-pass</i>	54
Figura 4.10: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento da célula 6 nos módulos de 40 W com diodos <i>by-pass</i>	55
Figura 4.11: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento da célula 28 nos módulos de 40 W com diodos <i>by-pass</i>	56
Figura 4.12: Caixa de conexão do módulo 1 da ASE-Américas, Inc. com contatos oxidados e diodo <i>by-pass</i> rompido.	57
Figura 4.13: Caixa de conexão do módulo 2 da ASE-Américas, Inc. com contatos em boas condições e diodos <i>by-pass</i> conectados.....	57
Figura 4.14: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento das células 8, 17, 26 e 35 no módulo 1 da ASE-Américas, Inc. com diodos <i>by-pass</i> atuando em metade do módulo.....	58
Figura 4.15: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento de 50% de duas células no módulo da SolarWorld com diodos <i>by-pass</i> conectados.....	59
Figura 4.16: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento de 50% de duas células no módulo de 75 W com diodos (cd) e sem diodos (sd) <i>by-pass</i> conectados.....	60
Figura 4.17: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento de 50% de duas células no módulo 2 da ASE-Américas, Inc. com diodos <i>by-pass</i>	61
Figura 4.18: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da SolarWorld.....	62
Figura 4.19: Curvas características do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da ASE-Américas.	63
Figura 4.20: Sombreamento de 100% de duas células com e sem diodos <i>by-pass</i>	64
Figura 4.21: Sombreamento de 100% de duas células no módulo de 40 W com os diodos <i>by-pass</i> conectados.	65
Figura 4.22: Sombreamento de 100% de duas células no módulo de 40 W sem os diodos <i>by-pass</i>	66

Figura 4.23: Sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 75 W.	67
Figura 4.24: Sombreamento de 50% de quatro células do mesmo grupo no módulo de 40 W.	68
Figura 4.25: Sombreamento de 50% de quatro células com duas em cada grupo no módulo de 40 W.	68
Figura 5.1: Resistência série calculada pelo ponto de potência máxima com 100% de uma célula sombreada.	72
Figura 5.2: Relação entre a P_{max} e a R_s pelo ponto de potência máxima para o sombreamento de 100 % de uma célula no módulo de 40 W.	72
Figura 5.3: Resistência série pelo ponto de potência máxima do sombreamento de 50% de duas células no módulo de 40 W.	74
Figura 5.4: Relação entre a P_{max} e a R_s ponto de potência máxima para o sombreamento de 50% de duas células no módulo de 40 W.	74
Figura 5.5: Resistência série calculada pelo método do FF do módulo de 40 W para o sombreamento de 100% de uma célula.	77
Figura 5.6: P_{max} e R_s pelo método do FF para o sombreamento de 100% de uma célula no módulo de 40 W.	77
Figura 5.7: Resistência série com 50% de duas células sombreadas pelo método do FF	79
Figura 5.8: P_{max} e a R_s pelo método do FF para o sombreamento de 50% de duas células no módulo de 40 W.	79
Figura 5.9: Resistência série com 25% de quatro células sombreadas pelo método do FF	80
Figura 5.10: P_{max} e a R_s pelo método do FF para o sombreamento de 25% de quatro células no módulo de 40 W.	81
Figura 5.11: Resistência série pelo método do FF com sombreamento de 100% de duas células no módulo da ASE–Américas.	82
Figura 5.12: P_{max} e R_s pelo método do FF do sombreamento de 100% de duas células no módulo da ASE–Américas.	83
Figura 5.13: Resistências série calculadas pelo método do FF para o sombreamento de 50% de quatro células no módulo da ASE–Américas.	84
Figura 5.14: P_{max} e R_s pelo método do FF do sombreamento de 50% de quatro células no módulo da ASE–Américas.	84
Figura 5.15: Resistência série com 100% de uma célula sombreada pelo método do FF no módulo de 75 W.	86

Figura 5.16: P_{max} e a R_s pelo método do FF para o sombreamento de 100% de uma célula no módulo de 75 W.	86
Figura 5.17: Resistências série calculadas pelo método do FF para o sombreamento de 50% de duas células no módulo da <i>SolarWorld</i>	87
Figura 5.18: P_{max} e a R_s pelo método do FF para o sombreamento de 50% de duas células no módulo da <i>SolarWorld</i>	88
Figura 5.19: Resistências série calculadas pelo método do FF do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da <i>SolarWorld</i>	89
Figura 5.20: P_{max} e R_s pelo método do FF do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da <i>SolarWorld</i>	89
Figura 5.21: Resistências série calculadas pelo método do FF do sombreamento de 100% de duas células no módulo da <i>SolarWorld</i>	90
Figura 5.22: P_{max} e R_s pelo método do FF do sombreamento de 100% de duas células no módulo da <i>SolarWorld</i>	91
Figura 5.23: Resistências série calculadas pelo método do FF para o sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 75 W.	92
Figura 5.24: P_{max} e R_s pelo método do FF do sombreamento de 50% de quatro células no módulo da <i>SolarWorld</i>	92
Figura 6.1: Neurônio biológico e neurônio artificial (Fonte: www.mecatronicaatual.com.br , adaptada).	95
Figura 6.2: Diagrama de uma rede de <i>Perceptrons</i> de múltiplas camadas.	96
Figura 6.3: Funções de Ativação	97
Figura 6.4: Convergências das RNAs para os parâmetros dos módulos de 40 W	104
Figura 6.5: (a) Treino da RNA e (b) Teste da RNA para V_{ca} do módulo da ASE–Américas, Inc.	105
Figura 6.6: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{cc} do módulo da ASE–Américas, Inc.	106
Figura 6.7: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{ppm} do módulo da ASE–Américas, Inc.	107
Figura 6.8: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ppm} do módulo da ASE–Américas, Inc.	108
Figura 6.9: (a) Treino e (b) Teste da RNA para FF do módulo da ASE–Américas, Inc.	109
Figura 6.10: Convergências das RNAs para os parâmetros dos módulos de 75 W	111
Figura 6.11: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ca} do módulo da <i>SolarWorld</i>	112
Figura 6.12: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{cc} do módulo da <i>SolarWorld</i>	113
Figura 6.13: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{ppm} do módulo da <i>SolarWorld</i>	114
Figura 6.14: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ppm} do módulo da <i>SolarWorld</i>	115

Figura 6.15: (a) Treino e (b) Teste da RNA para FF do módulo da <i>SolarWorld</i>	116
Figura 6.16: Convergências das RNAs para os parâmetros dos módulos de 40 W e 75 W juntos.	118
Figura 6.17: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ca} dos módulos de 40 W e 75 W juntos..	119
Figura 6.18: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{cc} dos módulos de 40 W e 75 W juntos. ..	120
Figura 6.19: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{ppm} dos módulos de 40 W e 75 W juntos.	121
Figura 6.20: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ppm} dos módulos de 40 W e 75 W juntos.	122
Figura 6.21: (a) Treino e (b) Teste da RNA para FF dos módulos de 40 W e 75 W juntos...	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Dados técnicos dos módulos e valores simulados.	39
Tabela 3.2: Diferenças entre os valores simulados na equação (3.37) e dados dos fabricantes dos módulos.	40
Tabela 4.1: Dados técnicos fornecidos pelos fabricantes dos módulos utilizados.	49
Tabela 4.2: Sombreamento das células 1 e 19 do módulo de 75 W com e sem os diodos <i>by-pass</i>	54
Tabela 4.3: Sombreamento da célula 6 nos módulos da ASE–Américas, Inc. com diodos <i>by-pass</i>	56
Tabela 4.4: Sombreamento das células 8, 17, 26 e 35 no módulo 1 da ASE–Américas, Inc....	58
Tabela 4.5: Sombreamento de 50% de duas células com os diodos <i>by-pass</i> conectados.....	59
Tabela 4.6: Sombreamento de 50% dos pares de células “7 e 16” e “11 e 20” com e sem os diodos <i>by-pass</i>	60
Tabela 4.7: Sombreamento de 50% dos pares de células “2 e 11”, “11 e 20” e “12 e 21” no módulo 2.	61
Tabela 4.8: Sombreamento de 25% de quatro células no módulo de 75 W.	62
Tabela 4.9: Sombreamento de 25% de quatro células no módulo de 40 W.	63
Tabela 4.10: Leituras do sombreamento de duas células inteiras no módulo de 75 W com e sem diodos <i>by-pass</i>	64
Tabela 4.11: Leituras do sombreamento de duas células inteiras no módulo de 40 W com e sem diodos <i>by-pass</i>	65
Tabela 4.12: Leituras do sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 75 W.....	67
Tabela 4.13: Leituras do sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 40 W.....	68
Tabela 5.1: Resistências série calculadas pela equação 5.1 para o módulo de 40 W com e sem diodos <i>by-pass</i> para o sombreamento parcial de uma célula inteira.....	71
Tabela 5.2: Resistências série calculadas pelo ponto de potência máxima para o sombreamento parcial de 50% de duas células adjacentes no módulo de 40 W com e sem diodos <i>by-pass</i>	73
Tabela 5.3: Resistências série em ordem crescente calculadas pelo método do <i>FF</i> do módulo de 40 W com e sem diodos <i>by-pass</i> para o sombreamento parcial de uma célula inteira.	76
Tabela 5.4: Resistências série em ordem crescente pelo método do <i>FF</i> dos módulos de 40 W com e sem diodos <i>by-pass</i> para um sombreamento parcial de 50% de duas células adjacentes.	78

Tabela 5.5: Resistências série em ordem crescente pelo método do <i>FF</i> dos módulos de 40 W com 25% de quatro células sombreadas.	80
Tabela 5.6: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 40 W para um sombreamento parcial de 100% de duas células adjacentes.	82
Tabela 5.7: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 40 W para um sombreamento parcial de 50% de quatro células adjacentes.	83
Tabela 5.8: Resistências série em ordem crescente dos módulos de 75 W com e sem diodos <i>by-pass</i> para o sombreamento parcial de 100% de uma célula pelo método do <i>FF</i>	85
Tabela 5.9: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 75 W para um sombreamento parcial de 50% de duas células adjacentes.	87
Tabela 5.10: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 75 W com e sem diodos <i>by-pass</i> para um sombreamento parcial de 25% de quatro células adjacentes.	88
Tabela 5.11: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 75 W para um sombreamento parcial de 100% de duas células adjacentes.	90
Tabela 5.12: Resistências série em ordem crescente pelo método do <i>FF</i> dos módulos de 75 W para o sombreamento parcial de 50% de quatro células adjacentes.	91
Tabela 6.1: Erro Médio Global das RNAs para os módulos de 40 W.	103
Tabela 6.2: Erro Médio Global das RNAs para os módulos de 75 W.	111
Tabela 6.3: Erro Médio Global das RNAs para os módulos de 75 W e 40 W juntos.	117

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

FF	Fator de Forma (<i>Fill Factor</i>) do módulo em %
FF_o	Fator de Forma (<i>Fill Factor</i>) de uma célula ideal
G	Intensidade da radiação solar em watts por metro quadrado
I	Corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico em ampère
I_0	Corrente reversa de saturação do diodo no escuro em ampère
IA.....	Inteligência Artificial
I_c	Corrente fornecida pela célula fotovoltaica em ampère
$I_{cc(c)}$	Corrente de curto-circuito da célula fotovoltaica em ampère
I_{cc}	Corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico em ampère
I_d	Corrente através do diodo em ampère
IEC.....	<i>International Electrotechnical Commission</i>
I_{fg}	Corrente foto-gerada em ampère
IFGoiano.....	Instituto Federal Goiano
I_p	Corrente de fuga em ampère
I_{ppm}	Corrente no ponto de potência máxima
$I-V$	Corrente versus Tensão
k	Constante de Boltzmann
m	Fator de idealidade do diodo
MLP.....	<i>Multilayer Perceptron</i>
MPPT.....	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
N_p	Número de células paralelo série no módulo fotovoltaico
N_s	Número de células em série no módulo fotovoltaico
P_{max}	Potência nominal máxima do módulo fotovoltaico
PPM.....	Ponto de Potência Máxima
PV.....	Photovoltaic
q	Carga do elétron em coulomb
RNA.....	Rede Neural Artificial
R_p	Resistência paralela (<i>shunt</i>) em ohm
R_s	Resistência série em ohm
R_{sc}	Resistência série da célula
T	Temperatura em kelvin
T_c	Temperatura em graus celsius

UFU.....	Universidade Federal de Uberlândia
V	Tensão nos terminais do diodo em volt
$V_{ca(c)}$	Tensão de circuito aberto da célula fotovoltaica
V_{ca}	Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico
v_{ca}	Tensão de circuito aberto da célula normalizada
V_{ppm}	Tensão no ponto de potência máxima
$V_{T(c)}$	Tensão térmica da célula fotovoltaica
V_T	Tensão térmica do módulo fotovoltaico

Sumário

1	Introdução.....	17
1.1	Conteúdo do Trabalho.....	17
2	Aspectos Teóricos e Revisão Bibliográfica	19
2.1	Introdução	19
2.2	Efeito fotovoltaico e a célula fotovoltaica	20
2.3	Partes Integrantes do sistema fotovoltaico:.....	23
2.4	Revisão Bibliográfica.....	24
3	Métodos Matemáticos para o Cálculo da Resistência Série de Módulos Fotovoltaicos ...	27
3.1	Introdução	27
3.2	Métodos para o Cálculo da Resistência Série de Módulos Fotovoltaicos	27
3.3	Equacionamento do Módulo Fotovoltaico.....	36
3.4	Efeitos da Temperatura e da Radiação sobre os Módulos Fotovoltaicos	41
3.4.1	Efeitos da Temperatura.....	41
3.4.2	Efeitos da Radiação	43
4	Sombreamento Parcial e Obtenção de Dados	46
4.1	Introdução	46
4.2	Diodos <i>by-pass</i>	46
4.3	Sombreamento Parcial sobre Módulos Fotovoltaicos.....	47
4.4	Obtenção de Dados em Condições de Sombreamento Parcial	48
4.5	Processo de Sombreamento dos Módulos.....	51
4.6	Impacto do Sombreamento Parcial sobre a Potência de Saída e nas Curvas Características dos Módulos Fotovoltaicos Utilizados.....	52
4.6.1	Sombreamento de 100% de uma célula.....	53
4.6.2	Sombreamento de 50% de duas células adjacentes	58
4.6.3	Sombreamento de 25% de quatro células adjacentes	61
4.6.4	Sombreamento de 100% de duas células.....	63
4.6.5	Sombreamento de 50% de quatro células.....	66
4.7	Conclusões	69
5	Cálculo da Resistência Série sob Condições de Sombreamento Parcial.....	70
5.1	Introdução	70
5.2	Cálculo da Resistência Série dos Módulos sob Condições de Sombreamento Parcial pelo Ponto de Potência Máxima	71
5.3	Cálculo da Resistência Série pelo Método do Fator de Forma (<i>FF</i>).	75
5.3.1	Resistência série do Módulo da ASE–Américas, inc.	76

5.3.2	Resistência Série do Módulo da <i>SolarWorld</i>	85
5.4	Conclusões	93
6	Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Estudo do Sombreamento Parcial	94
6.1	Introdução	94
6.1.1	Redes <i>Perceptrons</i> de Múltiplas Camadas (<i>MultiLayer</i>)	95
6.1.2	Treinamento da RNA.....	97
6.1.3	Teste da RNA	100
6.2	Aplicação de RNAs no Sombreamento Parcial de Módulos Fotovoltaicos	101
6.3	Resultados.....	102
6.3.1	RNAs aplicadas nos Módulos de 40 W da ASE–Américas, Inc.	102
6.3.2	RNAs aplicadas nos Módulos de 75 W da <i>SolarWorld</i>	110
6.3.3	RNAs aplicadas nos Módulos de 40 W e 75 W juntos.....	117
6.4	Conclusão.....	124
7	Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros.....	125
7.1	Conclusões	125
7.2	Sugestões de trabalhos futuros:.....	127

1 INTRODUÇÃO

A expansão da tecnologia fotovoltaica tem crescido praticamente de forma exponencial desde a década de 70, pode-se atribuir a este crescimento dois aspectos distintos: o primeiro refere-se à melhora significativa dos materiais empregados na fabricação de células fotovoltaicas. Atualmente, além do Silício, que é o material utilizado em maior escala para a referida finalidade, uma gama bastante ampla de materiais vem sendo disponibilizada, permitindo o aperfeiçoamento, não apenas em termos de eficiência de conversão, mas também em flexibilidade, peso e custos.

O segundo aspecto impulsionador da tecnologia refere-se à busca incessante por fontes renováveis de energia que respeitem as legislações vigentes, principalmente, nos tempos atuais, em que o apelo ecológico e as dificuldades na obtenção de licenças dos órgãos ambientais para construção de usinas hidrelétricas de grande porte se fazem presentes. Este fato também é perceptível na intervenção governamental em muitos países, sobretudo nos europeus, em que subsídios são fornecidos visando expandir o uso de fontes fotovoltaicas de energia.

1.1 Conteúdo do Trabalho

Neste trabalho o foco principal foi o estudo do impacto causado pelo sombreamento parcial sobre o comportamento de módulos fotovoltaicos em diferentes condições de radiação e temperatura de operação. Foram utilizados quatro módulos, sendo dois com 40 W de potência nominal, fabricados a mais de quinze anos pela *ASE-Américas, Inc.* e de uso do Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí e dois fabricados pela *SolarWorld* eram novos com potência nominal de 75 W pertencentes ao Núcleo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

No capítulo 2 é feito um breve apanhado a respeito dos aspectos teóricos sobre a situação atual das fontes de energia disponíveis hoje no mercado, os conceitos históricos sobre efeito fotoelétrico e fotovoltaico, as partes integrantes de um sistema fotovoltaico básico e uma revisão bibliográfica de parte das fontes pesquisadas para o embasamento deste trabalho.

No capítulo 3 são apresentados diversos métodos matemáticos para o cálculo da resistência série de módulos fotovoltaicos e o modelo matemático de um módulo fotovoltaico. Neste capítulo também é mostrado os efeitos reais da temperatura e da radiação solar sobre as curvas características de Corrente – Tensão ($I-V$) e Potência – Tensão ($P-V$) de um módulo fotovoltaico.

No capítulo 4 é discutido o papel dos diodos de desvio (*by-pass*) nos módulos fotovoltaicos e são mostrados os impactos dos sombreamentos parciais propostos sobre as curvas características $I-V$ e $P-V$ dos módulos utilizados nesta pesquisa com e sem a presença dos diodos *by-pass*.

No capítulo 5 é discutido e mostrado o cálculo das resistências série dos módulos para os sombreamentos parciais propostos e a discussão sobre a possibilidade de identificar um estado de sombreamento parcial a partir do valor da resistência série calculada.

No capítulo 6 é apresentada a Rede Neural Artificial (RNA) implementada para identificar os parâmetros do módulo fotovoltaico sob condições de sombreamento parcial. Para cada parâmetro dos módulos foi configurada uma RNA. Dos treinos e testes das RNAs foram plotadas as curvas de convergência do erro global durante os treinamentos das RNAs e o comparativo entre os valores reais colhidos em campo com os valores encontrados pela RNA de cada parâmetro dos módulos.

No capítulo 7 são feitas as considerações finais observadas no decorrer desta pesquisa e sugestões de trabalhos futuros.

2 ASPECTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Atualmente está mais que provado que a produção de energia através de combustíveis fósseis contribui de modo significativo para o efeito estufa e para a diminuição da camada de ozônio. Estas fontes de energia não são renováveis e existem estudos que mostram sua viabilidade até meados de 2030, sendo incerto o futuro para as décadas seguintes. Mesmo com a descoberta de novos poços de petróleo não se tem garantia de fornecimento contínuo, dentre as razões de tantas incertezas podemos citar o custo de investimento para exploração de novos poços cada vez maior, o difícil acesso às reservas com profundidades oceânicas ultrapassando os 5000 metros além do aumento no consumo energético e de combustíveis no mundo. E conforme a lei da oferta e procura o que se pode esperar são aumentos significativos no preço do petróleo bruto e seus derivados. Duas alternativas mundialmente conhecidas são possíveis para este déficit energético: a utilização de energia nuclear e das energias renováveis.

A energia nuclear não é bem vista pela maioria da população mundial, resgatando sempre as lembranças dos diversos acidentes que ocorreram por todo o mundo até a década de 80 e por último com os terremotos no Japão colocou-se em dúvida a confiabilidade nos sistemas de segurança das usinas nucleares. Os subprodutos da fissão nuclear são outro problema sério, a maioria dos países que utilizam energia nuclear prefere não guardar os detritos nucleares radioativos dentro das suas fronteiras, exportando-os para depósitos nucleares em outros países, geralmente subdesenvolvidos. A exploração da fusão nuclear começa a dar os seus primeiros passos no âmbito da produção de energia elétrica e não se espera que um reator comercial esteja pronto para entrar em operação antes de 2070. (BONIFÁCIO, 2010).

Por outro lado, as energias renováveis apresentam grande leque de vantagens, como a não poluição do meio ambiente, grande disponibilidade em todo o planeta e de um modo geral estão acessíveis a todos os países. E este acesso distribuído pode evitar o monopólio e a formação de cartéis como sempre aconteceu com os combustíveis fósseis por parte de alguns setores e dos países produtores de petróleo.

2.2 Efeito fotovoltaico e a célula fotovoltaica

Em 1905 Albert Einstein propôs que a radiação eletromagnética é quantizada e a menor porção desta radiação é chamada de fóton. A luz solar é da família das radiações eletromagnéticas e por isso se propaga transportando energia em forma de fótons (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2011). Uma célula fotovoltaica é composta de material semicondutor e seu funcionamento básico pode ser resumido da seguinte forma: os fótons presentes na irradiação solar incidente são absorvidos por um material semicondutor e a energia destes fótons faz com que os elétrons da camada de valência dos átomos do material semicondutor se libertem, permitindo que eles viagem através do material, produzindo assim eletricidade. Quando um elétron se desprende do seu átomo fica em seu lugar uma lacuna ou buraco que assume o papel de uma carga positiva complementar, que viaja no sentido contrário ao do elétron, formando assim um par elétron–lacuna e devido à composição da célula os elétrons só podem se movimentar numa única direção criando uma corrente elétrica contínua (BONIFÁCIO, 2010).

A descoberta do efeito fotovoltaico ocorreu em 1876 por Adams e Day, contudo a devida compreensão científica deste fenômeno físico só foi possível após Max Planck ter estabelecido a teoria quântica no ano de 1900. No entanto, importa realçar que a descoberta do efeito fotovoltaico é por vezes atribuída a Edmond Becquerel, quando em 1839 este cientista observou que a ocorrência de algumas reações químicas induzidas pela luz produzia correntes elétricas. Na verdade, a observação deste efeito despertou na comunidade científica o interesse e a motivação necessária para investigar o mesmo tipo de fenômeno em sólidos, o que se veio a confirmar com a descoberta de Adams e Day (MATOS, 2006).

O efeito fotoelétrico acontece quando um feixe de luz com determinada frequência incide sobre uma superfície metálica provocando a ejeção de elétrons da superfície, conforme ilustra a Figura 2.1. Colocando uma placa não iluminada com energia potencial elétrica maior em frente à primeira placa ela irá absorver os elétrons da primeira placa, possibilitando assim, medir a fotocorrente (corrente gerada pelo efeito fotoelétrico) pela diferença de potencial elétrico (DFTE, 2013).

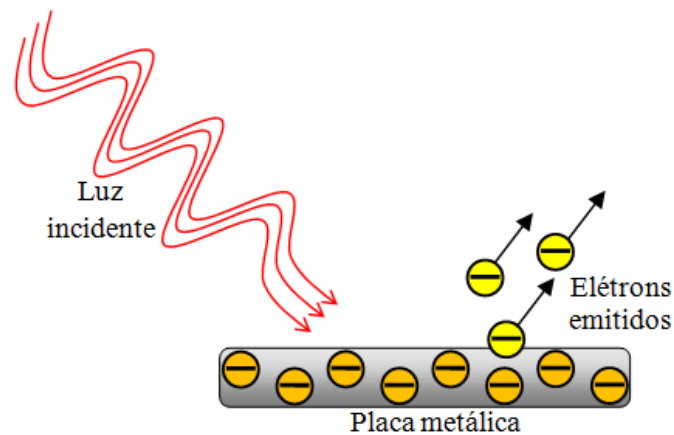


Figura 2.1: Efeito Fotoelétrico – elétrons emitidos devido incidência de luz sobre a placa metálica.

Na década de 1950, pesquisas com semicondutores realizadas pelos Laboratórios Bell levaram à descoberta de que, o silício dopado com certas impurezas, como Boro e Fósforo, se tornava extremamente sensível à luz. Esta descoberta possibilitou a criação e instalação de um pequeno módulo fotovoltaico no satélite americano *U.S. Vanguard I*, lançado em 1958, para fornecimento de energia ao seu sistema de comunicação. Este episódio da história foi o ponto de partida para o desenvolvimento e lançamentos de satélites de comunicação, que até então não dispunham de uma fonte de energia (independente de armazenamento de combustíveis) para seu funcionamento (BONIFÁCIO, 2010).

A célula fotovoltaica é a responsável por transformar a energia luminosa solar em corrente elétrica, contudo, a potência máxima de uma célula fotovoltaica atualmente gera em torno de 4 W e fornece um baixo nível de tensão. Portanto para uma maior produção de energia é necessário associar várias células, através de ligações série e paralelo, formando-se assim os módulos fotovoltaicos. Um modelo comercial comum no mercado é o módulo de 36 células conectadas em série para ter-se uma saída de 12 V como ilustra a Figura 2.2, mas também são comercializados módulos com 60 e 72 células com potência entre 200 e 250 W. A ligação em série das células é feita soldando o contato superior (pólo negativo) de cada célula ao contato inferior (pólo positivo) da célula seguinte, conforme esquematizado na Figura 2.3 (CARNEIRO, 2010).

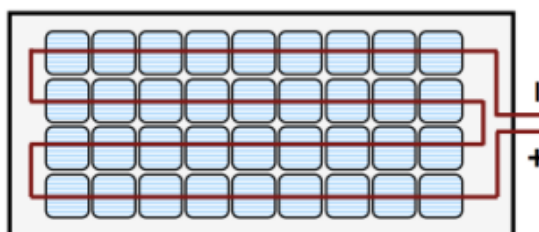


Figura 2.2: Módulo composto de 36 células ligadas em série. (Fonte: Carneiro, 2010)

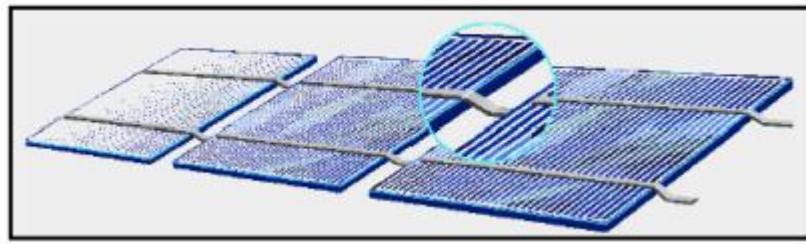


Figura 2.3: Ligação em série de células fotovoltaicas (Fonte: Carneiro, 2010).

Os módulos fotovoltaicos podem ser conectados a outros módulos em série ou em paralelo (conforme o objetivo de tensão e corrente a serem fornecidos) formando os painéis fotovoltaicos e por fim a conexão de grupos de painéis forma os sistemas ou arranjos (*array*) fotovoltaicos (Figura 2.4).

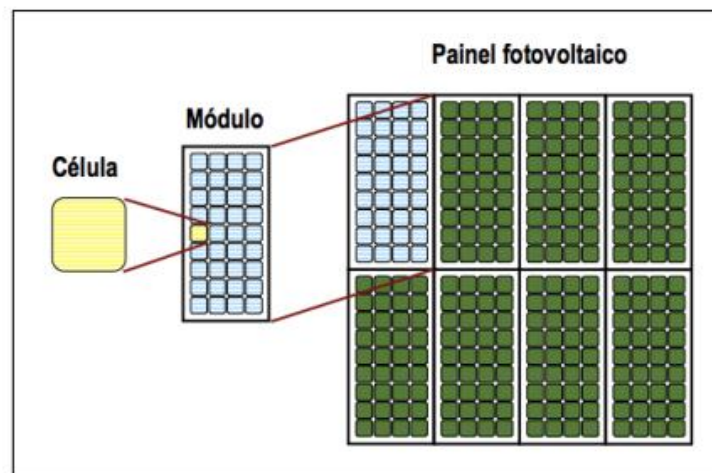


Figura 2.4: Hierarquia de agrupamento de células. (Fonte: Carneiro, 2010)

Numa configuração básica de um sistema fotovoltaico autônomo (não conectado a rede elétrica) o módulo solar normalmente necessita de um acumulador de energia para o posterior uso durante a noite e nos momentos de ausência ou de baixa radiação solar, para isto usam-se baterias. É recomendada a utilização de um controlador de carga para aperfeiçoar o sistema, ou seja, para manter o módulo trabalhando no seu ponto de potência máxima e para proteger a bateria contra sobrecargas ou descargas. Para alimentação de equipamentos que funcionam em corrente alternada com tensão de 110 ou 220 volts é necessário a utilização de um inversor que converte a energia de corrente contínua dos módulos em corrente alternada, a Figura 2.5 apresenta um modelo desta configuração. É importante salientar que a energia solar fotovoltaica não substitui a energia elétrica convencional, ela é uma alternativa viável para

loais onde não há acesso a energia convencional ou como complemento desta, e o consumo é baixo (SOLAR BRASIL, 2010).



Figura 2.5: Esquema básico de um sistema fotovoltaico autônomo. (Fonte: www.mpptsolar.com)

2.3 Partes Integrantes do sistema fotovoltaico:

- **Módulo solar:** É a unidade básica do sistema fotovoltaico, ele é composto por várias células solares conectadas de forma a produzir tensão e corrente suficiente para gerar energia. Sua produção em Watts é calculada por 5 horas de insolação (luminosidade média de 1000 W/m^2) por dia (média nacional). Os módulos comerciais de 36 células geram energia em 12 V_{cc} , mas podem ser associados de forma a se obter 24, 36 ou 48 V_{cc} , contudo os módulos de 72 células alcançam 50 V_{cc} ou mais num único módulo.
- **Controlador de carga:** Não produz energia, é um instrumento eletrônico que tem entre suas funções a de seguidor *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*) de modo a aumentar o rendimento do sistema fotovoltaico buscando manter o módulo trabalhando em seu ponto de potência máxima e direcionar a energia fornecida pelo módulo à bateria e à carga, além disso, controla o estado de carga e descarga da bateria, protegendo-a de uma possível sobrecarga por excesso de eletricidade produzida pelo módulo e/ou descarga pelo uso excessivo dos equipamentos ligados ao

sistema, além também de proteger o módulo evitando que a bateria tente fornecer energia de volta ao módulo no caso de baixa ou falta de radiação solar.

- **Bateria:** Não produz energia, sua função é acumular a energia V_{cc} produzida pelo módulo solar e disponibilizá-la para uso posterior. Para sistemas de energia solar fotovoltaica é recomendável a utilização de baterias estacionárias seladas.
- **Inversor:** Não produz energia, ao contrário, consome cerca de 8% do consumo do equipamento utilizado. Sua função é transformar energia de corrente contínua em energia de corrente alternada.

A energia fotovoltaica, tradicionalmente atrativa em regiões onde a rede elétrica convencional por qualquer motivo não é estendida, começa agora também a ser economicamente interessante em aplicações conectadas à rede elétrica pública. Neste caso painéis fotovoltaicos são incorporados ao telhado ou fachada de prédios urbanos e casas, injetando energia elétrica na rede, funcionando como mini-usinas em paralelo às centrais geradoras. Painéis solares fotovoltaicos baseados na tecnologia tradicional do silício cristalino (tanto na forma monocristalina m-Si, como na forma policristalina p-Si), sofreram uma redução de custos apreciável desde suas primeiras aplicações no fornecimento de energia elétrica para satélites (RÜTHER, 1999).

Quando se trata de sistemas de média potência ou mais, existem três formas de maximizar o rendimento de um sistema fotovoltaico: a utilização de seguidores solares mecânicos de um ou dois eixos, que acompanham o movimento relativo do sol; o rastreador do ponto de potência máxima (*MPPT*), que atua eletronicamente na curva de potência dos módulos ou a combinação dos dois métodos. Para sistemas de baixa potência o *MPPT* apresenta-se como uma solução prática e economicamente atrativa.

2.4 Revisão Bibliográfica

Uma das principais características de um sistema fotovoltaico sob sombreamento parcial é o surgimento de vários pontos de potência máxima locais na curva característica *PV*. Isso faz com que o rastreamento do ponto de potência máxima global se torne uma tarefa difícil para um sistema de *MPPT*. Além disso, a maioria dos sistemas existentes é incapaz de extrair potência máxima de um gerador fotovoltaico sob essas condições. Patel e Agarwal (2008) propõem em seu trabalho um novo algoritmo para rastrear o pico de potência global em condições de sombreamento parcial. A formulação do algoritmo é baseada em várias

observações críticas feitas a partir de um amplo estudo das características $P-V$ e o comportamento dos picos globais e locais em condições parcialmente sombreadas.

Silvestre e Chouder (2008) propuseram em seu trabalho um modelo para a simulação de módulos fotovoltaicos parcialmente sombreados. Eles avaliaram a redução na potência de saída de um módulo fotovoltaico devido ao sombreamento tendo em conta a influência do nível de irradiância e da taxa de sombra sobre uma das 36 células do módulo fotovoltaico. Observaram uma redução de 30% na potência devido à sombra total de uma única célula solar. A redução na potência de saída tem sido correlacionada com a variação da resistência série e paralela do módulo fotovoltaico devido ao sombreamento parcial. Eles mostraram que o impacto na potência de saída pode ser atribuído ao valor da resistência série, quando a área sombreada aumenta.

Ramabadran e Mathur (2009) desenvolveram uma pesquisa com objetivo de investigar os efeitos nocivos do sombreamento parcial de módulos fotovoltaicos dipostos em série e paralelos entre si para comparar seu desempenho. Os pesquisadores procuravam encontrar a ligação menos suscetível aos efeitos de sombreamento parcial e para tanto utilizaram um modelo de simulação PSPICE que representou 36 células do módulo fotovoltaico sob condições de sombreamento parcial.

Para Cortez et al, (2009), o desafio de se estudar o desempenho de um sistema solar capaz de mudanças abruptas na radiação tem uma importância significativa e por isso desenvolve uma pesquisa baseando-se na simulação da interligação de 36 células fotovoltaicas em um módulo de energia solar, da marca Shell Solar, modelo Shell Power Max 85-P. A pesquisa teve a realização das simulações no MATLAB®, que oferece rapidez e facilidade de uso. Relacionando a percentagem de sombra em determinadas condições de radiação para o ponto de máxima transferência de potência analisaram os efeitos das mudanças aleatórias na radiação solar sobre a produção de energia, em condições exteriores. O simulador fornece os parâmetros: tensão de circuito aberto (V_{ca}), corrente de curto-circuito (I_{cc}), potência máxima (P_{max}), e as curvas características do módulo solar, dependendo da tonalidade do efeito que pode passar sobre ela, permitindo o estudo aleatório de mudanças da energia solar, na produção de energia.

Fiorentino e Seraphim (2005) mostram em seu trabalho a montagem de um sistema fotovoltaico composto de três módulos conectados em paralelo e instalado em condições normais de operação, onde, a partir das leituras de V_{ca} e I_{cc} montaram um banco de dados para

análise da eficiência do sistema e o cálculo do Fator de Forma e da Resistência Série (R_s) dos módulos utilizados.

Sistemas baseados em Inteligência Artificial (IA) vêm sendo desenvolvidos e utilizados em todo o mundo em uma ampla variedade de aplicações, eles trabalham com raciocínio simbólico e flexibilidade. Aprendem a partir de exemplos, sendo tolerantes a falhas no sentido de que são capazes de lidar com dados ruidosos e incompletos, são também capazes de lidar com problemas não-lineares e uma vez treinados podem executar a previsão e generalização em alta velocidade. Estes sistemas de IA também podem ser aplicados para a modelagem, identificação, otimização, previsão e controle de sistemas complexos.

Em 2006, Matos desenvolveu em sua dissertação um modelo computacional para simular o comportamento de células fotovoltaicas baseado nas propriedades físicas dos materiais componentes da célula fotovoltaica e em 2011 Matos mostrou em sua tese de doutorado a aplicação de ferramentas de IA para estimar as propriedades físicas de uma célula solar de silício, baseado em seu comportamento fotovoltaico.

Outro destaque de pesquisa envolvendo a modelagem computacional é o trabalho de Quaschnig e Hanitsch (1995), onde o comportamento de módulos fotovoltaicos quando possuem células sombreadas é estimado por métodos numéricos.

Mellit e Kalogirou (2008) descrevem em seu trabalho, algumas técnicas de IA, como redes neurais artificiais, lógica fuzzy, algoritmos genéticos e sistemas híbridos combinando mais de uma técnica para aplicação em sistemas fotovoltaicos.

Karatepe, Boztepe e Colak (2006) mostram em seu trabalho (*Neural network based solar cell model*) que a relação entre a tensão e a corrente de um módulo fotovoltaico não é linear e não pode ser expressa por qualquer equação analítica. Por conseguinte, apresentam uma forma de ultrapassar estas dificuldades aplicando o uso de uma rede neural artificial.

No capítulo 3 serão abordadas algumas das técnicas mais importantes utilizando modelos matemáticos para o cálculo da resistência série em módulos fotovoltaicos.

3 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA O CÁLCULO DA RESISTÊNCIA SÉRIE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

3.1 Introdução

A resistência série R_s de uma célula solar é um importante parâmetro que afeta a sua eficiência. É um termo que representa as perdas ôhmicas na célula, como se fosse uma combinação de muitas resistências ligadas em série e paralelo em função dos métodos de fabricação, tratamento das células e depende da profundidade da junção *pn* (AHAVI, 1997). Ela resulta da resistência da lâmina de silício, dos contatos metálicos na parte anterior e posterior da lâmina, das resistências de contatos e terminais do circuito elétrico (TEIXEIRA, 2008) e (CASTRO, 2008). A resistência paralela (*shunt*) R_p representa as perdas internas, possíveis micro defeitos do cristal que ocasionam curtos-circuitos, correntes de fuga na superfície das bordas da célula e é inversamente proporcional à corrente de fuga para a terra (COELHO, 2008), (HECKTHEUER, 2001). Em uma célula fotovoltaica ideal $R_s = 0$ (sem perdas em série) e $R_p = \infty$ (sem fugas para a terra).

Patel (1999) afirma que em uma célula de silício de alta qualidade com uma polegada quadrada, R_s varia de 50 a 100 miliohms e R_p fica entre 200 e 300 ohms e a eficiência de conversão fotovoltaica é sensível a variações na resistência série, de modo que um pequeno aumento nesta resistência pode causar uma redução significativa na potência de saída da célula, enquanto que variações na resistência paralela não tem efeito sobre a produção da célula.

3.2 Métodos para o Cálculo da Resistência Série de Módulos Fotovoltaicos

Sabendo então da relação existente entre a resistência série e a potência de saída dos módulos fotovoltaicos, foi feito um levantamento bibliográfico de trabalhos a respeito do cálculo da resistência série e comprovou-se que existem vários métodos propostos na literatura, a seguir apresentaremos alguns destes métodos pesquisados de onde se buscou o embasamento para o desenvolvimento deste trabalho.

Santos, Petry e Lima (2010) e Sissoko e Mbodji (2011) apresentam em seus trabalhos uma forma simples para o cálculo da resistência série R_s e a resistência *shunt* R_p de um módulo fotovoltaico, sendo os cálculos feitos pelas equações:

$$R_s = \frac{V_{ca} - V_{ppm}}{I_{ppm}} \quad (3.1)$$

E

$$R_p = \frac{V_{ca}}{I_{cc} - I_{ppm}} \quad (3.2)$$

Onde:

V_{ca} : Tensão de circuito aberto do módulo;

V_{ppm} : Tensão no ponto de potência máxima do módulo;

I_{ppm} : Corrente no ponto de potência máxima do módulo;

I_{cc} : Corrente de curto-circuito do módulo.

Sabry e Ghitas (2007) em seu trabalho analisaram e verificaram experimentalmente sete métodos para calcular a resistência série de uma mesma célula solar comercial e mostraram que os resultados de cada um dos métodos coincidem ou se quer aproximam-se uns dos outros. Estas diferenças são óbvias, uma vez que cada método busca uma base de informações diferente, necessárias ao cálculo das resistências, dentre os quais podemos citar:

- ✓ o número de diodos no modelo da célula fotovoltaica,
- ✓ o fator de idealidade do diodo constante ou não,
- ✓ a resistência *shunt* R_p infinita ou finita e
- ✓ a determinação simultânea de outros parâmetros ou não.

A seguir é mostrado um resumo dos sete métodos mostrados por Sabry e Ghitas (2007):

1. **Método de Duas Características.** Neste método, a característica de saída fotovoltaica é medida em duas intensidades de luz diferentes sem a necessidade de se conhecer cada magnitude. Diferente de outros métodos discutidos no trabalho de Sabry e Ghitas (2007), este método pressupõe que a resistência série R_s é independente do nível de iluminação. O valor da resistência R_s é obtido aplicando a seguinte equação:

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I_L} \quad (3.3)$$

Onde ΔI_L é a diferença entre as correntes de curto-circuito medidas nas duas intensidades de luz diferentes e ΔV é igual $(\Delta I_L) \times (R_s)$.

2. **Método do Ponto de Potência Máxima.** Este método usa a característica $I-V$ de células solares sob o mesmo nível de iluminação com os pressupostos do modelo de um diodo. O cálculo de R_s é dado por:

$$R_s = \frac{V_{ppm}}{I_{ppm}} - \frac{1}{B(I_{cc} - I_{ppm})} \quad (3.4)$$

Em que:

$$B = \frac{[I_{ppm} / (I_{cc} - I_{ppm})] + \ln[(I_{cc} - I_{ppm}) / I_{cc}]}{2V_{ppm} - V_{ca}} \quad (3.5)$$

Onde I_{ppm} , V_{ppm} são a corrente e a tensão, respectivamente, no ponto de potência máxima, I_{cc} é a corrente de curto-circuito e V_{ca} a tensão em circuito aberto.

3. **Método da Área.** Esta técnica, também usada no trabalho de Araujo e Sanchez (1982), mostra que R_s pode ser calculada a partir da seguinte expressão, supondo o modelo de um diodo:

$$R_s = 2 \left(\frac{V_{ca}}{I_{cc}} - \frac{A}{I_{cc}^2} - \frac{m \cdot V_T}{I_{cc}} \right) \quad (3.6)$$

Onde A é a área sob a característica $I-V$ em um nível de iluminação constante, I_{cc} a corrente de curto-circuito, V_T a tensão térmica e m é o fator de idealidade do diodo com valor igual a 1,41 e considerado constante ao longo de toda a característica $I-V$.

4. **Método de Curva Característica $I-V$ Única (Método El-Adawi).** Este método baseia-se no modelo de um diodo utilizando derivações matemáticas e aproximações para alguns parâmetros. Os valores de R_s deste método são calculados usando a seguinte equação:

$$R_s = mV_T \cdot \frac{1}{(I_2 - I_1)} \ln \left[\frac{I_{fg} - I_2}{I_{fg} - I_1} \right] - \left(\frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \right) \quad (3.7)$$

Em que I_{fg} é a fotocorrente e I_1 , V_1 , e I_2 , V_2 são dois pontos arbitrariamente escolhidos sobre uma curva $I-V$, e $m = 2,5$ tal como recomendado em Adawi e Nuaim (2002).

5. **Método V. N. Singh e R. P. Singh.** Neste método, a avaliação da resistência de série é proposta pela utilização de uma curva $I-V$ única a um nível de intensidade de luz moderada. Este método é derivado do modelo de um díodo, chegando uma expressão relativa de I e P , tal como:

$$P = (I_{cc} - I_0)V - I_0V \left[\exp \left(\frac{V \cdot I R_s}{m V_T} \right) \right] \quad (3.8)$$

Em que, assumindo $I_0 \ll I_{cc}$ tem-se:

$$R_s = \frac{V_{ppm}}{I_{ppm}} - \frac{m \cdot V_T}{(I_{cc} - I_{ppm})} \quad (3.9)$$

Onde $m = 2,5$ recomendado por Singh e Singh (1983, apud SABRY e GHITAS, 2007).

6. **Método de um diodo.** O método de um único diodo proposto por Chan e Phang (1987) assume que a corrente pode ser descrita por uma única dependência exponencial modificada pelo fator de idealidade (m) do diodo. Assim, a relação de corrente e tensão é dada por:

$$R_s = R_{s0} - \frac{mV_T}{I_s} \left(\exp \frac{-V_{ca}}{mV_T} \right) \quad (3.10)$$

Onde

$$m = \frac{V_{ppm} + I_{ppm} \cdot R_{s0} - V_{ca}}{V_T \left[\ln \left(I_{cc} - \frac{V_{ppm}}{R_{p0}} - I_{ppm} \right) - \ln \left(I_{cc} - \frac{V_{ca}}{R_p} \right) + \frac{I_{ppm}}{I_{cc} - (V_{ca}/R_{p0})} \right]} \quad (3.11)$$

E

$$I_s = \left(I_{cc} - \frac{V_{ca}}{R_p} \right) \exp \left(\frac{-V_{ca}}{mV_T} \right) \quad (3.12)$$

Em que R_{s0} é o declive da curva I – V com $I = 0$, e R_{p0} é o declive da curva I – V tomando $V = 0$.

7. **Método de Dois Diodos.** Este método, também proposto por Chan e Phang (1987), baseia-se no modelo de dois diodos, e tem duas soluções analíticas, nomeadamente: quadrática e cúbica, apenas o primeiro foi considerado no trabalho de Sabry e Ghitas (2007), aproveitando apenas a solução com sinal negativo da raiz, o que dá valores positivos para R_s , sendo calculado da seguinte forma:

$$R_s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.13)$$

Onde

$$a = \alpha \cdot \gamma \cdot \delta (1 - \gamma) \quad (3.14)$$

$$b = \alpha \cdot \gamma (2 - \gamma) + \alpha \cdot \gamma \cdot \delta \cdot R_{s0} (\gamma - 1) - \beta + \gamma \cdot \delta \cdot V_T (1 - 2\gamma) \quad (3.15)$$

$$c = \alpha \cdot \gamma \cdot R_{s0} (\gamma - 2) + \beta \cdot R_{s0} + 2\gamma \cdot V_T (1 - \gamma) \quad (3.16)$$

E

$$\alpha = I_{cc} - \frac{V_{ca}}{R_{p0}}, \quad \beta = I_{cc} - I_{ppm} - \frac{V_{ppm}}{R_{p0}} \quad (3.17)$$

$$\gamma = \exp\left(\frac{V_{ppm} - V_{ca}}{2V_T}\right), \quad \delta = \frac{I_{ppm}}{V_T} \quad (3.18)$$

Bashahu e Habyarimana (1995) citam 20 métodos diferentes para calcular a resistência série, dos quais doze são testados por eles, nestes doze estão incluídos os métodos 1, 2, 3 e 7 mostrados no trabalho de Sabry e Ghitas (2007). Bashahu e Habyarimana (1995) também testaram dois métodos (estático e dinâmico) com a célula no escuro.

Em Adawi e Nuaim (2002) é apresentado um método para determinar a resistência série de células fotovoltaicas partindo de uma única curva característica $I-V$ utilizando a resistência *shunt*. O método evita a posterior manipulação gráfica da curva característica $I-V$, que acontece quando se utiliza o método de duas curvas características $I-V$, além do que, utilizar duas curvas características implica em dois níveis de intensidade de luz diferentes, o que significa diferentes condições de operação da célula.

Priyanka, Lal e Singh (2007) utilizaram em seu trabalho um método baseado no modelo exponencial simples utilizando as características I_c-V_c no estado estacionário iluminado e as características $V_{ca(c)}-I_{cc(c)}$ da célula. O método mostra que a determinação da resistência série R_s não requer que a resistência paralela R_p assumam valores infinitos e portanto, valores realistas de R_p podem ser usados. Eles concluíram também que R_p é independente da luminosidade, mas R_s diminui com a intensidade da iluminação.

Para Lorenzo (1994) citado por Fiorentino e Seraphim (2005, p. 95), “a resistência série é uma característica das células solares, independentes das condições particulares de operação...”, sendo esta calculada pela equação empírica:

$$R_{S_c} = \left(1 - \frac{FF}{FF_o}\right) \cdot \frac{V_{ca(c)}}{I_{cc(c)}} \quad (3.19)$$

Em que:

R_{S_c} é a resistência série da célula fotovoltaica;

FF é o fator de forma do módulo (*fill factor*);

FF_o é o fator de forma de uma célula ideal ($R_s = 0$);

$V_{ca(c)}$ é a tensão de circuito aberto da célula;

$I_{cc(c)}$ é a corrente de curto circuito da célula.

Este método utiliza a relação entre o fator de forma do módulo (FF) e as características elétricas da célula ($V_{ca(c)}$ e $I_{cc(c)}$) para encontrar a resistência série da célula. Ele não faz menção à resistência paralela.

Para módulos com N_s células ligadas em série, a corrente de curto circuito de uma célula ($I_{cc(c)}$) é a corrente de curto circuito do módulo (I_{cc}) e a tensão de circuito aberto do módulo (V_{ca}) é dada por:

$$V_{ca} = N_s \cdot V_{ca(c)} \quad (3.20)$$

Para o caso em que o módulo tenha N_p células ligadas em paralelo, a corrente de curto circuito da célula ($I_{cc(c)}$) é dada por:

$$I_{cc(c)} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (3.21)$$

Desta forma, a resistência série do módulo calculada pelo método do Fator de Forma (FF), será dada por:

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_o}\right) \cdot \frac{V_{ca}}{I_{cc}} \quad (3.22)$$

O fator de forma (FF) de uma célula solar pode ser expresso de um modo simples, desde que a célula solar esteja bem descrita por uma lei de diodo (MARKVART; CASTAÑER, 2003, p. 393), e o fator de forma para uma célula ideal (FF_o) é calculado pela equação empírica apresentada por Green (1986, apud LORENZO, 2003, p. 950):

$$FF_o = \frac{v_{ca} - \ln(v_{ca} + 0,72)}{v_{ca} + 1} \quad (3.23)$$

Em que v_{ca} é a tensão de circuito aberto da célula normalizada.

$$v_{ca} = \frac{V_{ca(c)}}{v_{T(c)}} \quad (3.24)$$

E

$$v_{T(c)} = \frac{k.T}{q} \quad (3.25)$$

Em que:

$v_{T(c)}$: é a tensão térmica da célula, visto em Camus e Eusébio (2006).

k : é a constante de Boltzmann: $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

T : é temperatura da célula em kelvins.

q : é a carga do elétron: $1,6 \times 10^{-19}$ C.

O fator de idealidade do diodo m é considerado igual a 1 para um diodo ideal e maior que 1 para diodos reais, Krenzinger (1993, apud VERA, GASPARIN, KRENZINGER, 2008) apresenta uma expressão empírica que relaciona o fator de idealidade m com o fator de forma da curva $I-V$ da seguinte maneira:

$$m = 2,8 - 2,3 \cdot \left(\frac{I_{ppm} V_{ppm}}{I_{cc} V_{ca}} \right) \quad (3.26)$$

Rodrigues (2012) apresentou em seu trabalho um método para extração dos parâmetros de um módulo fotovoltaico a partir da solução de um sistema de equações não-lineares utilizando o Método da Região de Confiança. Os parâmetros a serem encontrados no trabalho de Rodrigues são: a fotocorrente (I_{fg}), o fator de idealidade (m), a corrente reversa (I_0), a resistência série (R_s) e a resistência *shunt* (R_p) que compõem as incógnitas para o sistema de equações não-lineares. A solução do sistema de equações não-lineares pelo Método da Região de Confiança se dá a partir da extração, de forma conveniente, de cinco pares de pontos (V_n , I_n) da curva característica I - V do módulo fotovoltaico formando assim cinco equações com cinco incógnitas, matematicamente representado por:

$$\begin{cases} f_1(x) = x_1 - x_2 \left(e^{\frac{\lambda(V_1 + I_1 x_4)}{x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_1 + I_1 x_4)}{x_5} - I_1 = 0 \\ f_2(x) = x_1 - x_2 \left(e^{\frac{\lambda(V_2 + I_2 x_4)}{x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_2 + I_2 x_4)}{x_5} - I_2 = 0 \\ f_3(x) = x_1 - x_2 \left(e^{\frac{\lambda(V_3 + I_3 x_4)}{x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_3 + I_3 x_4)}{x_5} - I_3 = 0 \\ f_4(x) = x_1 - x_2 \left(e^{\frac{\lambda(V_4 + I_4 x_4)}{x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_4 + I_4 x_4)}{x_5} - I_4 = 0 \\ f_5(x) = x_1 - x_2 \left(e^{\frac{\lambda(V_5 + I_5 x_4)}{x_3}} - 1 \right) - \frac{(V_5 + I_5 x_4)}{x_5} - I_5 = 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

Onde: $\lambda = q/kT$; $x_1 = I_{fg}$; $x_2 = I_0$; $x_3 = m$; $x_4 = R_s$ e $x_5 = R_p$

Nas simulações executadas a metodologia da Região de Confiança apresentou boas taxas de convergência mostrando-se adequada para a solução do problema apresentado. O método de Rodrigues também foi testado simulando situações de sombreamento parcial sobre o modelo de módulo fotovoltaico utilizado.

O que pode ser concluído a partir das literaturas pesquisadas ratifica a afirmação de Sabry e Ghitas (2007) em que cada método resulta em um valor diferente para a resistência série sob mesmas condições de funcionamento, ou seja, não existe um método preciso que poderia ser responsável por determinar o valor da resistência série estabelecendo um valor absoluto para cada situação. Além disso, estes trabalhos pesquisados apresentam uma

característica em comum, todos trabalharam os métodos citados com as células e módulos em condições normais de funcionamento, ou seja, totalmente iluminados ou então com a célula totalmente no escuro, considerando as variações na intensidade luminosa e na temperatura das células e módulos utilizados.

Os trabalhos pesquisados não fizeram nenhuma relação entre a variação da resistência série com uma situação de sombreamento parcial, apenas afirmam que a resistência série aumenta com a redução da potência, porém esta redução está relacionada com a redução da radiação solar e não com o bloqueio parcial de uma célula ou módulo.

Por sua vez, os trabalhos pesquisados sobre sombreamentos parciais também não fazem menção sobre o comportamento do valor da resistência série de acordo com as condições de sombreamento parcial.

3.3 Equacionamento do Módulo Fotovoltaico

A Figura 3.1 mostra o circuito equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica. A fonte de corrente no circuito representa a corrente foto-gerada ou fotocorrente I_{fg} , pelo diodo passa a corrente I_d e I_c é a corrente fornecida pela célula.

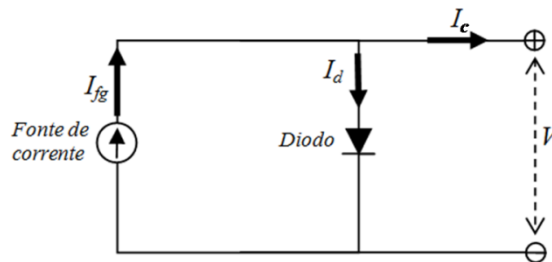


Figura 3.1: Circuito equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica.

Do circuito da Figura 3.1 temos:

$$I_c = I_{fg} - I_d \quad (3.28)$$

A corrente que flui através do diodo I_d , em função da tensão V , pode ser descrita pela equação (3.29), a qual pode ser encontrada em diversas bibliografias sobre semicondutores e sistemas fotovoltaicos, como em Patel (1999) e Messenger (2004).

$$I_d = I_0 \left[e^{qV/mkT} - 1 \right] \quad (3.29)$$

Em que:

I_0 = corrente reversa de saturação do diodo no escuro.

V = tensão nos terminais do diodo.

Substituindo (3.25) em (3.29) e esta em (3.28) tem-se a corrente da célula fotovoltaica em função da tensão V e da tensão térmica $v_{T(c)}$, representada por:

$$I_c = I_{fg} - I_0 \left[e^{V/mv_{T(c)}} - 1 \right] \quad (3.30)$$

Da equação (3.30) pode-se verificar que para $V = 0$ (curto-circuito) a corrente de curto-circuito da célula ($I_{cc(c)}$) é a própria fotocorrente gerada:

$$I_{cc(c)} = I_{fg} \quad (3.31)$$

Fazendo $I_c = 0$ na equação (3.30) a célula se autopolarizará com uma tensão tal que a corrente de polarização equilibra a fotocorrente e esta é a tensão de circuito aberto ($V_{ca(c)}$).

É óbvio, contudo, que o circuito elétrico equivalente retratado na Figura 3.1, não contempla os parâmetros de perdas associados a uma célula fotovoltaica real (não ideal), que quando inclusos, permitem obter o circuito apresentado na Figura 3.2, com a resistência paralela (*shunt*) R_p representando as perdas internas e a resistência série R_s retratando as perdas causadas devido às quedas de tensão nos contatos metálicos necessários para a corrente circular por um circuito externo.

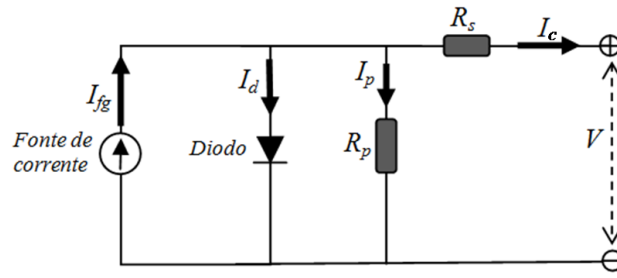


Figura 3.2: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica não ideal.

Com isto, a corrente de saída da célula I_c é igual à corrente fotogerada I_{fg} subtraindo a corrente no diodo I_d e a corrente de fuga I_p (PATEL, 1999):

$$I_c = I_{fg} - I_d - I_p \quad (3.32)$$

Do circuito equivalente:

$$I_p = \frac{V_{ca(c)}}{R_p} \quad (3.33)$$

E

$$V_{ca(c)} = V + I_c R_s \quad (3.34)$$

Portanto a equação característica para uma célula fotovoltaica não ideal é:

$$I_c = I_{fg} - I_0 \left[e^{\frac{V + I_c R_s}{m v_{T(c)}}} - 1 \right] - \frac{V + I_c R_s}{R_p} \quad (3.35)$$

A equação (3.35) característica de uma célula fotovoltaica pode ser adaptada para módulos fotovoltaicos compostos por células ligadas em série. Ao se referir a um módulo fotovoltaico a tensão térmica da célula é multiplicada pelo número de células em série que compõem o módulo (BÜHLER, 2007), ficando:

$$V_T = N_s \cdot v_{T(c)} \quad (3.36)$$

Onde V_T é a tensão térmica do módulo e N_s o número de células em série no módulo.

Combinando a equação (3.36) com a equação (3.35) e lembrando a definição da equação (3.31) tem-se a equação característica de um módulo fotovoltaico:

$$I = I_{cc} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (3.37)$$

Na equação (3.37) pode-se observar a presença da variável I nos dois lados da equação, e por isto só pode ser solucionada recorrendo ao uso de métodos iterativos, por exemplo, Newton-Raphson (CAMUS E EUSÉBIO, 2006).

O cálculo das resistências série (R_s) e paralela (R_p) para simulação da equação característica do módulo sob condições normais de funcionamento foi feito utilizando as equações (3.1) e (3.2), mostrado por Santos, Petry e Lima (2010) e por Sissoko e Mbodji (2011).

As Figuras 3.3 e 3.4 mostram as curvas características I - V e P - V plotadas para condições padrão variando a tensão V de zero a V_{ca} com algoritmo implementado no Matlab® para a equação (3.37), simulando os módulos da *ASE-Américas, Inc.* de 40 W e da *SolarWorld* de 75 W, utilizados na coleta de dados para este trabalho.

Todos os gráficos desta dissertação foram plotados utilizando o *Software Origin 8.5*, que é um *software* gráfico não livre para análise de dados e estatística, desenvolvido pela *OriginLab* para execução em plataforma Windows. O *software* pode ser adquirido diretamente na página oficial www.originlab.com e atualmente está na versão 9.1.

A Tabela 3.1 mostra os valores fornecidos pelos fabricantes de cada módulo e os obtidos na simulação da equação (3.37).

Tabela 3.1: Dados técnicos dos módulos e valores simulados.

	Módulo ASE-Américas, Inc.		Módulo SolarWorld.	
	Fabricante	Simulado	Fabricante	Simulado
Potência nominal (P_{max})	40 W	40,05 W	75 W	74,93 W
Tensão em circuito aberto (V_{ca})	20,50 V	20,50 V	21,70 V	21,70 V
Tensão nominal (V_{ppm})	16,60 V	16,90 V	17,30 V	18,10 V
Corrente de curto-circuito (I_{cc})	2,80 A	2,80 A	4,80 A	4,80 A
Corrente nominal (I_{ppm})	2,45 A	2,37 A	4,34 A	4,14 A

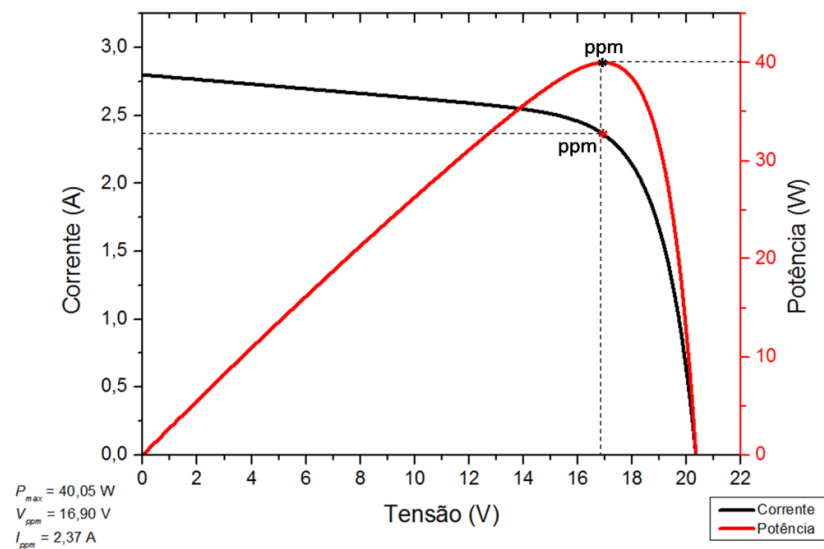


Figura 3.3: Curvas I - V e P - V simuladas para o módulo ASE-Américas, Inc. de 40 W.

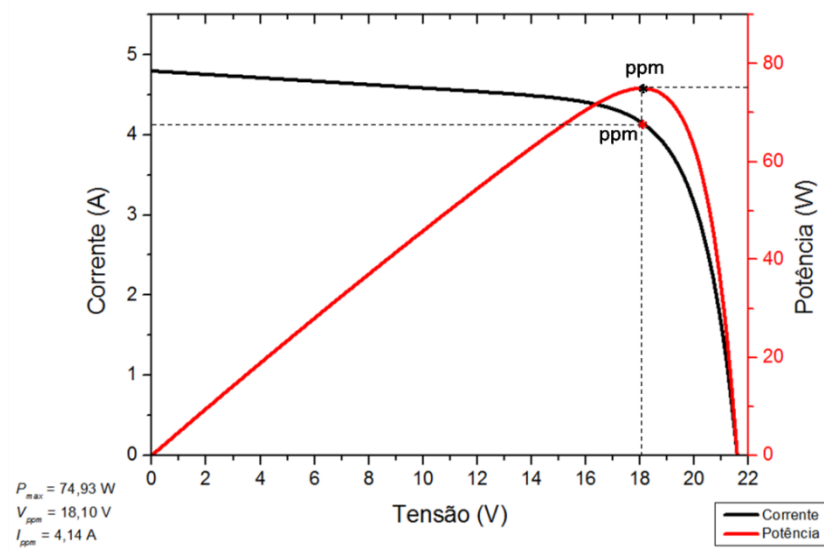


Figura 3.4: Curvas I - V e P - V simuladas para o módulo da SolarWorld de 75 W.

A Tabela 3.2 mostra as diferenças entre os valores da simulação da equação característica do módulo em relação aos dados dos fabricantes.

Tabela 3.2: Diferenças entre os valores simulados na equação (3.37) e dados dos fabricantes dos módulos.

	Módulo ASE-Américas, Inc.	Módulo SolarWorld.
Potência nominal (P_{max})	+ 0,09%	- 0,09%
Tensão nominal (V_{ppm})	+ 1,81%	+ 4,62%
Corrente nominal (I_{ppm})	- 3,27%	- 4,61%

3.4 Efeitos da Temperatura e da Radiação sobre os Módulos Fotovoltaicos

Observando as equações 3.35 e 3.36, é fácil verificar que a temperatura de funcionamento da célula influencia a corrente e a tensão de saída através da tensão térmica V_T . No caso da corrente o efeito da temperatura é desprezível, mas no caso da tensão não, o seu valor é reduzido linearmente com o aumento da temperatura. A amplitude desta redução da tensão é inversamente proporcional à tensão de circuito aberto (V_{ca}), ou seja, quanto maior a tensão que o módulo consegue produzir menor será o efeito do aumento da temperatura sobre esta. Para a maioria das células de silício cristalino esta redução é da ordem de 0,50%/°C e para o silício amorfo a redução é da ordem de 0,25%/°C (BONIFÁCIO, 2010).

3.4.1 Efeitos da Temperatura

O aumento da temperatura de uma célula provoca um discreto aumento na fotocorrente, da ordem de $30\mu\text{A}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2$, para valores baixos de tensão, sendo que este aumento é decorrente da diminuição da energia da banda proibida devido ao aumento da temperatura (CUMBANE, 1994).

A corrente de curto-circuito (I_{cc}) é proporcional à radiação e tem um coeficiente de temperatura positivo, enquanto a tensão de circuito aberto (V_{ca}) tem um coeficiente de temperatura negativo e depende em razão logarítmica da radiação, ou seja, quando a temperatura da célula aumenta, a corrente de curto-circuito aumenta e a tensão de circuito aberto diminui (CARDADOR, 2011).

A Figura 3.5 mostra as curvas $I-V$ e $P-V$ simuladas com a equação 3.37 para os efeitos da temperatura com radiação constante ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) e a Figura 3.6 mostra as curvas $I-V$ e $P-V$ com dados reais colhidos nos módulos da ASE-Américas, Inc.

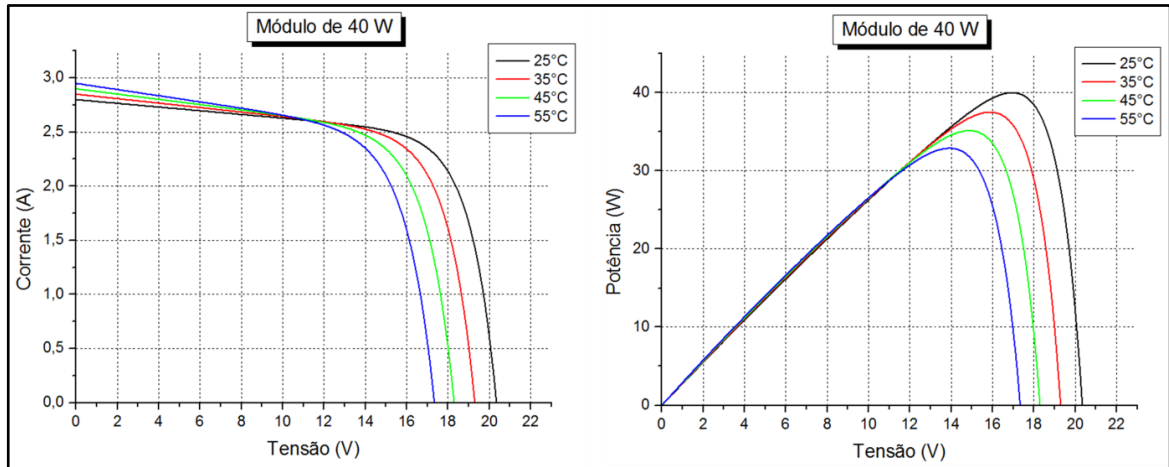


Figura 3.5: Simulação do efeito da temperatura com a radiação constante sobre o módulo de 40 W.

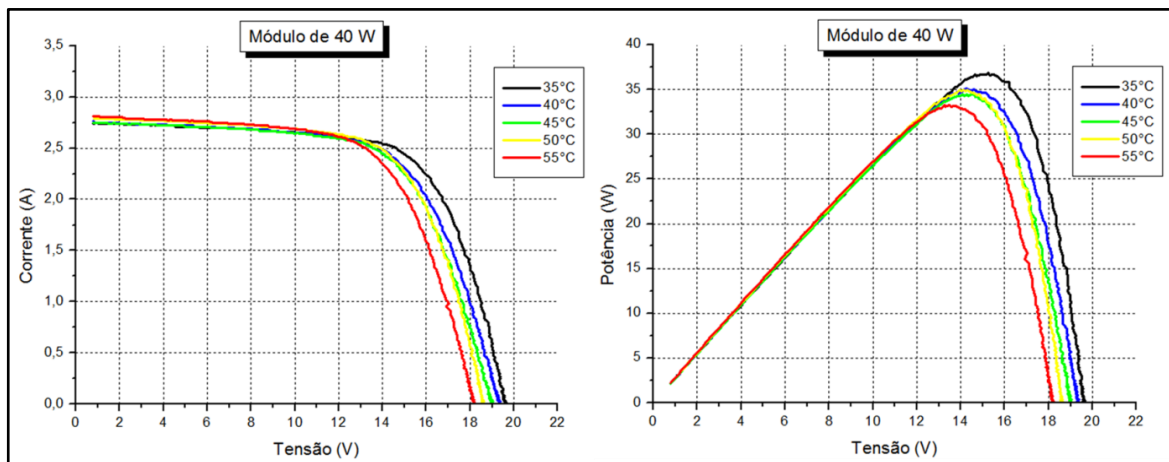


Figura 3.6: Efeitos reais da temperatura sobre o módulo da ASE-Américas, Inc.

A Figura 3.7 mostra as curvas $I-V$ e $P-V$ simuladas com a equação 3.37 para os efeitos da temperatura com radiação constante ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) e a Figura 3.8 mostra as curvas $I-V$ e $P-V$ com dados reais colhidos nos módulos da *SolarWorld*.

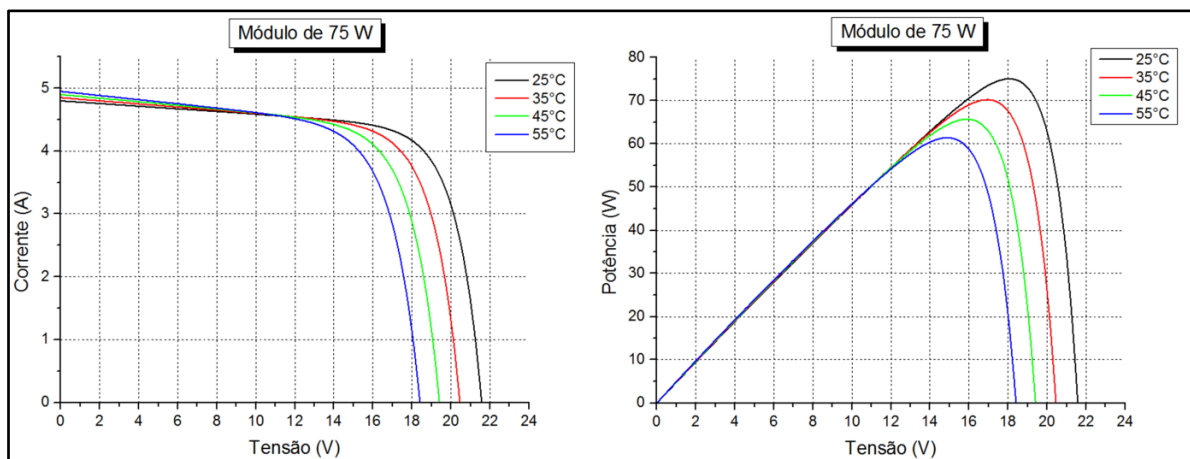


Figura 3.7: Simulação do efeito da temperatura com a radiação constante sobre o módulo de 75 W.

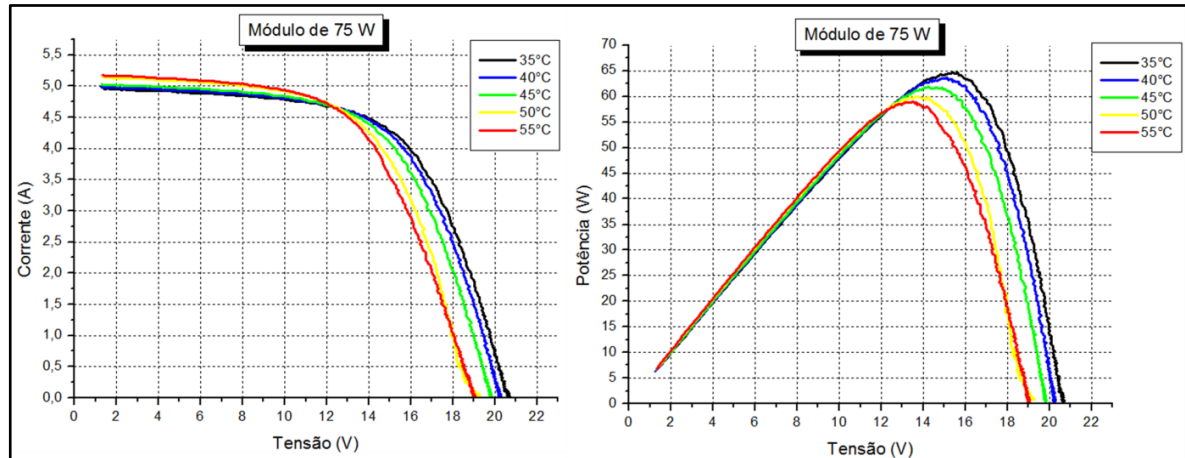


Figura 3.8: Efeitos reais da temperatura, com radiação constante, sobre o módulo de 75 W.

3.4.2 Efeitos da Radiação

Uma mudança na intensidade da radiação solar provoca uma variação proporcional na corrente de curto circuito I_{cc} , independente da tensão, que varia muito pouco em comparação à variação da corrente. Para uma radiação solar de 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C uma célula de silício monocristalino tem densidade em torno de 30 mA/cm^2 (CUMBANE, 1994), (ALCÂNTARA, 2010).

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, as curvas $I-V$ e $P-V$ com a sobreposição dos dados reais colhidos nos módulos da ASE-Américas, Inc. e as simulações com a equação 3.37 para o efeito da radiação com temperatura constante (25°C).

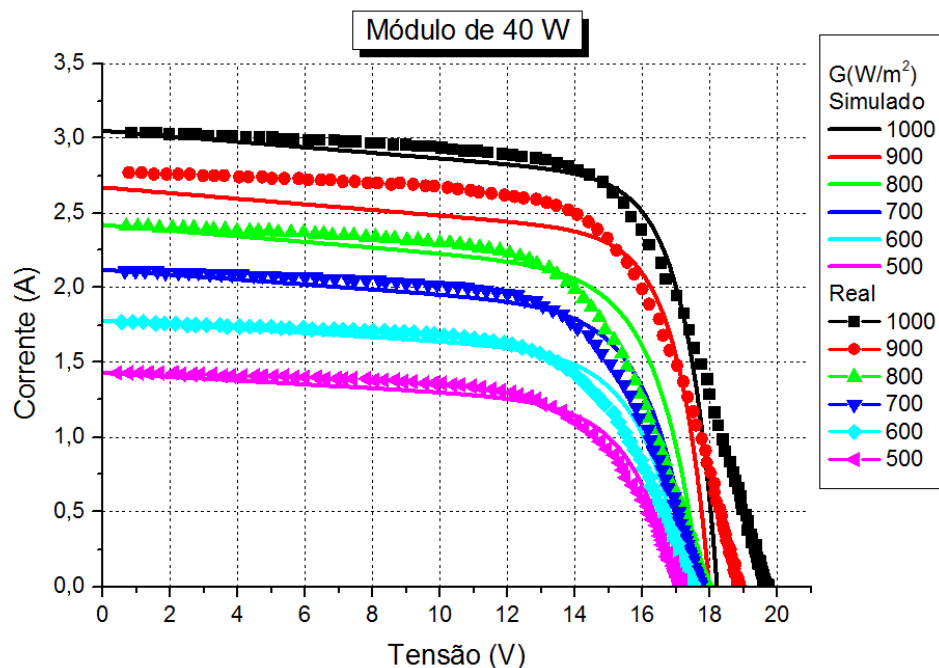


Figura 3.9: Efeitos da radiação na curva $I-V$ com temperatura constante no módulo da ASE-Américas, Inc.

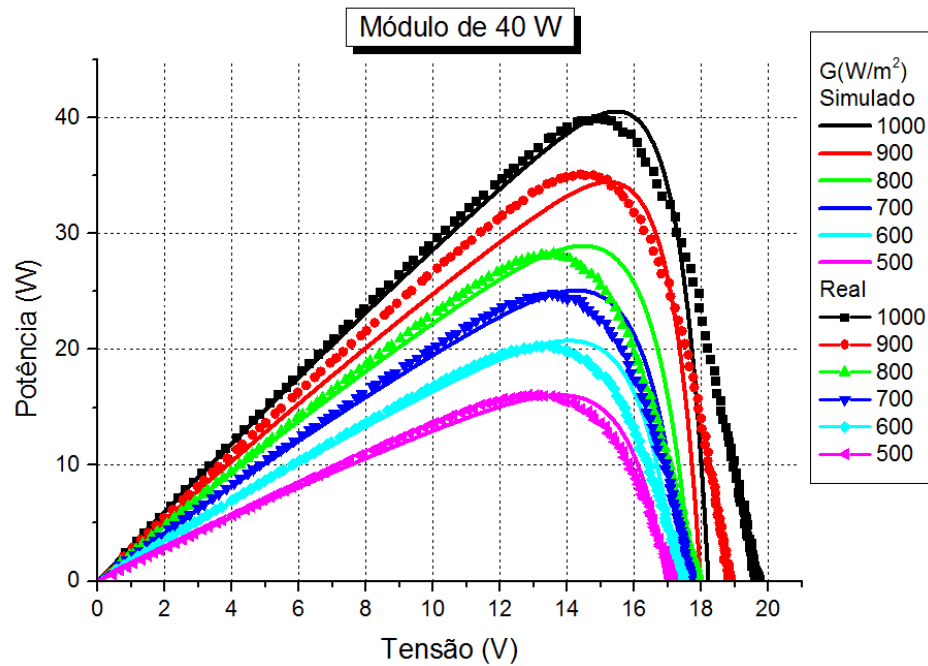


Figura 3.10: Efeitos da radiação na curva P - V com temperatura constante no módulo da ASE-Américas, Inc.

As Figuras 3.11 e 3.12 mostram, respectivamente, as curvas I - V e P - V com a sobreposição dos dados reais colhidos nos módulos da *SolarWorld* e as simulações com a equação 3.37 para o efeito da radiação com temperatura constante (25°C).

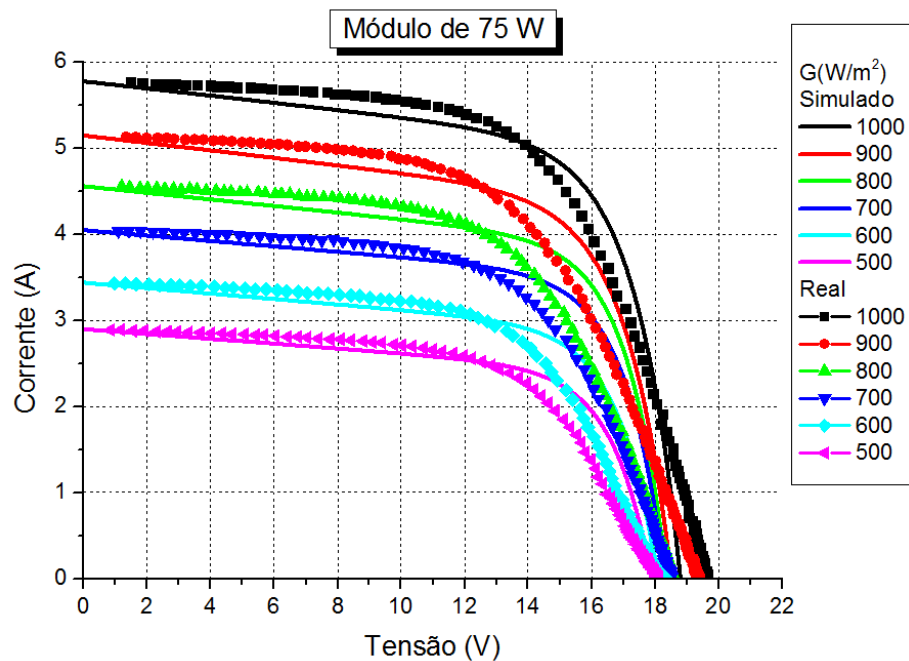


Figura 3.11: Efeitos da radiação na curva I - V com temperatura constante no módulo da *SolarWorld*.

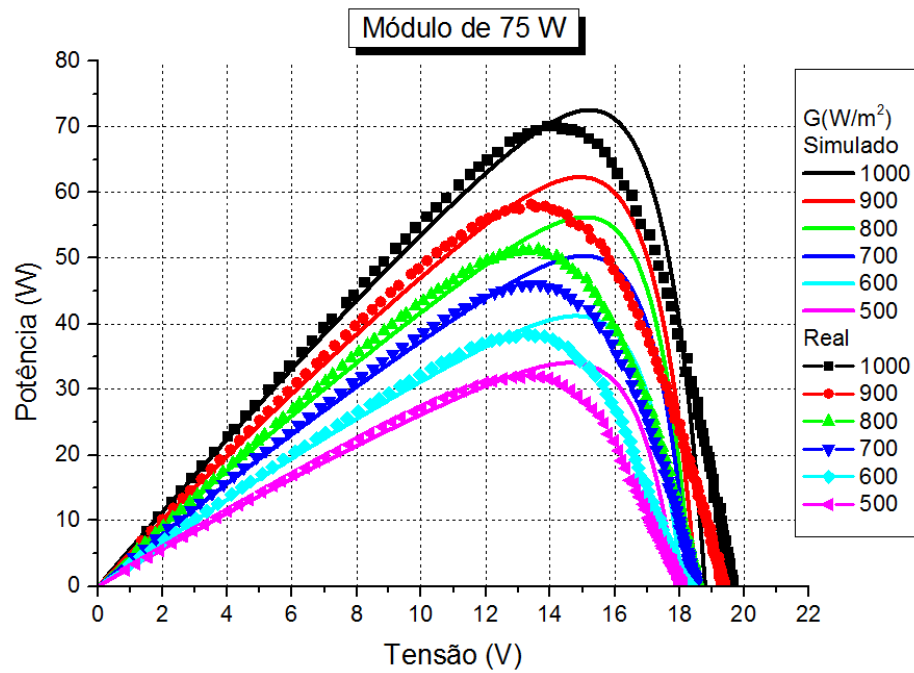


Figura 3.12: Efeitos da radiação na curva P - V com temperatura constante no módulo da *SolarWorld*.

No capítulo 4 são apresentados os modelos dos módulos fotovoltaicos utilizados nesta pesquisa, a metodologia aplicada para a obtenção dos dados em campo referentes aos tipos de sombreamentos parciais propostos e a análise do impacto destes sombreamentos sobre a potência de saída e nas curvas características dos módulos.

4 SOMBREAMENTO PARCIAL E OBTENÇÃO DE DADOS

4.1 Introdução

Em sistemas de geração de energia fotovoltaica de baixa potência como os residenciais, os módulos fotovoltaicos geralmente são instalados sobre o telhado ou em outro local em posição fixa, devido o fato de não ser financeiramente interessante instalar rastreadores mecânicos para acompanhar o movimento relativo do Sol neste tipo de sistema, o que faz com que o sombreamento parcial da estrutura seja praticamente inevitável, podendo ser causado por folhas caídas, sujeidade de pássaros, depósito de neve, além do próprio movimento relativo do Sol; que muda no decorrer do ano podendo projetar sombras de árvores, postes ou construções vizinhas sobre partes dos módulos. Na variedade de estudos, alguns chegam a afirmar que a diminuição na potência de saída é proporcional à área sombreada e à radiação solar. Porém, este conceito só é válido para uma única célula solar. Já em nível de módulos e arranjos fotovoltaicos a situação é diferente, não havendo uma linearidade entre as perdas de produção e a área sombreada (SÉRA; BAGHZOUZ, 2008), pois em geral, os módulos têm diodos de desvio (*by-pass*) conectados a grupos de células para proteção contra consequências causadas por incompatibilidades de células do módulo, sejam causadas por defeitos ou por sombreamentos parciais.

4.2 Diodos *by-pass*

O diodo é o semicondutor mais simples e possibilita que uma corrente flua apenas em uma direção. Quando uma das células de um módulo fotovoltaico, por algum motivo, estiver encoberta a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Uma célula bloqueada deixa de fornecer energia e ainda passa a ter um comportamento de carga, absorvendo parte da energia produzida por suas vizinhas não sombreadas, provocando um aquecimento excessivo na célula (*hot-spot*) que pode causar danos irreversíveis às células individuais do módulo. Estes efeitos do sombreamento parcial podem ser atenuados através da utilização de um diodo *by-pass* ligado em antiparalelo com as células sombreadas, evitando que a corrente do módulo seja limitada por uma célula em condições incompatíveis com as demais. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na

célula incompatível (VEMURU, SINGH e NIAMAT, 2012). Desta forma, a célula sombreada ou em desigualdade com as demais não fornece energia, mas também não se comporta como carga para as outras células vizinhas (HECKTHEUER, 2001). No entanto, o número de diodos de desvio em um módulo é normalmente limitado, de modo que o sombreamento de uma única célula afeta um percentual significativo das células do módulo, pois o diodo desvia a corrente de todo o grupo ao qual está conectado (GUO et al, 2012).

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) estabelece por Norma Técnica que os fabricantes de módulos fotovoltaicos devem usar no mínimo dois diodos de desvio por módulo.

Os diodos *by-pass* tornaram-se uma característica padrão em conjuntos de células solares para melhorar o desempenho do módulo. Quando conectado através de grupos de 12 a 18 células ligadas em série no módulo esses diodos protegem o módulo dos efeitos destrutivos da incompatibilidade de células, como o causado pelo sombreamento parcial (HASYIM; WENHAM; GREEN, 1986).

A utilização de diodos *by-pass* se faz em grupos de células e não por célula para reduzir custos de produção do módulo, visto que tecnologicamente não há nenhum impedimento para a inclusão de um diodo por célula na construção do módulo, apenas motivos econômicos impedem a sua utilização em larga escala (BONIFÁCIO, 2010).

4.3 Sombreamento Parcial sobre Módulos Fotovoltaicos

É conhecido que o sombreamento parcial de módulos e painéis fotovoltaicos pode reduzir a potência de saída de um sistema fotovoltaico. Este problema tem sido extensivamente tratado na literatura, devido às consequências causadas por ele, como a formação de *hot-spots* e danos nas células, há também vários estudos sobre a importância da utilização de diodos *by-pass* e a perda de potência devido à redução da irradiação média e perdas de compatibilidade entre células. Uma sombra cobrindo um grupo de células irá reduzir a produção total de energia basicamente por duas razões: pela redução da energia fornecida à célula devido ao bloqueio causado pela sombra e pelo aumento das perdas de energia nas células sombreadas (RAMABADRAN e MATHUR, 2009). A partir de estudos de caso sabe-se que os sistemas fotovoltaicos com a mesma potência nominal podem ter diferentes produções de energia devido a diferentes padrões de sombreamento (HANITSCH; SCHULZ; SIEGFRIED, 2001).

De um ponto de vista diagnóstico, é importante detectar tais eventos como o sombreamento parcial, porque uma falha de uma ou mais células geralmente significa redução ou nenhuma produção de energia dessas células. Ao cobrir uma célula inteira de um grupo de células ligadas em série com um diodo *by-pass* conectado em antiparalelo, ocorre polarização reversa, e a célula passa a atuar como uma carga, transformando a maior parte da energia produzida pelo resto do grupo em calor. Embora o número de células por diodo *by-pass* seja geralmente selecionado de tal modo que as células sejam protegidas da degradação causada pela polarização reversa, uma célula continuamente exposta a estas condições desfavoráveis envelhecerá eventualmente mais rapidamente, causando incompatibilidade de funcionamento no módulo (BONIFÁCIO, 2010), (SÉRA, 2009), (KOVACH; SCHMID, 1996).

Um conjunto de módulos fotovoltaicos, ligados em série, paralelos ou de forma mista (série/paralelo), compõe os painéis fotovoltaicos. O tipo de ligação entre os módulos é definido de acordo com a necessidade de se gerar tensão e corrente com valores suficientemente elevados para determinada demanda de energia, contudo, alguns destes módulos ou parte deles podem sofrer de sombreamento parcial causado por árvores, nuvens, sujidades acumuladas, etc. Neste caso, a energia gerada a partir de cada módulo fotovoltaico torna-se assimétrica de modo que a potência total de saída diminui consideravelmente. Além disso, a formação de *hot-spots*, efeito causado pela sombra parcial, é susceptível de danificar as células fotovoltaicas e afetar a produtividade e a segurança do sistema fotovoltaico (ZHANG et al, 2009).

4.4 Obtenção de Dados em Condições de Sombreamento Parcial

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois modelos de módulos fotovoltaicos, o primeiro da marca *ASE-Américas, Inc.* com 40 W de potência nominal, fabricado e utilizado há 15 anos no Instituto Federal Goiano (IFGoiano) – Campus Urutaí, sendo três exemplares deste modelo (Figura 4.1) e o segundo, com dois exemplares (Figura 4.2), cedidos pelo Núcleo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), da marca *SolarWorld* com potência nominal de 75 W, sendo estes novos e sem ter sido usados em campo até então. Os dois modelos utilizados possuem 36 células cada um, conectadas em série com dois diodos de desvio, cada um conectado em antiparalelo a um grupo de 18 células, ou seja, cada módulo é composto por dois grupos de 18 células. Para a coleta dos dados foi utilizado um *Mini KLA PV I-V Curve Analyser* da

INGENIEURBÜRO Mencke & Tegtmeyer com célula piloto acoplada aos módulos. A célula piloto faz a medição da radiação solar e da temperatura da superfície da célula no momento da leitura. A Tabela 4.1 mostra os dados técnicos dos dois modelos de módulos utilizados.



Figura 4.1: Módulos de 40 W da ASE–Américas, Inc. cedidos pelo IFGoiano – Campus Urutaí.



Figura 4.2: Módulos de 75 W da SolarWorld cedidos pelo Núcleo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Uberlândia.

Tabela 4.1: Dados técnicos fornecidos pelos fabricantes dos módulos utilizados.

	Módulo da ASE–Américas, Inc.	Módulo da SolarWorld
Potência nominal (P_{max})	40 W	75 W
Tensão em circuito aberto (V_{ca})	20,50 V	21,70 V
Tensão nominal (V_{ppm})	16,60 V	17,30 V
Corrente de curto-circuito (I_{cc})	2,80 A	4,80 A
Corrente nominal (I_{ppm})	2,45 A	4,34 A
Número de células em série	36	36
Área da célula	100 cm ²	136 cm ²

Com o uso do *mini KLA* acoplado ao módulo, em cada leitura tem-se o registro dos parâmetros:

- V_{ppm} : Tensão no ponto de potência máxima em volts [V].
- I_{ppm} : Corrente no ponto de potência máxima em ampères [A].
- P_{max} : Potência máxima em watts [W].
- V_{ca} : Tensão de circuito aberto em volts [V].
- I_{cc} : Corrente de curto circuito em ampères [A].
- G : Intensidade da radiação solar em watts por metro quadrado [W/m^2].
- T_c : Temperatura do módulo em graus Celsius [$^{\circ}\text{C}$].
- FF : Fator de Forma (*Fill Factor*) em porcentagem [%].

A Figura 4.3 mostra a interface do *software* de leitura e gravação dos dados colhidos pelo *mini KLA* onde cada leitura é salva em um arquivo txt. Além dos parâmetros supracitados em cada leitura é registrado um conjunto com valores da corrente e da tensão variando da condição de circuito aberto até o curto-circuito do módulo. Com estes dados é possível a construção das curvas características $I-V$ e $P-V$ reais para cada situação registrada e avaliar o comportamento dos módulos sob as condições de sombreamento parcial propostas.

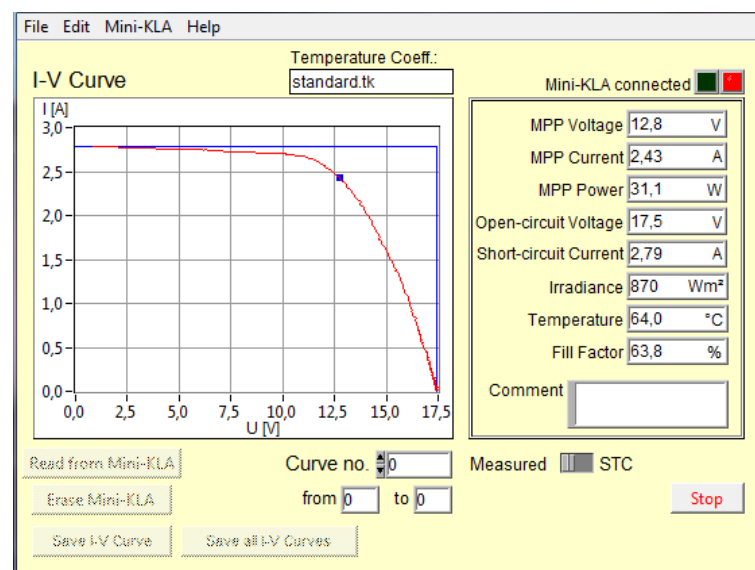


Figura 4.3: Interface do *mini KLA* utilizado na coleta de dados.

4.5 Processo de Sombreamento dos Módulos

O processo de sombreamento parcial proposto foi dividido e aplicado de duas formas: pelo tamanho do sombreamento e pela sua posição sobre o módulo. Para o controle do posicionamento do sombreamento parcial e organização das leituras, as 36 células dos módulos foram enumeradas em sequência conforme mostra a Figura 4.4, que também ilustra a posição de conexão dos diodos *by-pass*. Com relação ao tamanho do sombreamento foram sombreadas duas áreas: a primeira de aproximadamente 3% (equivalente a uma célula inteira das 36 do módulo) posicionada de três formas (100% de uma célula, 50% de duas células e 25% de quatro células) como ilustra a Figura 4.5 e a segunda de aproximadamente 6% (equivalente a duas células inteiras das 36 do módulo) posicionada de duas formas (100% de duas células e 50% de quatro células) como mostrado na Figura 4.6. O bloqueio simulando a situação de sombreamento parcial foi feito utilizando-se um anteparo opaco que foi posicionado sobre cada célula e conjunto de células, varrendo toda a área fotovoltaica dos módulos. Os diodos *by-pass* dos módulos foram desconectados e todo o processo de sombreamento parcial foi repetido para a comparação das leituras com e sem os diodos.

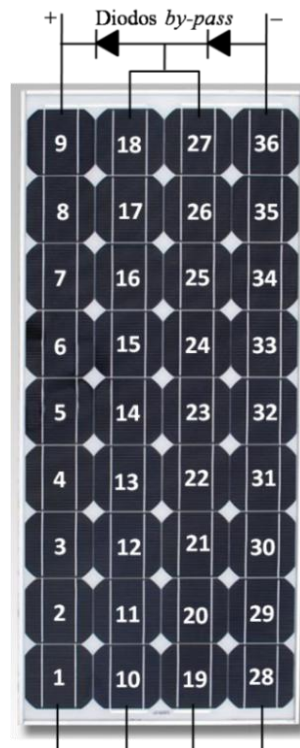
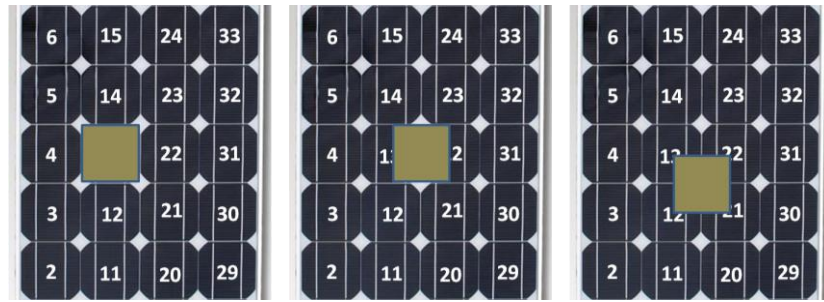
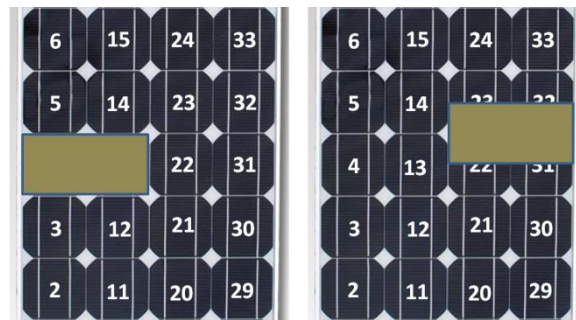


Figura 4.4: Identificação das células do módulo para localização do sombreamento parcial e a representação da conexão dos diodos *by-pass*.



(a) 100% de 1 célula (b) 50% de 2 células (c) 25% de 4 células

Figura 4.5: Tipos de sombreamento parcial de 3% da área fotovoltaica dos módulos de 40 W e de 75 W.



(a) 100% de 2 células (b) 50% de 4 células

Figura 4.6: Tipos de sombreamento parcial de 6% da área fotovoltaica dos módulos de 40 W e de 75 W.

O propósito de se varrer todo o módulo com a mesma área sombreada, mas bloqueando a célula individualmente de formas diferentes, foi para avaliar o comportamento das curvas características $I-V$ e $P-V$ com e sem os diodos *by-pass* nos diferentes tipos de sombreamentos propostos e se haveria variações significativas na potência de saída do módulo de acordo com a posição da sombra para as mesmas condições de radiação e temperatura. Após cada dia de coleta de dados, que era feita entre 11h e 13h, para melhor aproveitamento da incidência solar, uma vez que os módulos eram sempre colocados na horizontal, as leituras eram classificadas e separadas em grupos de acordo com o tipo de sombreamento, temperatura do módulo e nível de radiação.

4.6 Impacto do Sombreamento Parcial sobre a Potência de Saída e nas Curvas Características dos Módulos Fotovoltaicos Utilizados

Dada a disponibilidade de apenas um *Mini KLA* para a coleta de dados, a cada conjunto de cinco leituras com o módulo sombreado era feita uma leitura com o módulo plenamente iluminado (sem sombreamento), para geração de curvas de referência. A Figura

4.7 mostra as curvas características $I-V$ e $P-V$ do módulo de 40 W sem sombreamento, plotadas para referência em sombreamentos com radiação solar (G) entre 900 e 1000 W/m^2 e temperatura (T) entre 35 e 45°C. A Figura 4.8 mostra as curvas características do módulo de 75 W sem sombreamento para as mesmas condições de G e T .

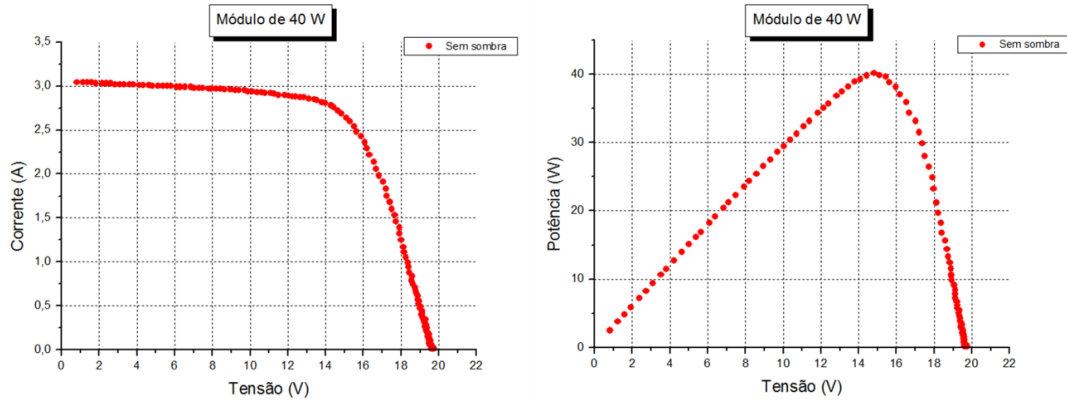


Figura 4.7: Curvas $I-V$ e $P-V$ sem sombreamento dos módulos de 40 W da ASE-Américas, Inc.

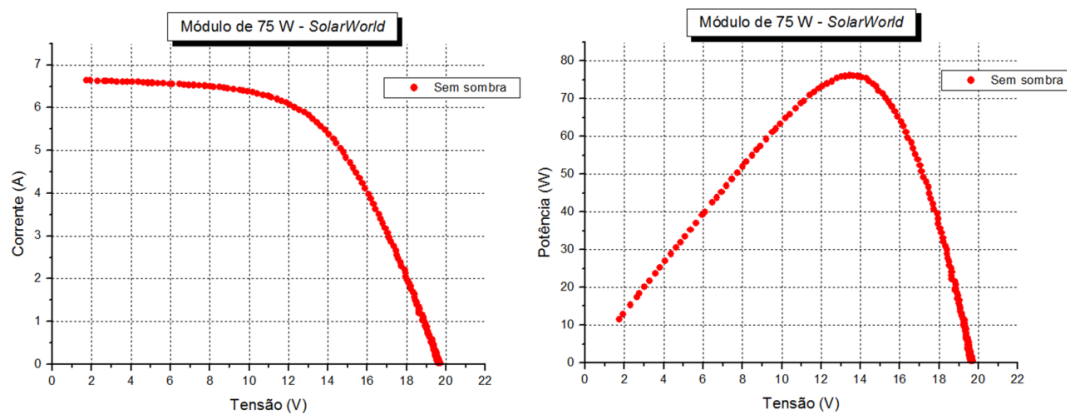


Figura 4.8: Curvas $I-V$ e $P-V$ sem sombreamento dos módulos de 75 W da SolarWorld.

Iniciado o procedimento de sombreamento parcial sobre os módulos, as leituras foram plotadas para a análise do impacto sobre as curvas características de acordo com o tipo de sombreamento proposto, com e sem a conexão dos diodos *by-pass*.

4.6.1 Sombreamento de 100% de uma célula

O primeiro tipo de sombreamento parcial proposto cobre uma célula inteira do módulo [Figura 4.5(a)], equivalente a aproximadamente 3% da área fotovoltaica do módulo.

4.6.1.1 Módulo da SolarWorld

Os módulos da *SolarWorld* (novos) apresentaram, neste sombreamento, curvas $I-V$ e $P-V$ muito parecidas entre si, com várias delas praticamente sobrepostas para condições de temperatura e radiação próximas. A Figura 4.9 mostra, como exemplo, as curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento das células 1 e 19 no módulo de 75 W com e sem a conexão dos diodos *bypass*. No período da coleta de dados para este exemplo a radiação solar variou entre 957 W/m^2 e 993 W/m^2 e a temperatura dos módulos esteve entre 62°C e 65°C . A Tabela 4.2 mostra os dados obtidos para este exemplo.

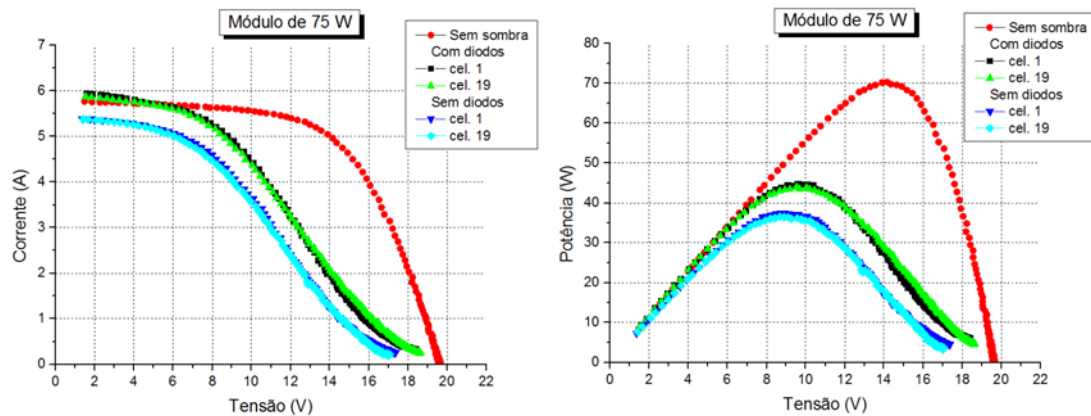


Figura 4.9: Curvas $I-V$ e $P-V$ dos dois módulos de 75 W com sombreamento nas células 1 e 19 com e sem os diodos *bypass*.

Tabela 4.2: Sombreamento das células 1 e 19 do módulo de 75 W com e sem os diodos *bypass*.

	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m^2]	T [$^\circ\text{C}$]	FF [%]
Sem sombra	14,09	4,99	70,33	19,64	5,78	993,0	63	61,9
Módulo da SolarWorld com diodos <i>bypass</i>								
Célula 1	10,06	4,46	44,85	18,38	6,00	983,5	63	40,7
Célula 19	9,72	4,54	44,07	18,58	5,93	986,3	62	40,0
Módulo da SolarWorld sem diodos <i>bypass</i>								
Célula 1	9,17	4,11	37,69	17,34	5,43	957,0	64	40,0
Célula 19	9,01	4,06	36,61	17,04	5,43	958,0	65	39,6

Da tabela 4.2 verifica-se que a potência de saída do módulo teve redução média de 36,5% no sombreamento das células 1 e 19 com os diodos *bypass* conectados e de 47% com os diodos desconectados. Observa-se também redução média de 5,9% na tensão de circuito aberto (V_{ca}) com os diodos conectados e 12,5 % sem os diodos. Já a corrente de curto-circuito

(I_{cc}) teve aumento médio de 3,2% com os diodos conectados e redução de 6,1% sem os diodos.

4.6.1.2 Módulos da ASE–Américas, Inc.

Os módulos de 40 W da ASE–Américas, Inc. como já citado, têm 15 anos de fabricação e estavam em uso no IF Goiano – Campus Urutaí, com uma reforma feita no setor em que os módulos eram utilizados, estes foram retirados e cedidos ao laboratório de Física do Instituto para aulas práticas e por isto puderam ser utilizados nas coletas de dados desta pesquisa. O intuito de se utilizar módulos com mais de meia vida de uso (estimativa de utilização entre 20 e 30 anos pelos fabricantes) é de verificar o comportamento dos mesmos diante das situações de sombreamento propostas. Não é possível estabelecer uma condição de envelhecimento destes módulos, pois não temos módulos novos de mesma marca e potência para efeito de comparação, mas é possível verificar num contexto geral se as células destes módulos tiveram ao longo dos anos um envelhecimento e desgaste uniforme ou desigual.

Com o sombreamento de uma célula inteira nos módulos de 40 W (usados) com os diodos conectados, algumas células também tiveram sobreposição de curvas para as mesmas condições de temperatura e radiação, mas várias outras tiveram curvas distintas entre si e em relação às demais sobrepostas. A Figura 4.10 mostra as curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento da célula 6 nos três módulos de 40 W e a Tabela 4.3 mostra as leituras destes sombreamentos, onde cada módulo apresentou um comportamento distinto das curvas características e teve uma potência de saída diferente em cada módulo com condições de radiação e temperatura próximas.

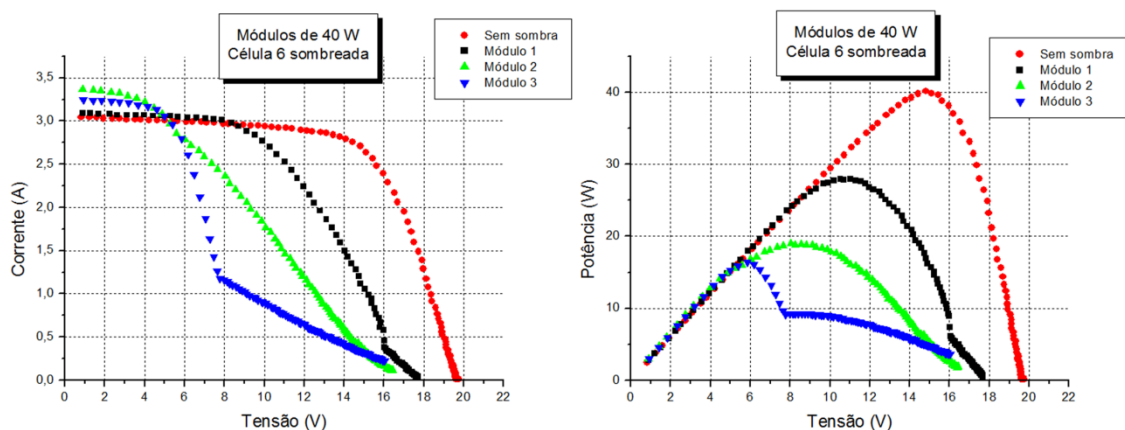


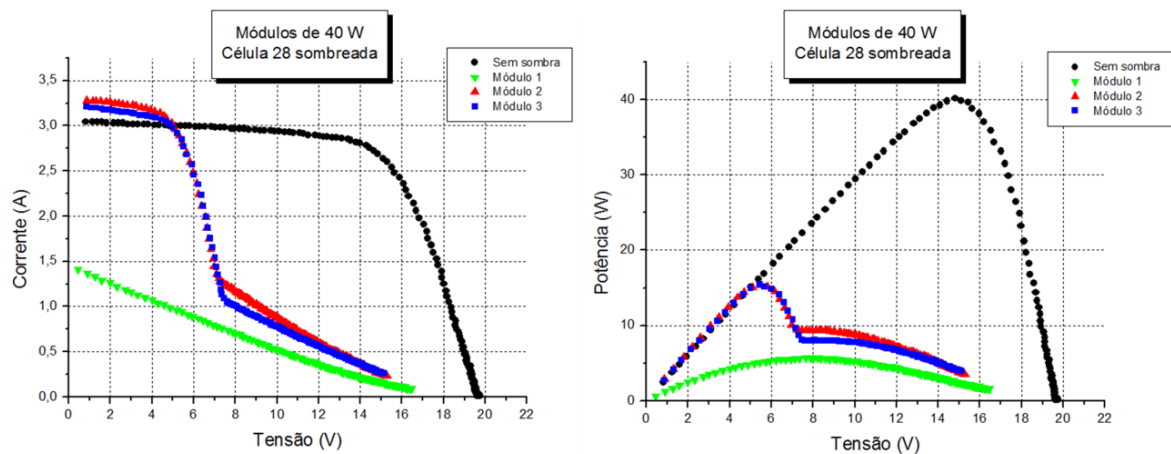
Figura 4.10: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento da célula 6 nos módulos de 40 W com diodos *by-pass*.

Tabela 4.3: Sombreamento da célula 6 nos módulos da ASE–Américas, Inc. com diodos *by-pass*.

Célula 6	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	14,56	2,76	40,12	19,21	3,10	1012,8	45	67,4
Módulo 1	10,52	2,66	27,93	17,68	3,10	1000,8	58	51,0
Módulo 2	8,39	2,26	19,01	16,43	3,40	1017,0	66	34,0
Módulo 3	5,85	2,80	16,42	15,98	3,26	1048,7	68	31,5

O sombreamento da célula 6 nos módulos de 40 W reduziu a potência de saída em 30,4%, 52,6% e 59,1% respectivamente nos módulos 1, 2 e 3, diferenças significativas considerando o mesmo tipo de sombreamento e condições de temperatura e radiação próximas, o que pode ser um indício de desgaste desigual nos módulos ao longo dos anos.

A Figura 4.11 mostra o sombreamento da célula 28 e, como pode ser observado, as curvas se sobrepõem nos módulos 2 e 3 mas difere no módulo 1.

Figura 4.11: Curvas I - V e P - V do sombreamento da célula 28 nos módulos de 40 W com diodos *by-pass*.

A forma das curvas I - V e P - V da célula 28 no módulo 1 coincide com a forma da maioria das células do grupo de 19 a 36, ou seja, o grupo de células conectadas a um dos diodos *by-pass* do módulo. Isto levantou uma suspeita que foi confirmada ao abrir a caixa de conexão do módulo 1, onde as conexões estavam oxidadas e um dos diodos (o do grupo de células de 19 a 36) estava rompido e por isso o módulo estava funcionando com metade das células conectadas a um diodo e a outra metade não, a Figura 4.12 mostra a caixa de conexão do módulo 1 com os contatos oxidados e o diodo rompido. Os outros dois módulos tinham suas caixas de conexão em boas condições e seus diodos conectados e funcionando normalmente (Figura 4.13). Visto que a caixa de conexão do módulo 1 não se apresentava em boas condições e não havendo um diodo de substituição disponível, este módulo foi retirado das demais coletas de dados.

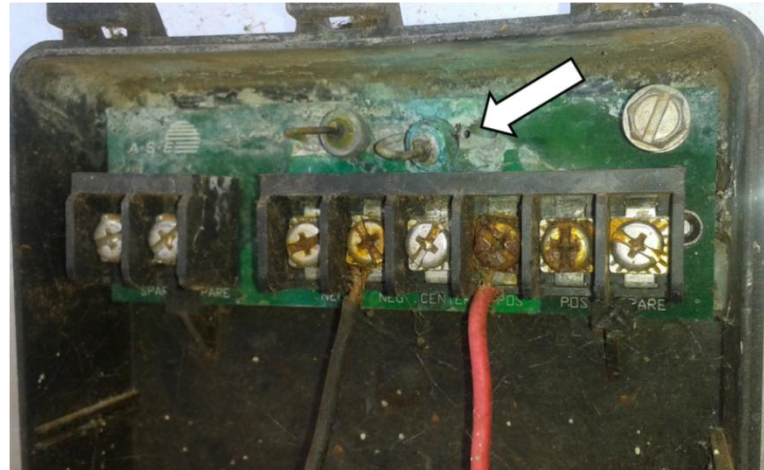


Figura 4.12: Caixa de conexão do módulo 1 da ASE-América, Inc. com contatos oxidados e diodo *by-pass* rompido.



Figura 4.13: Caixa de conexão do módulo 2 da ASE-América, Inc. com contatos em boas condições e diodos *by-pass* conectados.

A Figura 4.14 mostra as curvas $I-V$ e $P-V$ para as células 8, 17, 26 e 35 confirmando a ação de proteção do diodo para o grupo das células 8 e 17 e a falta do diodo para o grupo das células 26 e 35. A Tabela 4.4 mostra as leituras destes sombreamentos onde a redução na potência de saída com o sombreamento da célula 8 foi de 58,0% (com os diodos *by-pass* conectados) e na célula 26 foi de 86,3% (sem os diodos *by-pass*).

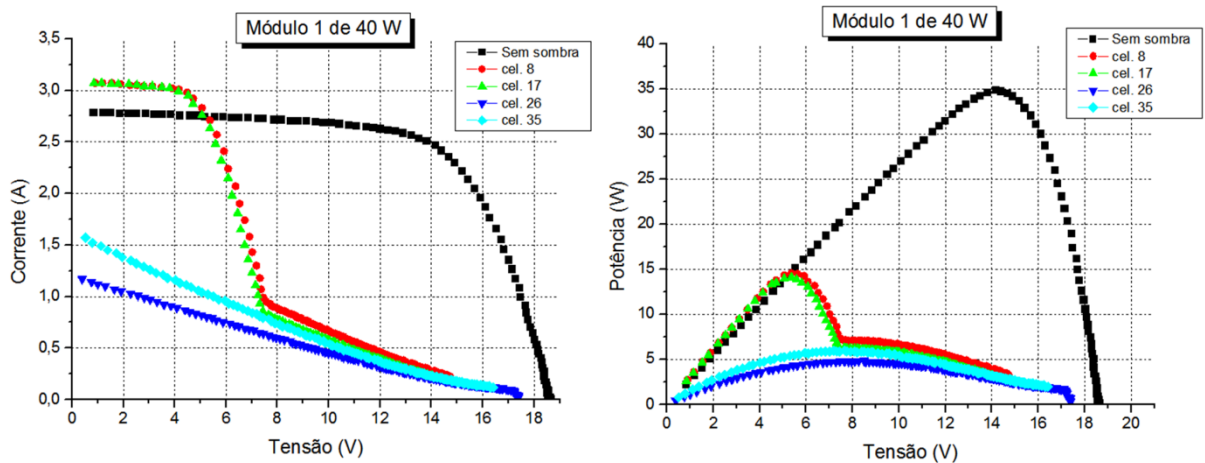


Figura 4.14: Curvas I - V e P - V do sombreamento das células 8, 17, 26 e 35 no módulo 1 da ASE-Américas, Inc. com diodos *by-pass* atuando em metade do módulo.

Tabela 4.4: Sombreamento das células 8, 17, 26 e 35 no módulo 1 da ASE-Américas, Inc.

	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	14,15	2,47	34,92	18,59	2,80	922,5	50	67,0
Célula 8	5,83	2,52	14,66	14,72	3,08	999,7	59	32,3
Célula 17	5,29	2,67	14,13	14,12	3,08	995,0	63	32,5
Célula 26	8,50	0,57	4,80	17,37	1,20	1001,0	64	23,0
Célula 35	7,79	0,77	5,97	16,38	1,63	1005,3	65	22,4

4.6.2 Sombreamento de 50% de duas células adjacentes

No segundo tipo de sombreamento o anteparo de bloqueio cobriu 50% de duas células adjacentes [Figura 4.5(b)] e assim teve-se a mesma área fotovoltaica sombreada, porém com impacto sobre a potência de saída do módulo diferente.

Neste tipo de sombreamento onde cada célula está com metade de sua área sombreada, a conexão ou não dos diodos *by-pass* mostrou-se indiferente, o que pode ser associado ao fato de que a célula não está totalmente coberta, o que não provoca um curto-circuito nela, apenas redução na produção individual de energia e por isso o diodo não é ativado.

4.6.2.1 Módulo da SolarWorld

A Figura 4.15 traz as curvas I - V e P - V de nove exemplos do sombreamento de 50% de duas células no módulo da SolarWorld, e como no sombreamento de uma célula inteira, as curvas características ficaram quase sobrepostas com as condições de radiação e temperatura

próximas entre si. A potência sem sombreamento registrada foi de 67,03 W com radiação solar de 966 W/m^2 e temperatura do módulo igual a 47°C . A potência média destas nove leituras foi de 46,27 W com radiação solar média de 967 W/m^2 e temperatura média de 43°C , ou seja, houve redução média de 31,0% na potência de saída em relação à potência sem sombreamento. A Tabela 4.5 mostra as leituras feitas no Mini KLA destes nove sombreamentos.

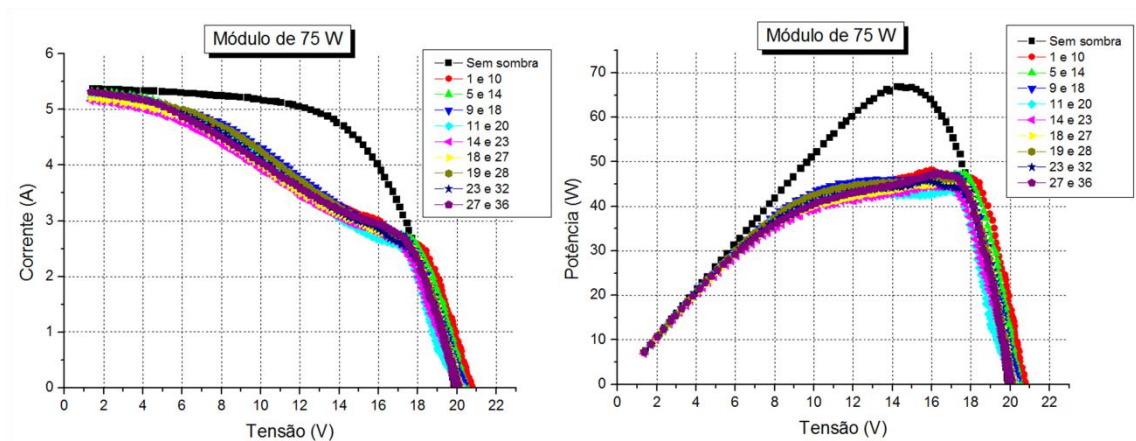


Figura 4.15: Curvas I - V e P - V do sombreamento de 50% de duas células no módulo da *SolarWorld* com diodos *by-pass* conectados.

Tabela 4.5: Sombreamento de 50% de duas células com os diodos *by-pass* conectados.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m^2]	T [$^\circ\text{C}$]	FF [%]
Sem sombra	14,62	4,58	67,03	19,94	5,40	966,3	47	62,2
1 e 10	15,94	3,02	48,15	20,68	5,35	969,3	36	43,6
5 e 14	17,64	2,68	47,20	20,41	5,36	967,2	40	43,1
9 e 18	16,72	2,82	47,16	20,29	5,35	964,8	41	43,4
11 e 20	16,97	2,58	43,76	20,18	5,26	966,3	42	41,2
14 e 23	16,96	2,63	44,60	20,13	5,22	962,7	44	42,5
18 e 27	17,31	2,64	45,76	20,06	5,25	966,0	45	43,4
19 e 28	16,44	2,82	46,43	20,04	5,38	969,3	45	43,1
23 e 32	15,69	2,92	45,87	20,00	5,37	968,0	46	42,7
27 e 36	16,08	2,95	47,48	19,98	5,39	969,0	46	44,1

A Figura 4.16 comprova o não funcionamento dos diodos *by-pass* quando a célula não é totalmente sombreada, nela temos o sombreamento de 50% dos pares de células “7 e 16” e “11 e 20” com e sem os diodos *by-pass* e na Tabela 4.6 os dados registrados nestes sombreamentos, onde se verifica uma redução média de 31,2% na potência de saída em relação à potência não sombreada.

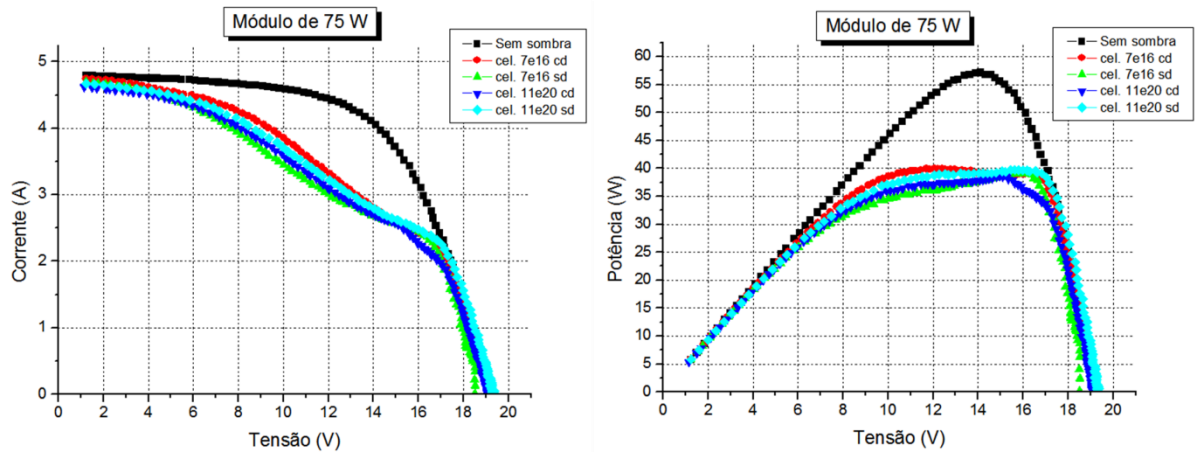


Figura 4.16: Curvas I - V e P - V do sombreamento de 50% de duas células no módulo de 75 W com diodos (cd) e sem diodos (sd) *by-pass* conectados.

Tabela 4.6: Sombreamento de 50% dos pares de células “7 e 16” e “11 e 20” com e sem os diodos *by-pass*.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	14,22	4,03	57,31	19,22	4,82	853,0	55	61,9
7 e 16 com diodos	12,39	3,24	40,11	19,26	4,79	851,0	52	43,5
7 e 16 sem diodos	16,20	2,43	39,33	18,53	4,75	852,0	48	44,7
11 e 20 com diodos	15,02	2,57	38,59	19,13	4,65	843,2	55	43,4
11 e 20 sem diodos	15,75	2,52	39,73	19,35	4,71	842,3	49	43,6

4.6.2.2 Módulo da ASE–Américas, Inc.

No sombreamento de 50% de duas células no módulo de 40 W, como ocorreu no sombreamento de uma célula, as curvas características apresentaram formas distintas entre si conforme o anteparo opaco era deslocado sobre o módulo. A Figura 4.17 mostra as curvas características de três exemplos deste sombreamento no módulo 2. As condições de radiação e temperatura destes três sombreamentos estavam bem próximas entre si, como mostra a Tabela 4.7 e a potência máxima de saída variou 7,3% entre os sombreamentos e 35,3% entre a menor potência sombreada e a potência sem sombreamento.

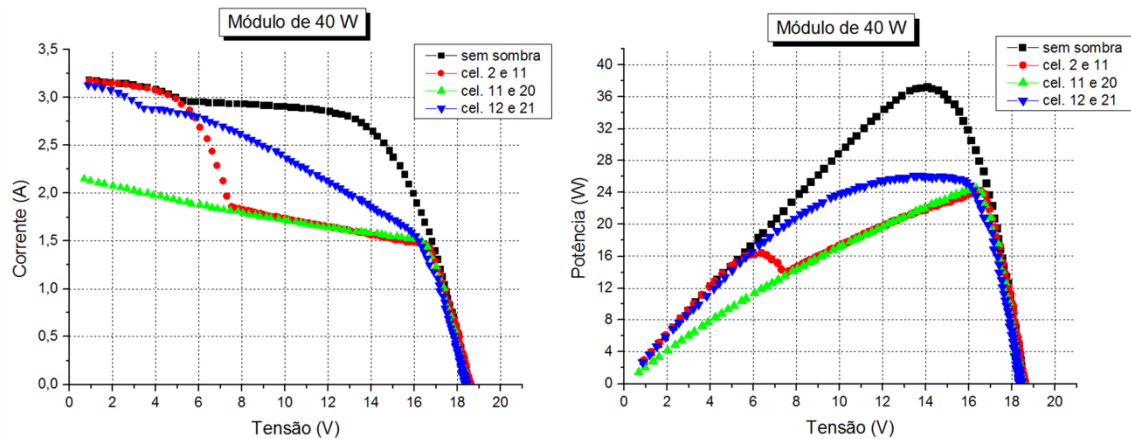


Figura 4.17: Curvas I - V e P - V do sombreamento de 50% de duas células no módulo 2 da ASE-Américas, Inc. com diodos *by-pass*.

Tabela 4.7: Sombreamento de 50% dos pares de células “2 e 11”, “11 e 20” e “12 e 21” no módulo 2.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	13,98	2,68	37,43	18,51	3,20	995,2	55	63,1
2 e 11	16,51	1,47	24,23	18,56	3,20	996,0	53	40,8
11 e 20	16,32	1,51	24,67	18,43	2,18	995,8	55	61,3
12 e 21	13,94	1,88	26,13	18,38	3,17	995,3	55	44,9

4.6.3 Sombreamento de 25% de quatro células adjacentes

No terceiro tipo de sombreamento o anteparo de bloqueio foi posicionado de modo a cobrir 25% de quatro células adjacentes como mostrado na Figura 4.5(c). Para este tipo de sombreamento as 36 células do módulo formam 24 conjuntos de quatro células cada, sendo 8 conjuntos em cada grupo do módulo e 8 conjuntos são formados por 2 células de cada grupo.

4.6.3.1 Módulo da SolarWorld

No sombreamento de 25% de quatro células do módulo de 75 W as curvas P - V ficaram praticamente sobrepostas para condições de radiação e temperatura próximas entre si. Nas curvas I - V foi observada uma discreta diferença nas correntes de curto-circuito (I_{cc}), de modo que todas as leituras com radiação e temperatura próximas ficaram divididas em dois conjuntos, um com as leituras dos sombreamentos dos quartetos de células de um mesmo grupo do módulo (I_{cc} maior) e outro com os sombreamentos dos quartetos de células sendo

duas células de cada grupo (I_{cc} menor). A Figura 4.18 mostra as curvas $I-V$ e $P-V$ de quatro exemplos deste tipo de sombreamento e a Tabela 4.8 mostra as leituras destes quatro sombreamentos, onde a diferença entre as correntes de curto-circuito ficaram em torno de 4,0% e a diferença entre as potências sombreadas foi relativamente pequena (1,9%) e em relação à potência sem sombreamento a maior redução foi de 11,6%.

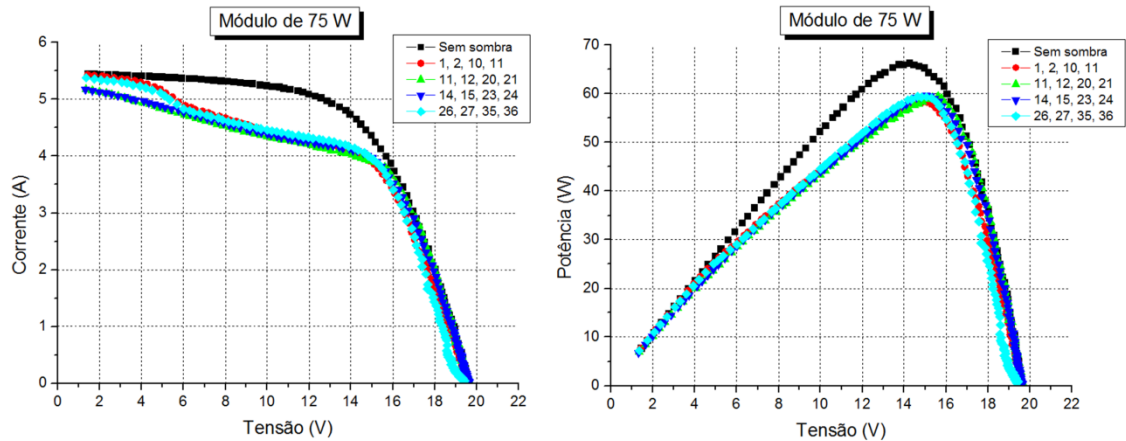


Figura 4.18: Curvas $I-V$ e $P-V$ do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da *SolarWorld*.

Tabela 4.8: Sombreamento de 25% de quatro células no módulo de 75 W.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	14,24	4,66	66,34	19,58	5,46	976,5	54	62,0
1, 2, 10, 11	15,1	3,88	58,63	19,58	5,48	975,0	53	54,7
11, 12, 20, 21	15,62	3,81	59,52	19,61	5,28	976,2	53	57,4
14, 15, 23, 24	15,17	3,94	59,77	19,57	5,25	972,3	52	58,2
26, 27, 35, 36	14,8	4,02	59,55	19,39	5,44	976,2	54	56,4

4.6.3.2 Módulo da ASE–Américas, Inc.

Os módulos de 40 W apresentaram distinções menores entre as curvas características com o sombreamento de 25% de quatro células, mas ainda assim a diferença entre as potências de saída com sombreamento é significativa, ficando em torno de 11% e a maior redução de potência em relação ao módulo não sombreado foi de 26,7% para os exemplos de sombreamento mostrados na Figura 4.19 e na Tabela 4.9.

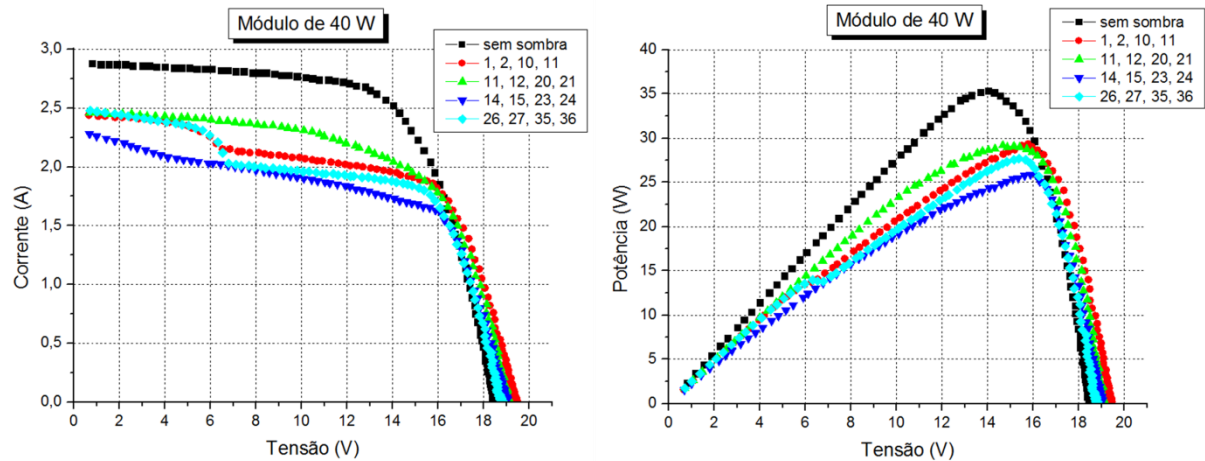


Figura 4.19: Curvas características do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da ASE-Américas.

Tabela 4.9: Sombreamento de 25% de quatro células no módulo de 40 W.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	14,03	2,52	35,37	18,46	2,88	961,5	51	66,4
1, 2, 10, 11	15,77	1,86	29,27	19,40	2,45	840,2	35	61,6
11, 12, 20, 21	14,67	1,99	29,17	19,08	2,47	853,0	40	62,0
14, 15, 23, 24	15,88	1,63	25,94	19,01	2,32	851,5	41	58,7
26, 27, 35, 36	15,29	1,81	27,73	18,78	2,49	850,3	44	59,2

4.6.4 Sombreamento de 100% de duas células

Nesta fase de aplicação do sombreamento parcial foi utilizado um anteparo opaco com dimensões equivalente a duas células inteiras (aproximadamente 6% da área fotovoltaica) para cada modelo de módulo. O anteparo cobriu duas células adjacentes conforme ilustrado na Figura 4.6(a), desta forma as 36 células dos módulos utilizados formam 27 pares de células a serem cobertas, estes pares estão divididos em três conjuntos, o primeiro é composto pelas células de 1 a 18 (um grupo do módulo conectado a um diodo *by-pass*), o segundo conjunto é composto pelas células de 19 a 36 (segundo grupo do módulo conectado ao outro diodo *by-pass*) e o terceiro conjunto é formado pelas células de 10 a 27, ou seja, cada par de células deste conjunto tem uma célula pertencente a um grupo do módulo.

4.6.4.1 Módulo da SolarWorld

O sombreamento dos pares de células no módulo de 75 W comprovou que o impacto na potência de saída é maior quando o sombreamento ocorre sobre o terceiro conjunto de

pares, conectado aos dois diodos *by-pass*, pois nesta situação os dois diodos são ativados durante o sombreamento no terceiro conjunto de pares. Assim como ocorreu nos sombreamento anteriores deste módulo, as curvas características ficaram praticamente sobrepostas, se dividindo em grupos de curvas de acordo com a posição do anteparo e se os diodos *by-pass* estavam ou não conectados. A Figura 4.20 mostra as curvas características do sombreamento do par de células 1 e 10 do primeiro conjunto e do par de células 18 e 27 do terceiro conjunto, com e sem os diodos *by-pass*. A Tabela 4.10 mostra as leituras destes dois pares de células, onde se verifica que as reduções na potência de saída do módulo foram de 53,7% com sombreamento das células 1 e 10 com os diodos conectados e 63,6% sem os diodos. No sombreamento das células 18 e 27, com os diodos conectados, a redução de potência foi de 63,0% e sem os diodos chegou a 67,6%.

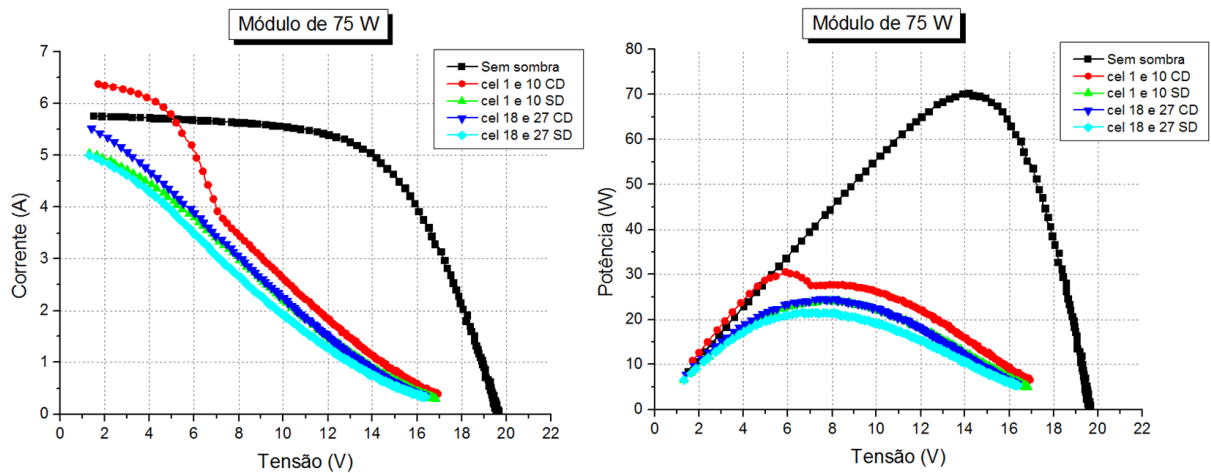


Figura 4.20: Sombreamento de 100% de duas células com e sem diodos *by-pass*.

Tabela 4.10: Leituras do sombreamento de duas células inteiras no módulo de 75 W com e sem diodos *by-pass*.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	14,09	4,99	70,33	19,64	5,78	993,0	63	61,9
1 e 10 com diodos	6,11	5,04	30,78	16,87	6,51	932,2	51	28,0
1 e 10 sem diodos	7,94	3,05	24,21	16,79	5,22	951,8	60	27,6
18 e 27 com diodos	7,72	3,19	24,58	16,31	5,89	991,0	65	25,6
18 e 27 sem diodos	7,36	2,93	21,53	16,37	5,25	954,7	62	25,0

4.6.4.2 Módulo da ASE–Américas, Inc.

O sombreamento de pares de células inteiras no módulo de 40 W apresentou distinções entre as curvas $I-V$ e $P-V$ mais marcantes do que no sombreamento de uma célula inteira, principalmente com os diodos *by-pass* conectados como pode ser observado nos exemplos plotados na Figura 4.21 em que a redução de potência chegou a 85,5% em relação ao módulo não sombreado. No sombreamento sem os diodos *by-pass* as diferenças entre as curvas características ficaram marcadas não pelas formas, mas pelos pontos de potência máxima e pelas correntes de curto-circuito, como mostra a Figura 4.22. Nestes sombreamentos sem os diodos *by-pass* a maior redução na potência foi de 90,0%. As leituras destes sombreamentos com e sem os diodos *by-pass* estão na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Leituras do sombreamento de duas células inteiras no módulo de 40 W com e sem diodos *by-pass*.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	12,13	2,58	31,35	17,07	2,95	952,0	67	62,3
Módulo com diodos <i>by-pass</i>								
5 e 14	5,31	2,40	12,75	14,83	2,74	906,0	62	31,4
12 e 21	11,84	0,38	4,55	16,89	0,97	944,0	65	27,6
14 e 23	8,68	0,81	7,01	15,40	2,73	894,8	63	16,7
16 e 25	8,54	1,54	13,13	16,56	2,65	923,5	65	29,9
Módulo sem diodos <i>by-pass</i>								
5 e 14	8,03	1,08	8,67	16,19	2,17	953,7	56	24,6
12 e 21	9,53	0,33	3,12	16,82	0,73	946,3	65	25,5
14 e 23	7,87	0,79	6,19	16,59	1,51	945,7	67	24,7
16 e 25	8,54	1,51	12,87	16,25	2,69	936,0	67	29,5

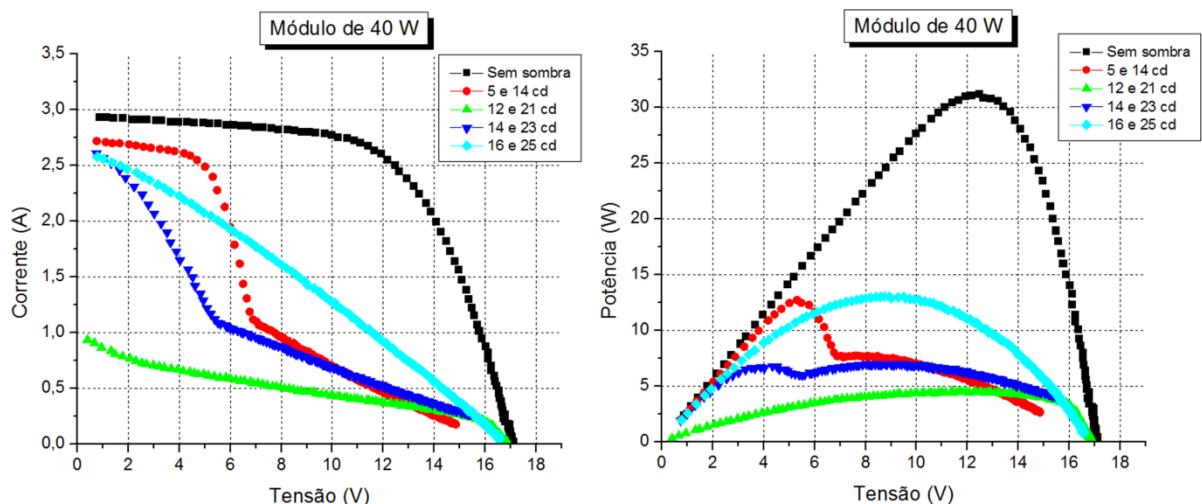


Figura 4.21: Sombreamento de 100% de duas células no módulo de 40 W com os diodos *by-pass* conectados.

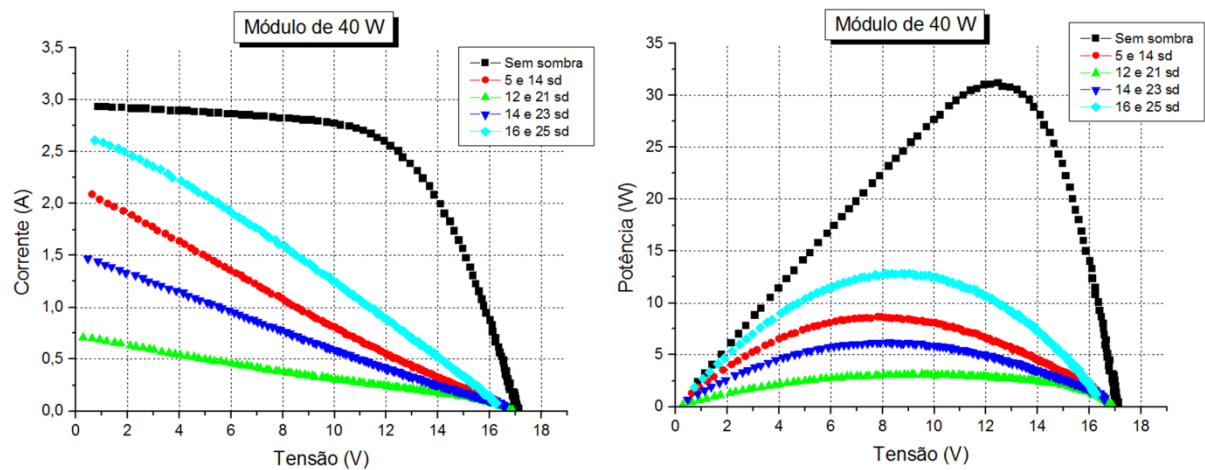


Figura 4.22: Sombreamento de 100% de duas células no módulo de 40 W sem os diodos *by-pass*.

Nas leituras da Tabela 4.11 o que chama a atenção é a grande diferença entre as potências nos sombreamentos dos pares de células “12; 21” e “16; 25” com e sem diodos *by-pass* que foi de 65,3 e 75,8% respectivamente, sendo que estes dois pares têm uma célula de cada grupo do módulo, era esperado um grande impacto na potência de saída, mas a diferença entre eles ficou muito grande, o que merece um estudo mais específico sobre o envelhecimento e comportamento desigual de células sob condições de incompatibilidade.

4.6.5 Sombreamento de 50% de quatro células

A última etapa dos sombreamentos parciais foi feita com o mesmo anteparo que cobriu duas células inteiras, deslocando-o para a cobertura de 50% de quatro células adjacentes conforme ilustrado na Figura 4.6(b).

4.6.5.1 Módulo da *SolarWorld*

Assim como ocorreu no sombreamento de 25% de quatro células no módulo de 75 W, nos sombreamentos de 50% de quatro células, as potências máximas sombreadas ficaram com valores bem próximos entre si e também houve a divisão das curvas características em dois grupos de sobreposição, um grupo dos sombreamentos dos quartetos de células pertencentes ao mesmo grupo do módulo e outro dos sombreamentos dos quartetos de células com duas células em cada grupo. Neste caso o que distinguiu os dois grupos também foi o valor da corrente de curto-circuito, sendo maior nos sombreamentos dos quartetos de células

pertencentes ao mesmo grupo do módulo, além disso, surgiu também um ponto de máximo local nas curvas $P-V$ destas células sombreadas. A Figura 4.23 mostra as curvas características de quatro exemplos deste tipo de sombreamento e a Tabela 4.12 tem as leituras destes exemplos onde a redução média da potência de saída foi de 35%.

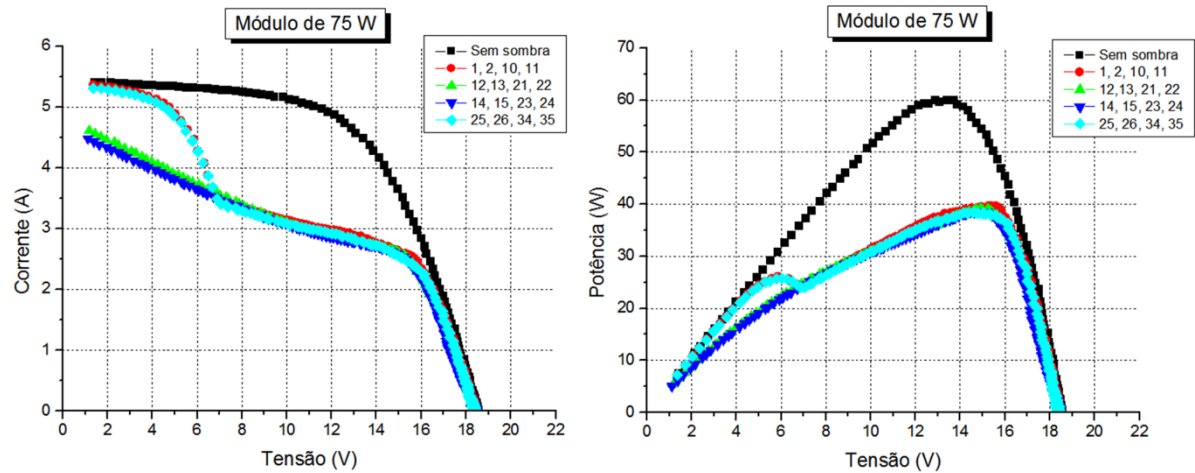


Figura 4.23: Sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 75 W.

Tabela 4.12: Leituras do sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 75 W.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	13,53	4,46	60,31	18,51	5,43	944,2	64	60,0
1, 2, 10, 11	15,37	2,59	39,74	18,45	5,44	947,8	64	39,6
12, 13, 21, 22	14,90	2,63	39,13	18,43	4,83	943,2	64	44,0
14, 15, 23, 24	14,75	2,62	38,63	18,42	4,66	943,3	64	45,0
25, 26, 34, 35	14,64	2,63	38,54	18,39	5,36	928,2	63	39,1

4.6.5.2 Módulo da ASE–Américas, Inc.

No sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 40 W quase não houve diferença entre as formas das curvas características nos sombreamentos dos quartetos de células pertencentes ao mesmo grupo do módulo, com a diferença entre as potências sombreadas chegando a 19,3% e redução de 51,3% em relação ao módulo não sombreado, para os exemplos plotados na Figura 4.22, com as curvas $P-V$ destes exemplos apresentando máximos locais. Os sombreamentos dos quartetos de células com duas células em cada grupo do módulo não apresentam máximos locais e têm maiores diferenças entre as curvas características, como pode ser visto na Figura 4.23, com a diferença entre as potências

sombreadas em 17,4% e redução de 50,8% em relação ao módulo não sombreado. As leituras referentes a estes exemplos plotados nas Figuras 4.24 e 4.25 estão na Tabela 4.13.

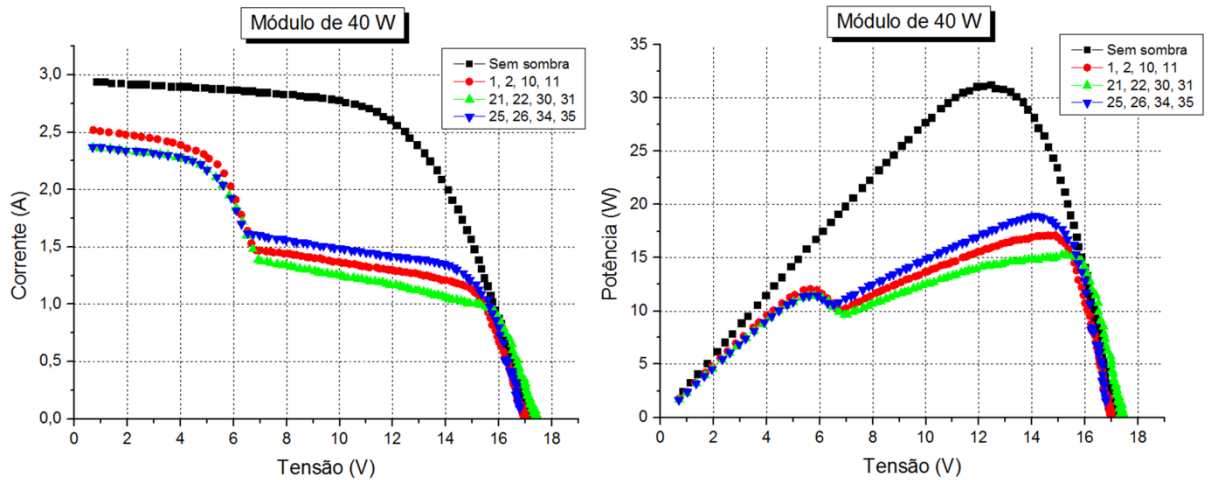


Figura 4.24: Sombreamento de 50% de quatro células do mesmo grupo no módulo de 40 W.

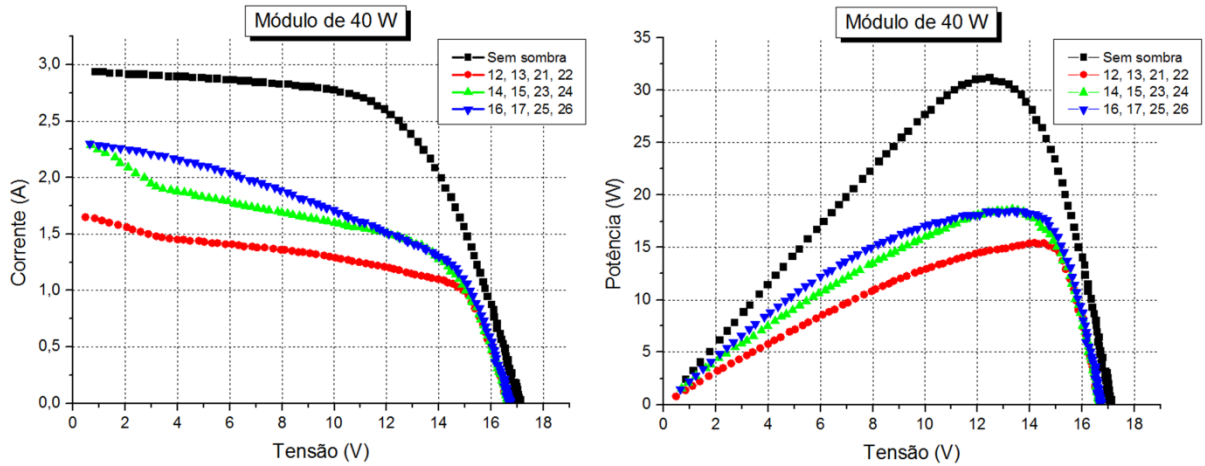


Figura 4.25: Sombreamento de 50% de quatro células com duas em cada grupo no módulo de 40 W.

Tabela 4.13: Leituras do sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 40 W.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]
Sem sombra	12,13	2,58	31,35	17,07	2,95	952,0	67	62,3
1, 2, 10, 11	14,79	1,16	17,18	17,00	2,53	844,3	64	39,9
12, 13, 21, 22	14,31	1,08	15,43	16,66	1,68	790,5	67	55,2
14, 15, 23, 24	13,33	1,40	18,69	16,70	2,37	799,5	67	47,2
16, 17, 25, 26	13,37	1,39	18,52	16,71	2,32	791,7	67	47,8
21, 22, 30, 31	15,42	0,99	15,27	17,42	2,38	784,7	60	36,8
25, 26, 34, 35	14,13	1,34	18,93	16,76	2,39	786,3	61	47,4

4.7 Conclusões

Neste capítulo foi possível observar os diferentes impactos que um mesmo sombreamento pode causar na potência de saída apenas mudando sua posição sobre o módulo. A importância da presença do diodo *by-pass* foi comprovada quando o sombreamento bloqueia pelo menos uma célula inteira, provocando nela um curto-circuito e assim ativando o diodo de proteção, o que ameniza o impacto sobre a potência de saída além de proteger a célula sombreada da tensão reversa e dos efeitos prejudiciais dos *hot-spots*, contudo os diodos *by-pass* não conseguem desempenhar seu papel de proteção quando o sombreamento cobre apenas parte das células, podendo levar o módulo a um envelhecimento precoce ou a sofrer danos irreversíveis nas células sombreadas se o sombreamento perdurar por longos períodos de tempo, além do próprio prejuízo na produção de energia uma vez que uma única célula improdutiva reduz significativamente a potência total de saída do módulo.

A situação de sombreamento parcial se mostrou mais complexa quando aplicada aos módulos da *ASE-Américas*, fabricados há 15 anos, dado as divergências no comportamento das curvas características e a variação nas potências de saída para as mesmas condições de sombreamento, de radiação e temperatura.

No capítulo 5 é apresentado o estudo do cálculo da resistência série dos módulos utilizados para cada caso de sombreamento parcial proposto, relacionando-as com as resistências série dos módulos totalmente iluminados para as mesmas condições de radiação e temperatura.

5 CÁLCULO DA RESISTÊNCIA SÉRIE SOB CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO PARCIAL

5.1 Introdução

A literatura pesquisada e apresentada no capítulo 3 mostrou que existem vários métodos para calcular a resistência série (R_s) de células e módulos fotovoltaicos, e que nenhum coincide ou se quer tem resultados próximos uns dos outros para as mesmas condições de radiação e temperatura, além disso, estes métodos foram aplicados com as células e módulos em condições normais de funcionamento, ou seja, completamente iluminados e nenhum dos trabalhos fazem menção sobre algum dos métodos funcionarem em condições de sombreamento parcial. Como visto no capítulo 4, o simples sombreamento de uma única célula pode causar uma grande redução na potência de saída de um módulo, contudo, a redução de potência nos trabalhos sobre resistência série está relacionada com a redução da radiação solar ou com o aumento da temperatura dos módulos utilizados, além disso, boa parte destes trabalhos apresenta resultados obtidos de simulações computacionais e outros de ambientes fechados com condições de radiação e temperatura controladas, com iluminação artificial e sistemas de ventilação, condições estas que nem sempre retratam as condições adversas e imprevisíveis de uma pesquisa em campo aberto.

Com isso, as questões discutidas neste capítulo são:

- ✓ Como se comporta a resistência série de um módulo sob condições reais de sombreamento parcial?
- ✓ É possível identificar um estado de sombreamento parcial pelo monitoramento das resistências série?

Utilizando os dados colhidos em campo e discutidos no capítulo 4, buscou-se com base nos métodos apresentados no capítulo 3, uma forma eficiente para calcular a resistência série e verificar seu comportamento mediante as situações de sombreamento parcial, com objetivo de apresentar uma proposta de identificação da condição de sombreamento parcial do módulo através do monitoramento dos valores das resistências série.

5.2 Cálculo da Resistência Série dos Módulos sob Condições de Sombreamento Parcial pelo Ponto de Potência Máxima

Na primeira etapa da busca por um método de identificação do sombreamento parcial através do monitoramento da resistência série, realizou-se o cálculo das resistências série do módulo sob condição de sombreamento parcial utilizando a fórmula apresentada por Santos, Petry e Lima (2010), mostrada no capítulo 3 na equação 3.1 e reescrita aqui:

$$R_s = \frac{V_{ca} - V_{ppm}}{I_{ppm}} \quad (5.1)$$

Os primeiros cálculos com a equação 5.1 foram feitos com as leituras do módulo da ASE–Américas totalmente iluminado e do sombreamento de uma célula inteira com diodos *by-pass* (CD) e sem diodos *by-pass* (SD) como mostrado na Figura 4.5(a) no capítulo 4. A Tabela 5.1 mostra 18 destas leituras com as resistências série calculadas pela equação 5.1. A Figura 5.1 mostra o comparativo das resistências destas leituras. A Figura 5.2 mostra potências máximas (P_{max}) e suas respectivas resistências série (R_s).

Tabela 5.1: Resistências série calculadas pela equação 5.1 para o módulo de 40 W com e sem diodos *by-pass* para o sombreamento parcial de uma célula inteira.

Célula	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
Sem sombra	14,14	2,51	35,42	18,53	3,01	939,2	54	63,4	1,75
Sem sombra	13,91	2,64	36,78	18,64	2,95	966,0	54	66,9	1,79
Sem sombra	13,93	2,66	37,06	18,73	2,95	965,8	53	67,0	1,80
Sem sombra	13,81	2,55	35,27	18,57	3,05	939,5	52	62,3	1,87
Sem sombra	13,77	2,59	35,59	18,61	3,06	940,3	52	62,6	1,87
Sem sombra	13,77	2,54	34,96	18,59	3,02	935,7	52	62,4	1,90
15 CD	11,45	2,42	27,74	18,39	3,06	958,3	51	49,3	2,87
15 SD	10,46	2,31	24,15	17,69	2,75	878,7	58	49,6	3,13
1 CD	6,42	2,71	17,39	17,11	3,16	1011,7	35	32,1	3,94
20 CD	6,29	2,49	15,67	16,49	2,81	943,5	49	33,9	4,10
27 CD	6,26	2,45	15,36	17,55	2,81	949,3	53	31,2	4,61
5 SD	8,53	1,78	15,17	17,61	2,65	898,2	52	32,5	5,10
5 CD	8,61	1,95	16,82	18,59	2,86	972,3	45	31,6	5,12
27 SD	9,03	1,28	11,60	18,12	2,48	916,7	53	25,8	7,10
20 SD	9,54	0,95	9,08	18,27	1,95	889,7	55	25,5	9,19
1 SD	8,54	1,06	9,03	18,41	2,12	909,2	47	23,1	9,31
10 CD	7,81	0,92	7,22	17,33	1,73	959,5	50	24,1	10,35
10 SD	8,04	0,92	7,42	17,98	1,71	879,2	57	24,1	10,80

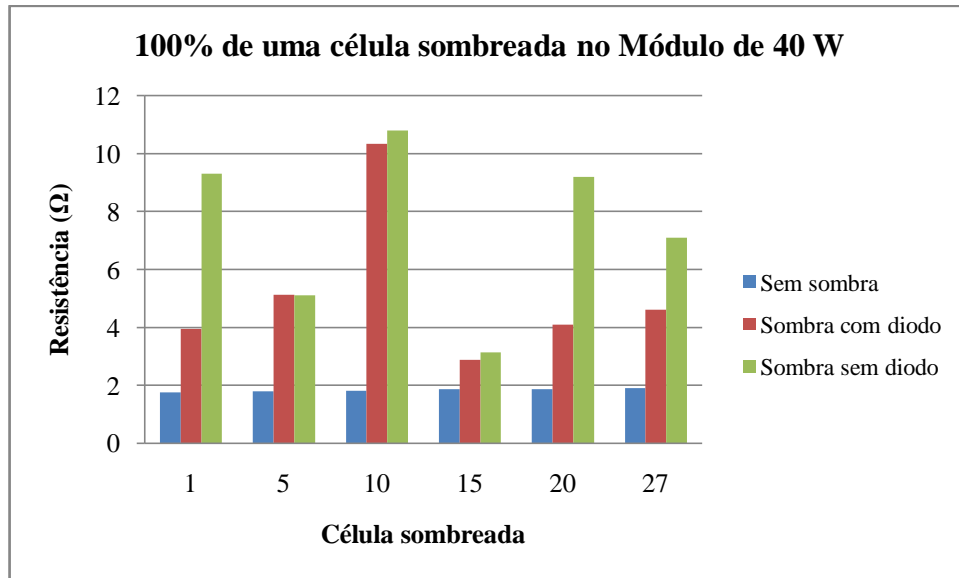


Figura 5.1: Resistência série calculada pelo ponto de potência máxima com 100% de uma célula sombreada.

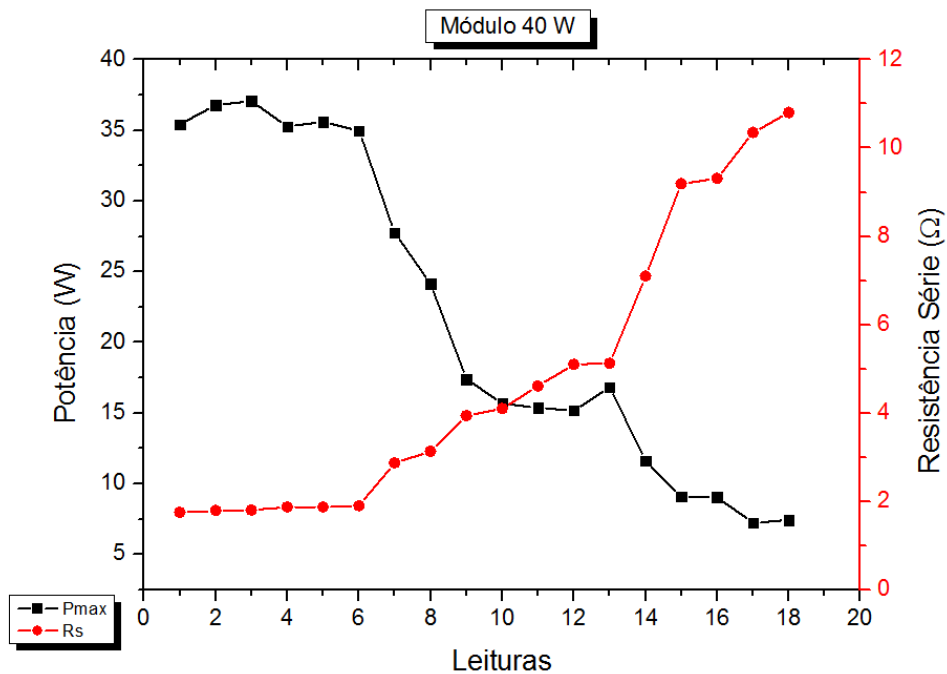


Figura 5.2: Relação entre a P_{max} e a R_s pelo ponto de potência máxima para o sombreamento de 100 % de uma célula no módulo de 40 W.

Analisando a Figura 5.1 aparentemente este procedimento permitiria identificar o estado de sombreamento parcial do módulo, mas não se o diodo *by-pass* está atuando ou não, a partir do valor da resistência série.

No segundo teste de cálculo da resistência série pelo ponto de potência máxima foram calculadas as resistências das leituras do sombreamento de 50% de um par de células adjacentes [Figura 4.5(b) do cap. 4] sobre o módulo da *ASE-Américas*. A Tabela 5.2 mostra 18 destas leituras com as resistências série em ordem crescente para o módulo totalmente iluminado e sombreado com e sem os diodos *by-pass*. A Figura 5.3 mostra o gráfico dessas resistências que deixa óbvio que os valores das resistências série encontrados não permitem distinguir o estado de sombreamento parcial do totalmente iluminado. A Figura 5.4 mostra a relação entre as potências máximas e as resistências série do módulo.

A conclusão tirada da análise deste segundo teste é que este método de cálculo da resistência série não fornece valores de resistências série que permitam a identificação de sombreamentos parciais em comparação com a condição do módulo totalmente iluminado.

Tabela 5.2: Resistências série calculadas pelo ponto de potência máxima para o sombreamento parcial de 50% de duas células adjacentes no módulo de 40 W com e sem diodos *by-pass*.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
11 e 20 CD	16,26	1,49	24,24	18,32	2,23	1000,2	56	59,2	1,38
1 e 10 SD	16,70	1,35	22,54	18,64	2,08	933,0	51	58,2	1,44
1 e 10 CD	16,30	1,53	24,89	18,52	3,19	989,3	53	42,2	1,45
18 e 27 CD	16,09	1,57	25,22	18,39	2,38	995,0	56	57,5	1,46
9 e 18 CD	16,12	1,50	24,18	18,32	3,22	999,5	56	40,9	1,47
20 e 29 CD	15,80	1,64	25,85	18,31	2,93	991,0	57	48,1	1,53
18 e 27 SD	16,26	1,50	24,31	18,56	2,30	946,5	53	57,0	1,53
9 e 18 SD	16,23	1,47	23,81	18,51	2,16	946,2	54	59,6	1,55
27 e 36 CD	15,71	1,71	26,89	18,50	2,95	997,5	55	49,2	1,63
Sem sombra	14,41	2,50	36,07	18,60	2,87	944,5	53	67,6	1,68
Sem sombra	15,37	2,03	31,22	18,79	2,74	931,7	51	60,6	1,68
20 e 29 SD	16,31	1,43	23,28	18,73	2,56	928,8	51	48,5	1,69
Sem sombra	14,14	2,51	35,42	18,53	3,01	939,2	54	63,4	1,75
Sem sombra	14,66	2,34	34,30	18,81	2,78	934,7	51	65,5	1,77
11 e 20 SD	16,24	1,43	23,19	18,84	2,08	935,3	50	59,1	1,82
Sem sombra	13,81	2,55	35,27	18,57	3,05	939,5	52	62,3	1,87
Sem sombra	13,77	2,54	34,96	18,59	3,02	935,7	52	62,4	1,90
27 e 36 SD	13,29	1,87	24,80	18,77	2,65	934,0	51	50,0	2,93

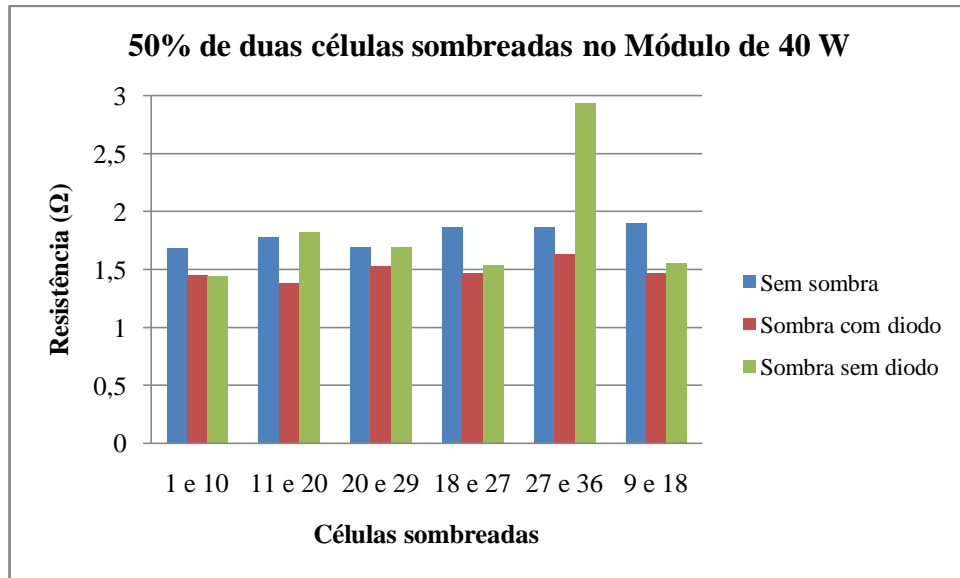


Figura 5.3: Resistência série pelo ponto de potência máxima do sombreamento de 50% de duas células no módulo de 40 W.

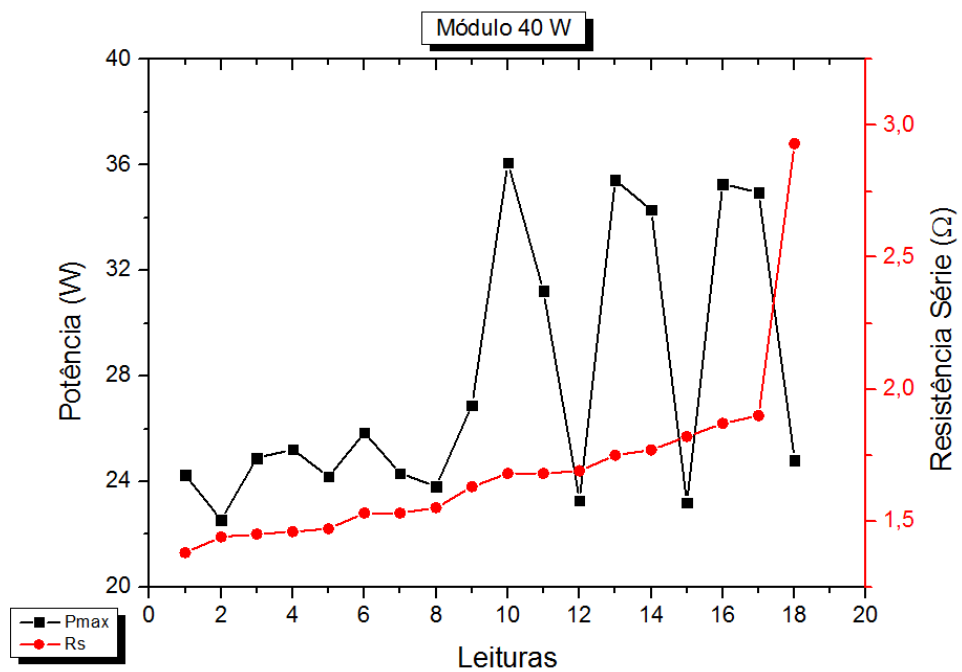


Figura 5.4: Relação entre a P_{max} e a R_s ponto de potência máxima para o sombreamento de 50% de duas células no módulo de 40 W.

5.3 Cálculo da Resistência Série pelo Método do Fator de Forma (FF).

Partindo da premissa de que o Fator de Forma (FF) de um módulo é diretamente proporcional à potência máxima, a resistência série será então inversamente proporcional ao Fator de Forma. Por isso na segunda etapa da busca pelo método de identificação do sombreamento parcial pelo monitoramento da resistência série foi utilizado o método do Fator de Forma visto em Fiorentino e Seraphim (2005), mostrado no capítulo 3 na equação 3.22 como:

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_o}\right) \cdot \frac{V_{ca}}{I_{ccM}} \quad (5.2)$$

Em que:

R_s é a resistência série do módulo fotovoltaico;

FF é o Fator de Forma do módulo;

FF_o é o Fator de Forma de uma célula ideal ($R_s = 0$);

V_{ca} é a tensão de circuito aberto do módulo;

I_{ccM} é a corrente de curto circuito do módulo.

Dos parâmetros necessários para o cálculo da R_s pelo método do FF apenas o Fator de Forma de uma célula ideal (FF_o) não é obtido da leitura no *Mini KLA*, como mostrado no capítulo 3 na equação 3.23, para obtê-lo é necessária a tensão de circuito aberto da célula normalizada (v_{ca}), que é determinada pela razão entre a tensão de circuito aberto da célula ($V_{ca(c)}$) e a tensão térmica da célula ($V_{T(c)}$). A tensão térmica da célula depende da temperatura da célula (T), da constante de Boltzmann (k), da carga do elétron (q) e do fator de idealidade do diodo (m). Cada autor escolhe um valor diferente de m dependendo das condições definidas, um diodo ideal tem $m = 1$, os reais tem $m > 1$, alguns autores definem que $1 < m < 2$ e outros aplicam $m = 2,5$.

Por fim, no capítulo 3 foi apresentada uma expressão empírica que relaciona o fator de idealidade m com o Fator de Forma FF (equação 3.26), que permitiu então, calcular m para cada caso de sombreamento desta pesquisa a partir dos parâmetros reais extraídos de cada leitura.

Todas as leituras feitas nos módulos da *ASE–Américas, Inc.* de 40 W e da *SolarWorld* de 75 W tiveram suas resistências série calculadas pelo método do Fator de Forma, a seguir é apresentado alguns dos resultados de cada tipo de sombreamento proposto neste trabalho.

5.3.1 Resistência série do Módulo da ASE–Américas, inc.

A Tabela 5.3 apresenta algumas leituras do sombreamento de 100% de uma célula no módulo de 40 W com as resistências série dispostas em ordem crescente. Como no método anterior, os valores da R_s permitiram identificar a condição de sombreamento parcial pela diferença entre os valores das resistências no estado de sombreamento e do módulo totalmente iluminado, ainda foi observado neste caso, que no sombreamento da mesma célula o valor da R_s praticamente dobrou quando o diodo *by-pass* foi desconectado. Na Figura 5.5 temos o comparativo destas resistências e a Figura 5.6 mostra as potências máximas com as respectivas resistências.

Tabela 5.3: Resistências série em ordem crescente calculadas pelo método do FF do módulo de 40 W com e sem diodos *by-pass* para o sombreamento parcial de uma célula inteira.

Célula	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
Sem sombra	12,55	2,55	31,94	17,35	2,83	893,0	64	65,0	0,73
Sem sombra	14,21	3,00	42,67	19,25	3,35	1070,2	39	66,1	0,82
Sem sombra	14,18	2,41	34,20	18,66	2,78	922,0	51	65,9	0,89
Sem sombra	13,71	2,50	34,22	18,68	2,77	921,8	51	66,0	0,89
Sem sombra	13,81	2,48	34,24	18,70	2,78	923,7	51	65,8	0,90
Sem sombra	14,82	2,71	40,10	19,66	3,05	967,0	36	66,9	0,90
Sem sombra	13,77	2,38	32,79	18,64	2,65	874,0	50	66,3	0,91
18 CD	5,43	2,28	12,36	14,14	2,93	895,3	62	29,9	2,42
1 CD	5,84	2,12	12,40	14,58	2,92	899,8	59	29,1	2,60
9 CD	5,07	2,34	11,86	14,43	2,71	880,2	64	30,3	2,66
14 CD	5,81	2,18	12,66	15,17	2,93	897,7	61	28,5	2,77
28 CD	5,21	2,27	11,83	14,79	2,73	901,0	60	29,3	2,82
5 CD	5,66	2,20	12,43	15,63	2,93	900,3	61	27,1	2,99
36 CD	8,55	1,53	13,10	16,55	2,73	896,3	63	29,0	3,28
9 SD	8,10	1,22	9,90	16,70	2,41	899,2	59	24,6	4,21
18 SD	8,15	1,10	8,97	16,71	2,15	899,0	59	24,9	4,69
5 SD	8,39	0,98	8,19	17,03	1,95	901,3	57	24,6	5,34
28 SD	8,80	0,93	8,16	16,93	1,88	895,5	57	25,6	5,37
14 SD	8,34	0,90	7,47	16,69	1,73	903,7	58	25,9	5,69
1 SD	8,27	0,90	7,40	17,04	1,82	896,5	56	23,9	5,82
36 SD	7,69	0,77	5,94	15,69	1,65	883,8	64	22,9	5,92

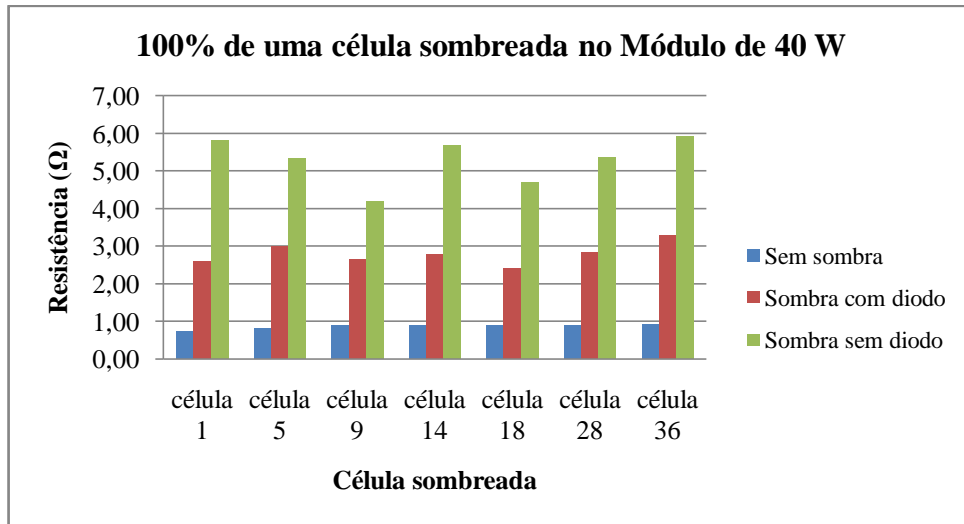


Figura 5.5: Resistência série calculada pelo método do *FF* do módulo de 40 W para o sombreamento de 100% de uma célula.

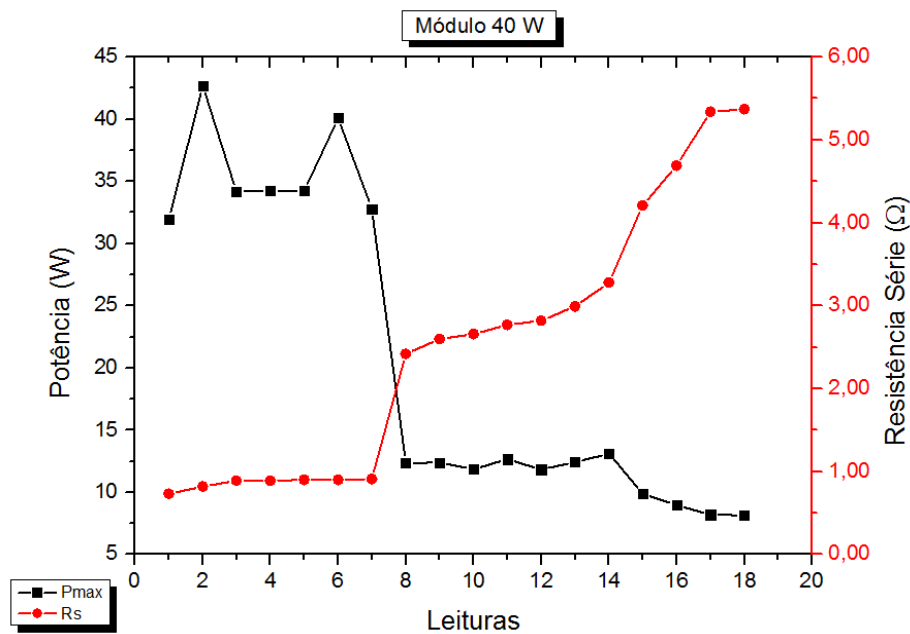


Figura 5.6: P_{max} e R_s pelo método do *FF* para o sombreamento de 100% de uma célula no módulo de 40 W.

Como parte do processo de validação do método do *FF* para calcular as resistências série em condições de sombreamento parcial, utilizou-se as mesmas leituras da Tabela 5.2 onde não foi possível separar o estado de sombreamento do não sombreado. A Tabela 5.4 mostra estas leituras com as resistências série calculadas pelo método do *FF* em ordem crescente. As novas resistências série calculadas no sombreamento de 50% de duas células no módulo da ASE-Américas permitiram identificar a condição de sombreamento parcial por

uma pequena margem de diferença entre a maior resistência com o módulo totalmente iluminado e a menor resistência do estado de sombreamento. Apesar das leituras terem sido feitas com e sem os diodos *by-pass*, estes não são acionados nos sombreamentos em que a célula não é totalmente bloqueada, por isso todas as leituras equivalem à condição de diodo desconectado, sendo as diferenças nas resistências associadas a variações nas condições de radiação e temperatura. A Figura 5.7 mostra o gráfico com as resistências calculadas da Tabela 5.4 e a Figura 5.8 mostra a relação entre as potências máximas e as respectivas resistências série.

Tabela 5.4: Resistências série em ordem crescente pelo método do *FF* dos módulos de 40 W com e sem diodos *by-pass* para um sombreamento parcial de 50% de duas células adjacentes.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	$R_s(\Omega)$
Sem sombra	14,41	2,50	36,07	18,60	2,87	944,5	53	67,6	0,74
Sem sombra	14,66	2,34	34,30	18,81	2,78	934,7	51	65,5	0,93
Sem sombra	13,77	2,59	35,59	18,61	3,06	940,3	52	62,6	0,99
Sem sombra	13,81	2,55	35,27	18,57	3,05	939,5	52	62,3	1,01
Sem sombra	13,77	2,54	34,96	18,59	3,02	935,7	52	62,4	1,02
Sem sombra	15,37	2,03	31,22	18,79	2,74	931,7	51	60,6	1,28
11 e 20 CD	16,26	1,49	24,24	18,32	2,23	1000,2	56	59,2	1,59
9 e 18 SD	16,23	1,47	23,81	18,51	2,16	946,2	54	59,6	1,65
18 e 27 CD	16,09	1,57	25,22	18,39	2,38	995,0	56	57,5	1,64
18 e 27 SD	16,26	1,50	24,31	18,56	2,30	946,5	53	57,0	1,79
11 e 20 SD	16,24	1,43	23,19	18,84	2,08	935,3	50	59,1	1,85
1 e 10 SD	16,70	1,35	22,54	18,64	2,08	933,0	51	58,2	1,88
27 e 36 CD	15,71	1,71	26,89	18,50	2,95	997,5	55	49,2	1,92
20 e 29 CD	15,80	1,64	25,85	18,31	2,93	991,0	57	48,1	1,98
27 e 36 SD	13,29	1,87	24,80	18,77	2,65	934,0	51	50,0	2,14
1 e 10 CD	16,30	1,53	24,89	18,52	3,19	989,3	53	42,2	2,27
9 e 18 CD	16,12	1,50	24,18	18,32	3,22	999,5	56	40,9	2,30
20 e 29 SD	16,31	1,43	23,28	18,73	2,56	928,8	51	48,5	2,34

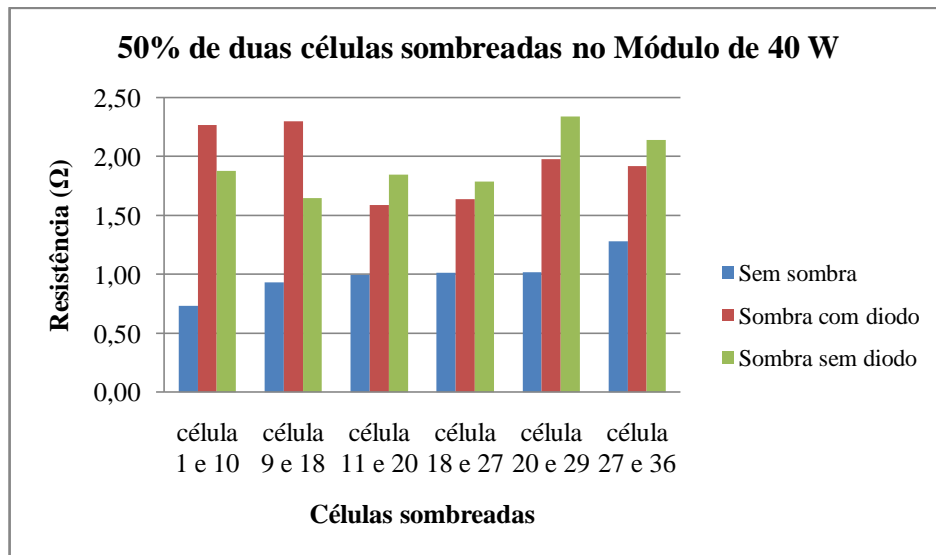


Figura 5.7: Resistência série com 50% de duas células sombreadas pelo método do *FF*.

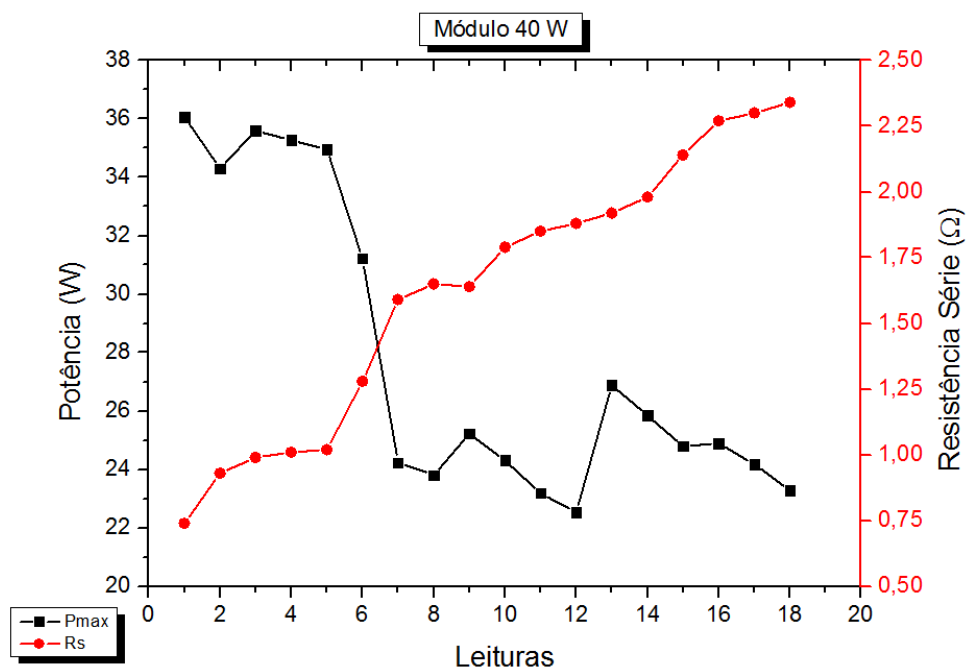


Figura 5.8: P_{max} e a R_s pelo método do *FF* para o sombreamento de 50% de duas células no módulo de 40 W.

No sombreamento de 25% de quatro células [Figura 4.5(c) do cap. 4], o impacto sobre cada célula do quarteto sombreado é bem menor que nos casos anteriores, isto acarretou uma redução na potência de saída que variou entre 7 e 17% no módulo dois e entre 13 e 31% no módulo três, nas leituras feitas com a radiação solar entre 800 e 1000 W/m². Por este fato, alguns valores das resistências série ficaram muito próximos e até mesmo menores que os valores do módulo não sombreado, dificultando a identificação deste sombreamento pela

resistência série. A Tabela 5.5 mostra algumas leituras com as resistências série em ordem crescente, a Figura 5.9 o gráfico das resistências e a Figura 5.10 têm as potências máximas com as respectivas resistências.

Tabela 5.5: Resistências série em ordem crescente pelo método do *FF* dos módulos de 40 W com 25% de quatro células sombreadas.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	$R_s(\Omega)$
1, 2, 10, 11	15,07	2,03	30,57	18,31	2,37	947,3	53	70,4	0,65
Sem sombra	13,53	2,59	35,01	18,07	2,94	955,2	59	66,0	0,74
Sem sombra	13,49	2,61	35,18	18,10	2,95	958,8	59	66,0	0,74
8, 9, 17, 18	15,06	2,05	30,84	18,35	2,46	939,2	55	68,2	0,78
2, 3, 11, 12	15,05	2,21	33,21	18,46	2,68	976,3	54	67,1	0,80
Sem sombra	13,72	2,60	35,61	18,49	2,92	970,7	50	66,0	0,82
Sem sombra	14,48	2,35	34,07	18,85	2,66	898,7	45	67,8	0,85
Sem sombra	14,42	2,34	33,67	18,83	2,64	889,8	45	67,7	0,85
Sem sombra	14,40	2,35	33,85	18,84	2,66	896,7	45	67,5	0,86
16, 17, 25, 26	15,44	1,91	29,49	18,80	2,27	896,5	45	69,2	0,87
24, 25, 33, 34	14,96	2,09	31,31	18,45	2,86	963,3	50	59,4	1,27
12, 13, 21, 22	14,67	1,18	17,36	17,17	1,58	814,7	63	64,0	1,38
3, 4, 12, 13	14,21	1,19	16,93	17,19	1,57	821,3	62	62,7	1,55
7, 8, 16, 17	14,33	1,36	19,49	17,00	1,97	851,2	66	58,1	1,59
21, 22, 30, 31	15,19	1,18	17,87	17,28	1,69	831,0	62	61,0	1,64
23, 24, 32, 33	15,53	1,22	18,95	17,58	1,79	837,7	57	60,4	1,69

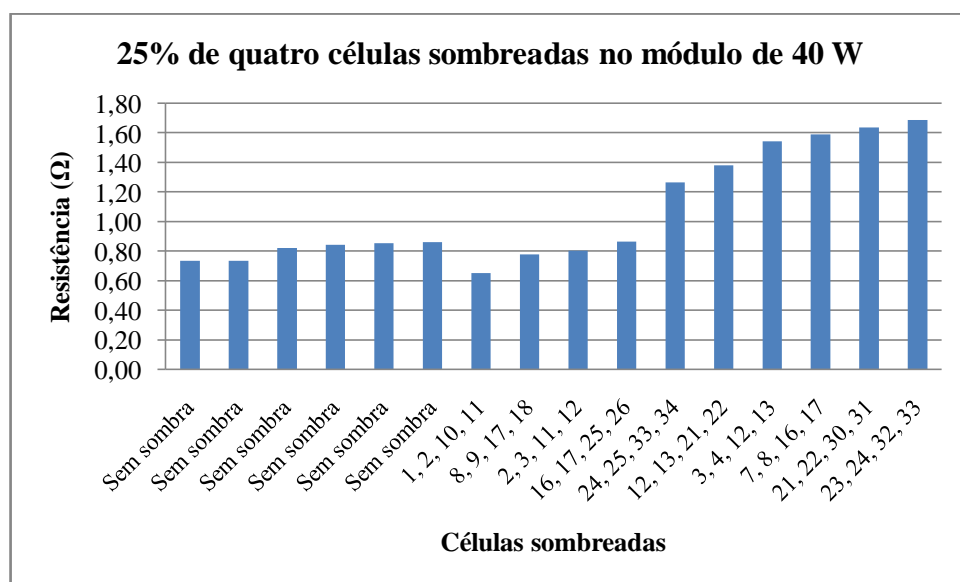


Figura 5.9: Resistência série com 25% de quatro células sombreadas pelo método do *FF*.

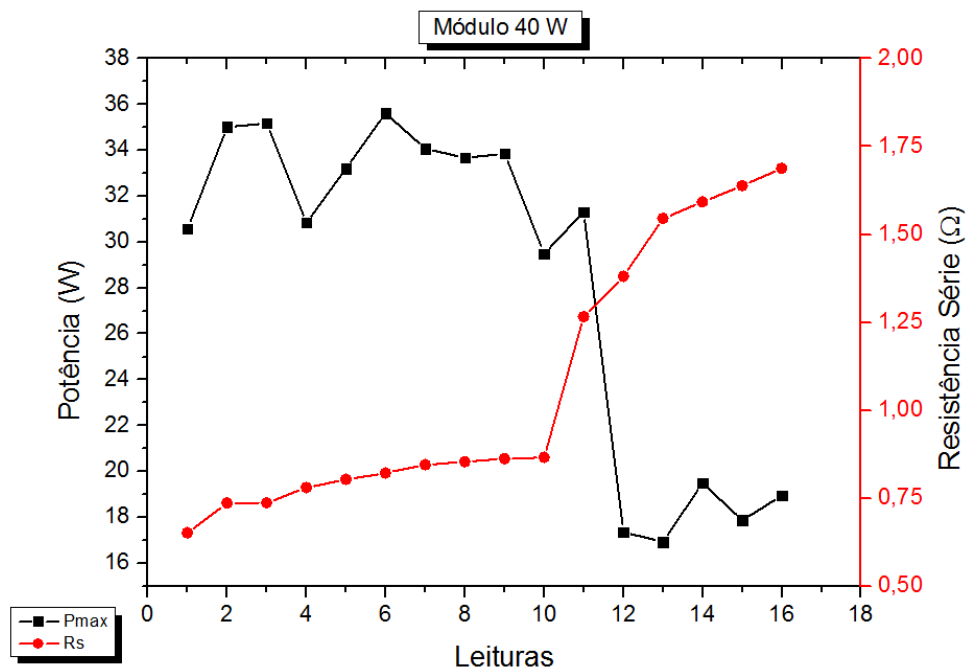


Figura 5.10: P_{max} e R_s pelo método do FF para o sombreamento de 25% de quatro células no módulo de 40 W.

O segundo tipo de sombreamento de acordo com o tamanho do bloqueio cobriu uma área equivalente a duas células fotovoltaicas inteiras. A disposição deste sombreamento consiste da cobertura de 100% de duas células adjacentes e 50% de quatro células vizinhas, conforme mostrado no capítulo 4 nas Figuras 4.6(a) e 4.6(b).

A Tabela 5.6 mostra algumas leituras no módulo de 40 W da ASE-Américas correspondente ao sombreamento de 100% de duas células com as resistências série calculadas pelo método do FF em ordem crescente, a Figura 5.11 mostra o gráfico das resistências série e a Figura 5.12 as potências máximas com suas respectivas resistências. O que chamou a atenção neste tipo de sombreamento no módulo de 40 W foi a grande diferença entre as resistências do módulo sombreado com e sem os diodos *by-pass* em alguns pares de células.

Tabela 5.6: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 40 W para um sombreamento parcial de 100% de duas células adjacentes.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
Sem sombra	13,70	2,60	35,68	18,45	2,91	969,0	50	66,4	0,80
Sem sombra	13,53	2,59	35,01	18,07	2,94	955,2	59	66,0	0,74
Sem sombra	13,49	2,61	35,18	18,10	2,95	958,8	59	66,0	0,74
Sem sombra	13,79	2,55	35,18	18,11	2,95	957,3	59	66,0	0,74
Sem sombra	13,54	2,58	34,98	18,08	2,95	956,5	59	65,7	0,75
Sem sombra	13,50	2,61	35,17	18,11	2,95	959,8	59	65,8	0,75
20 e 29 CD	5,57	2,35	13,11	13,01	2,90	939,3	67	34,7	1,85
1 e 10 CD	5,93	2,47	14,68	13,79	2,80	923,0	52	38,1	1,91
25 e 34 CD	5,47	2,31	12,62	14,95	2,76	895,5	65	30,6	2,71
8 e 17 CD	5,76	2,32	13,34	15,50	2,81	920,5	63	30,6	2,80
8 e 17 SD	8,15	0,88	7,19	16,54	1,77	900,5	66	24,6	5,64
25 e 34 SD	7,74	0,78	6,00	16,45	1,52	894,2	67	24,0	6,62
10 e 19 CD	9,97	0,46	4,58	16,80	1,14	858,8	67	24,0	9,05
12 e 21 CD	11,81	0,39	4,55	16,79	0,99	916,5	66	27,3	9,61
10 e 19 SD	8,23	0,44	3,59	16,89	0,91	903,2	66	23,3	11,61
1 e 10 SD	7,96	0,45	3,59	17,30	0,94	963,2	43	22,2	12,02
12 e 21 SD	9,68	0,32	3,10	16,77	0,73	944,2	66	25,4	13,64
20 e 29 SD	9,52	0,30	2,87	17,16	0,68	906,7	63	24,6	15,39

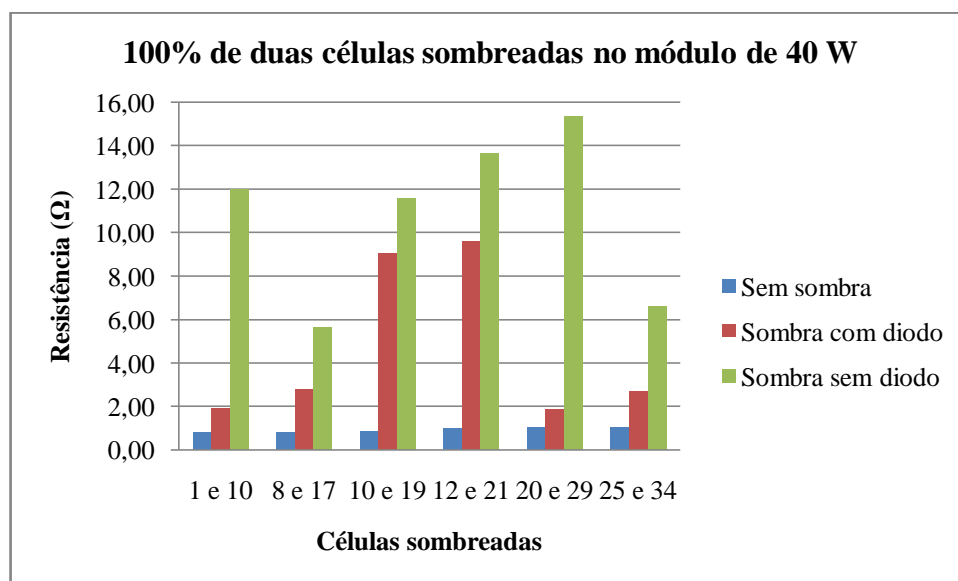


Figura 5.11: Resistência série pelo método do FF com sombreamento de 100% de duas células no módulo da ASE-Américas.

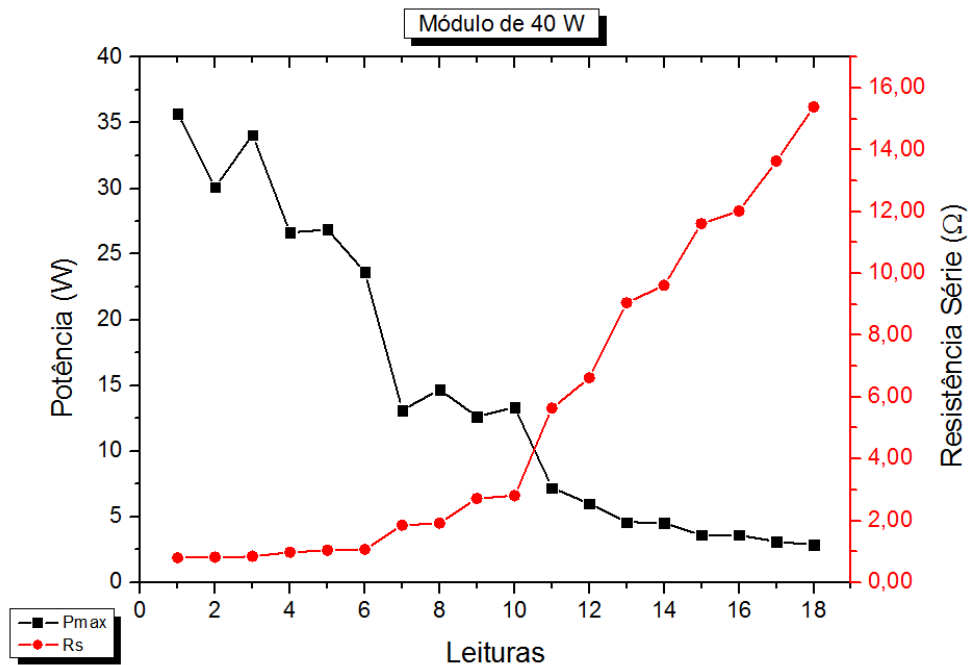


Figura 5.12: P_{max} e R_s pelo método do FF do sombreamento de 100% de duas células no módulo da ASE–Américas.

Na Tabela 5.7 temos algumas leituras do sombreamento de 50% de quatro células com as resistências série calculadas pelo método do FF em ordem crescente. A Figura 5.13 mostra o gráfico das resistências série e a Figura 5.14 mostra o gráfico das potências máximas com as respectivas resistências série.

Tabela 5.7: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 40 W para um sombreamento parcial de 50% de quatro células adjacentes.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
Sem sombra	13,29	2,24	29,73	17,59	2,56	835,3	60	66,0	0,78
Sem sombra	14,03	2,52	35,37	18,46	2,88	961,5	51	66,4	0,80
Sem sombra	14,50	2,19	31,80	18,80	2,53	856,2	45	66,9	0,94
Sem sombra	14,26	2,23	31,78	18,81	2,52	854,8	44	67,0	0,95
Sem sombra	14,50	2,19	31,78	18,82	2,53	856,2	45	66,8	0,95
3, 4, 12, 13	14,69	1,24	18,17	16,99	1,68	860,2	66	63,8	1,26
10, 11, 19, 20	14,49	1,18	17,09	17,07	1,56	842,5	62	64,2	1,36
7, 8, 16, 17	14,33	1,36	19,49	17,00	1,97	851,2	66	58,1	1,59
23, 24, 32, 33	15,53	1,22	18,95	17,58	1,79	837,7	57	60,4	1,69
25, 26, 34, 35	14,64	1,31	19,19	17,23	1,96	825,5	62	56,7	1,80
19, 20, 28, 29	15,29	1,08	16,45	17,31	1,60	833,2	62	59,5	1,90
12, 13, 21, 22	14,46	1,16	16,75	17,03	1,74	845,0	62	56,4	2,01
16, 17, 25, 26	12,99	1,53	19,88	17,02	2,45	848,8	64	47,6	2,12
14, 15, 23, 24	13,71	1,45	19,89	17,03	2,50	850,5	63	46,7	2,15
5, 6, 14, 15	14,59	1,23	17,95	16,93	2,51	835,7	65	42,2	2,49

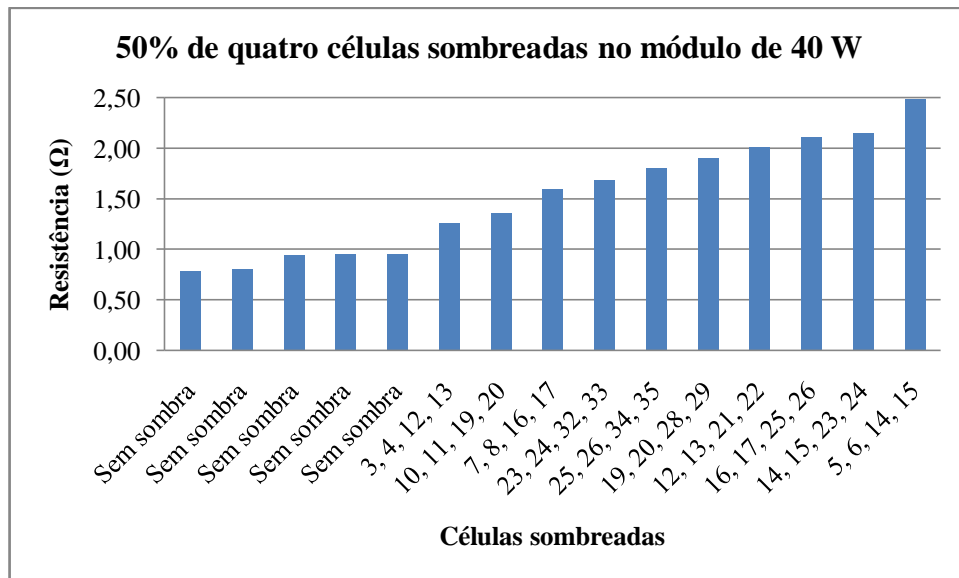


Figura 5.13: Resistências série calculadas pelo método do *FF* para o sombreamento de 50% de quatro células no módulo da ASE–Américas.

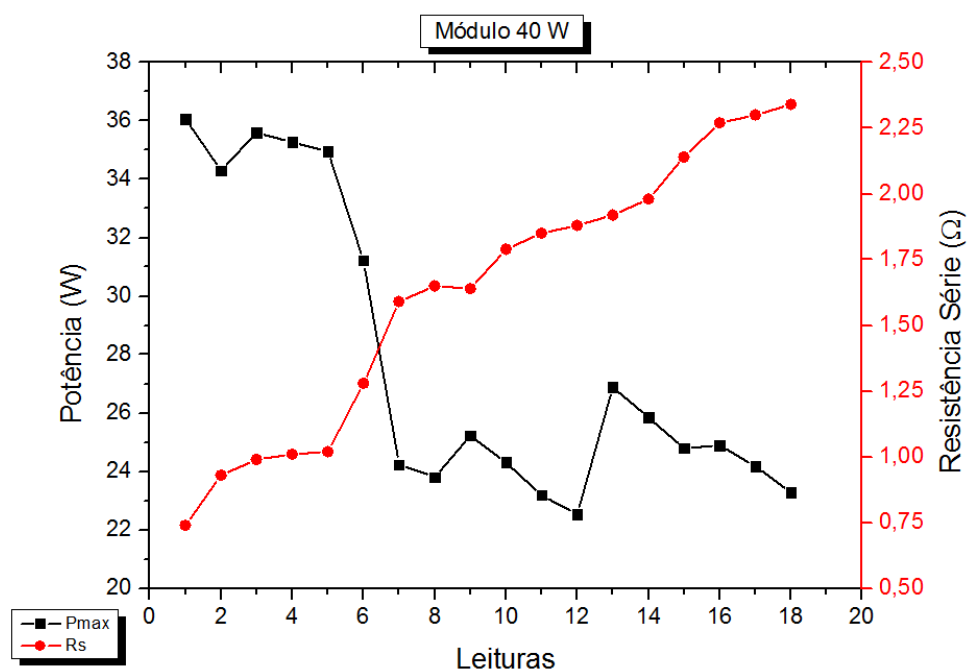


Figura 5.14: P_{max} e R_s pelo método do *FF* do sombreamento de 50% de quatro células no módulo da ASE–Américas.

5.3.2 Resistência Série do Módulo da *SolarWorld*

A Tabela 5.8 apresenta algumas leituras do sombreamento de 100% de uma célula no módulo da *SolarWorld* com as resistências série calculadas pelo método do *FF* em ordem crescente. A Figura 5.15 mostra as resistências do sombreamento com e sem os diodos *by-pass* onde é possível identificar o estado de sombreamento, pois as resistências de todas as leituras do módulo totalmente iluminado ficaram abaixo de 800 mΩ, enquanto as resistências deste sombreamento ficaram acima de 1,10 Ω, mas não houve uma distinção de valores das resistências que separasse as leituras com diodos das leituras sem diodos. As potências máximas e suas respectivas resistências série calculadas pelo método do *FF* são mostradas na Figura 5.16.

Tabela 5.8: Resistências série em ordem crescente dos módulos de 75 W com e sem diodos *by-pass* para o sombreamento parcial de 100% de uma célula pelo método do *FF*.

Célula	V _{ppm} [V]	I _{ppm} [A]	P _{max} [W]	V _{ca} [V]	I _{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R _s (Ω)
Sem sombra	13,94	4,37	60,93	19,25	5,14	922,5	51	61,7	0,67
Sem sombra	14,62	4,58	67,03	19,94	5,40	966,3	47	62,2	0,68
Sem sombra	14,80	4,52	66,91	19,97	5,40	967,0	47	62,0	0,69
Sem sombra	14,39	4,66	67,02	20,00	5,41	968,3	46	62,0	0,69
Sem sombra	13,74	4,39	60,37	19,23	5,12	931,0	51	61,3	0,69
Sem sombra	14,15	4,33	61,20	19,42	5,12	928,0	50	61,6	0,69
36 SD	10,26	4,13	42,38	17,39	5,49	962,0	66	44,4	1,10
28 SD	9,89	4,27	42,20	17,38	5,46	956,2	65	44,5	1,10
23 SD	9,12	4,32	39,35	17,29	5,46	957,3	65	41,7	1,20
9 SD	9,83	4,03	39,58	17,37	5,45	958,5	65	41,8	1,21
28 CD	11,43	4,17	47,72	19,25	5,29	957,8	53	46,9	1,24
36 CD	11,34	4,10	46,47	19,10	5,33	956,7	54	45,6	1,27
1 SD	9,17	4,11	37,69	17,34	5,43	956,8	64	40,0	1,28
14 SD	8,12	4,08	33,13	16,96	5,43	955,2	65	36,0	1,40
9 CD	10,58	4,12	43,62	19,16	5,34	952,7	51	42,6	1,41
1 CD	10,19	4,24	43,23	19,11	5,33	945,3	51	42,4	1,42
23 CD	9,93	4,19	41,64	18,82	5,30	956,8	53	41,7	1,42
14 CD	9,03	4,03	36,41	18,07	5,34	951,3	51	37,8	1,50

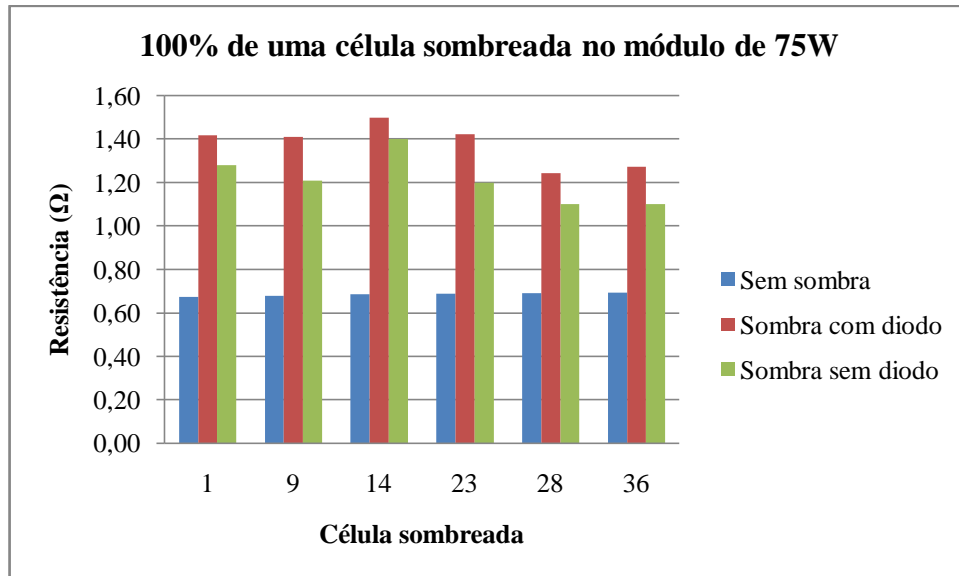


Figura 5.15: Resistência série com 100% de uma célula sombreada pelo método do *FF* no módulo de 75 W.

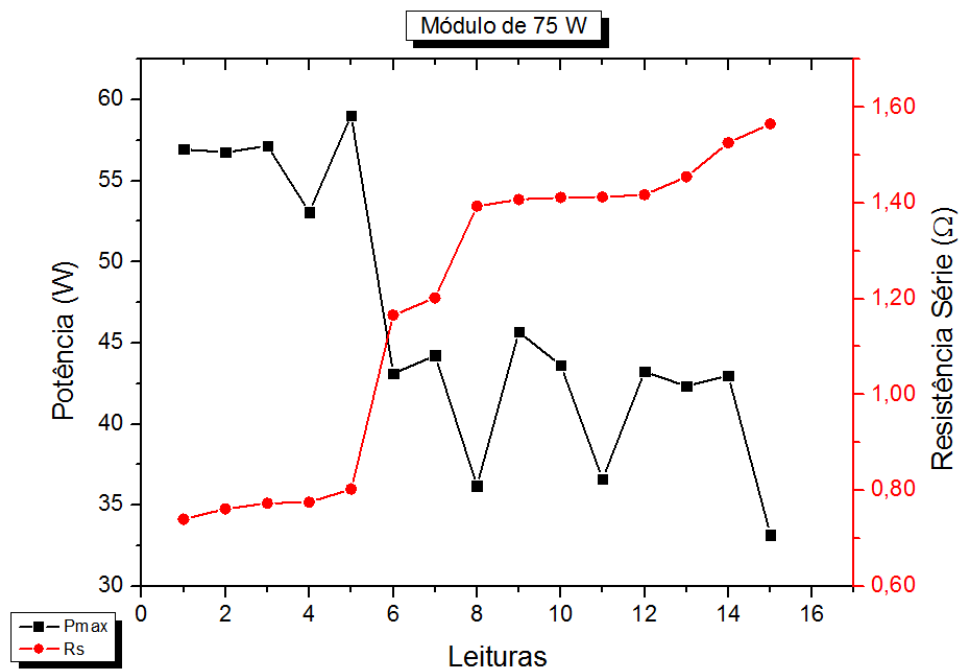


Figura 5.16: P_{max} e a R_s pelo método do *FF* para o sombreamento de 100% de uma célula no módulo de 75 W.

A Tabela 5.9 mostra algumas leituras do sombreamento de 50% de duas células adjacentes no módulo da *SolarWorld* com as resistências série calculadas pelo método do *FF* em ordem crescente. A Figura 5.17 mostra as resistências deste sombreamento e a Figura 5.18 tem as potências máximas com as respectivas resistências.

Tabela 5.9: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 75 W para um sombreamento parcial de 50% de duas células adjacentes.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
Sem sombra	13,83	4,64	64,22	19,34	5,45	957,0	57	60,9	0,66
Sem sombra	13,67	4,59	62,75	19,37	5,44	954,3	58	59,5	0,71
Sem sombra	13,95	4,51	62,95	19,38	5,44	956,2	57	59,7	0,71
Sem sombra	13,76	4,68	64,35	19,37	5,44	956,2	57	61,1	0,65
Sem sombra	13,75	4,65	63,95	19,37	5,44	954,5	57	60,7	0,67
26 e 35	11,87	3,59	42,66	18,55	5,15	904,7	63	44,7	1,28
8 e 17	15,78	2,64	41,67	18,64	5,07	910,3	61	44,1	1,34
2 e 11	13,37	3,86	51,54	20,62	5,36	967,0	37	46,7	1,40
6 e 15	17,40	2,75	47,83	20,39	5,37	968,0	40	43,7	1,50
9 e 18	16,72	2,82	47,16	20,29	5,35	964,8	41	43,4	1,51
5 e 14	5,89	4,70	27,70	16,38	5,46	959,2	59	31,0	1,54
24 e 33	6,08	4,43	26,95	16,28	5,56	966,8	60	29,8	1,55
16 e 25	7,67	3,02	23,19	16,06	5,29	964,8	59	27,3	1,71
18 e 27	7,85	2,96	23,22	16,60	5,26	964,0	59	26,6	1,82
14 e 23	7,73	2,65	20,47	15,94	5,18	962,5	59	24,8	1,84

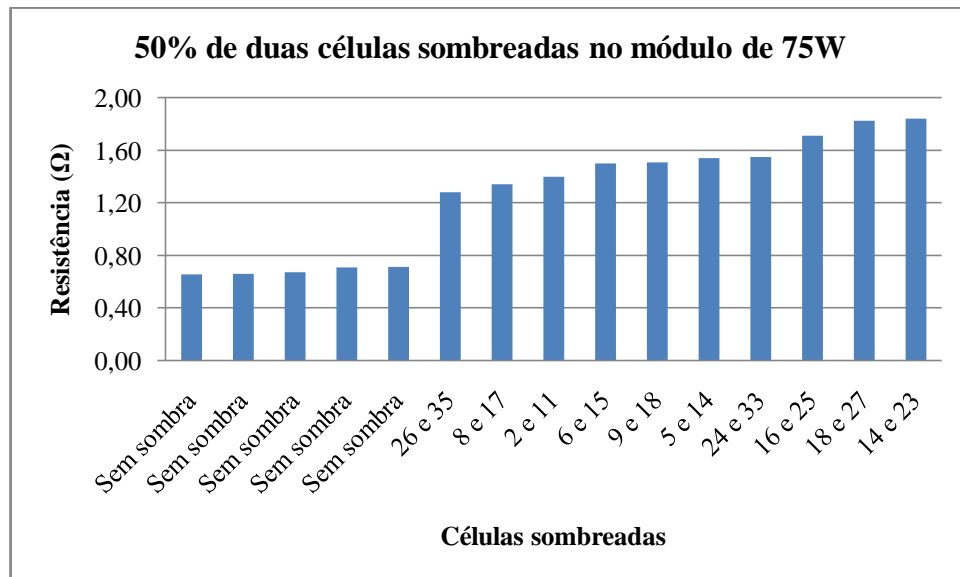


Figura 5.17: Resistências série calculadas pelo método do FF para o sombreamento de 50% de duas células no módulo da SolarWorld.

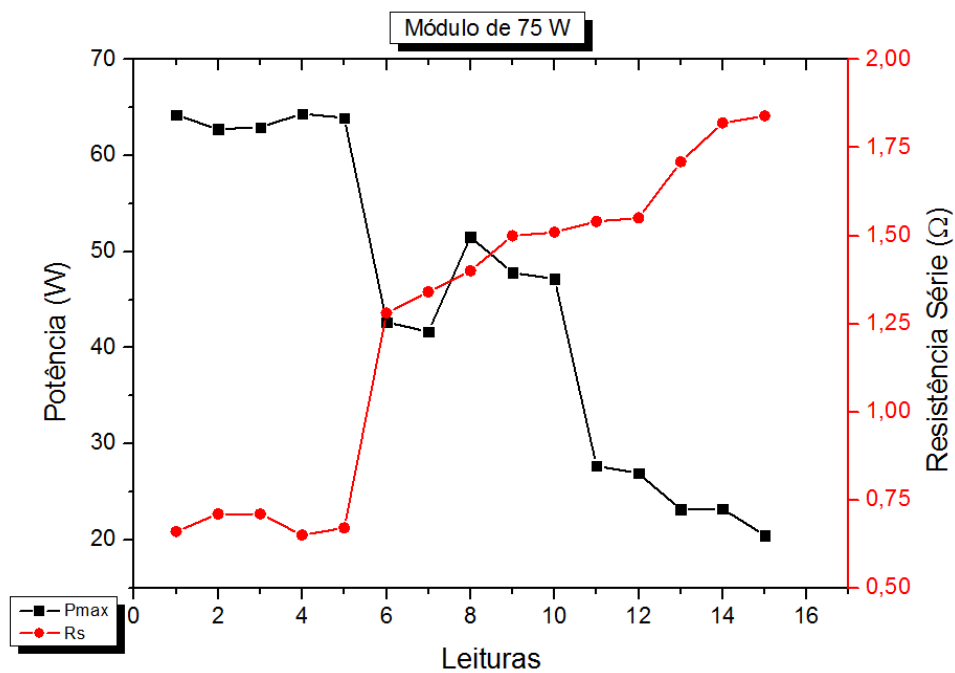


Figura 5.18: P_{max} e R_s pelo método do FF para o sombreamento de 50% de duas células no módulo da SolarWorld.

Com 25% de sombreamento de quatro células no módulo da SolarWorld as potências de saída ficaram muito próximas, com alguns casos de potência maior no sombreamento do que no módulo sem sombra por diferenças de radiação e temperatura, contudo as resistências série também ficaram bem próximas mas houve a distinção entre o estado de sombreamento e totalmente iluminado por pequena diferença a partir de 80 mΩ, mostrado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 75 W com e sem diodos *by-pass* para um sombreamento parcial de 25% de quatro células adjacentes.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
Sem sombra	14,24	4,66	66,34	19,58	5,46	976,5	54	62,0	0,64
Sem sombra	14,19	4,61	65,42	19,59	5,46	973,5	54	61,1	0,67
Sem sombra	14,12	4,62	65,28	19,58	5,48	976,2	54	60,9	0,68
Sem sombra	13,26	4,43	58,76	18,52	5,42	943,3	63	58,5	0,68
Sem sombra	12,47	4,64	57,88	18,53	5,42	942,3	63	57,7	0,71
8, 9, 17, 18	14,39	3,78	54,45	19,02	4,85	892,2	56	59,1	0,79
13, 14, 22, 23	14,75	3,76	55,45	19,08	5,02	917,3	55	57,9	0,82
25, 26, 34, 35	15,22	4,01	61,04	19,62	5,49	980,0	53	56,6	0,84
12, 13, 21, 22	15,56	3,89	60,54	19,76	5,35	980,5	53	57,3	0,85
22, 23, 31, 32	14,73	3,51	51,71	18,96	4,70	856,0	56	58,1	0,85
14, 15, 23, 24	14,70	3,67	54,02	19,04	4,99	903,3	55	56,9	0,86
1, 2, 10, 11	15,44	3,91	60,43	19,74	5,49	983,2	52	55,7	0,89
10, 11, 19, 20	15,19	2,60	39,53	18,43	4,51	943,3	64	47,6	1,31
21, 22, 30, 31	15,21	2,61	39,63	18,42	5,47	947,3	63	39,3	1,42
19, 20, 28, 29	15,14	2,61	39,46	18,39	5,47	942,8	63	39,2	1,42

O gráfico das resistências série do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da *SolarWorld* é mostrado na Figura 5.19 e as potências máximas com suas respectivas resistências série estão na Figura 5.20.

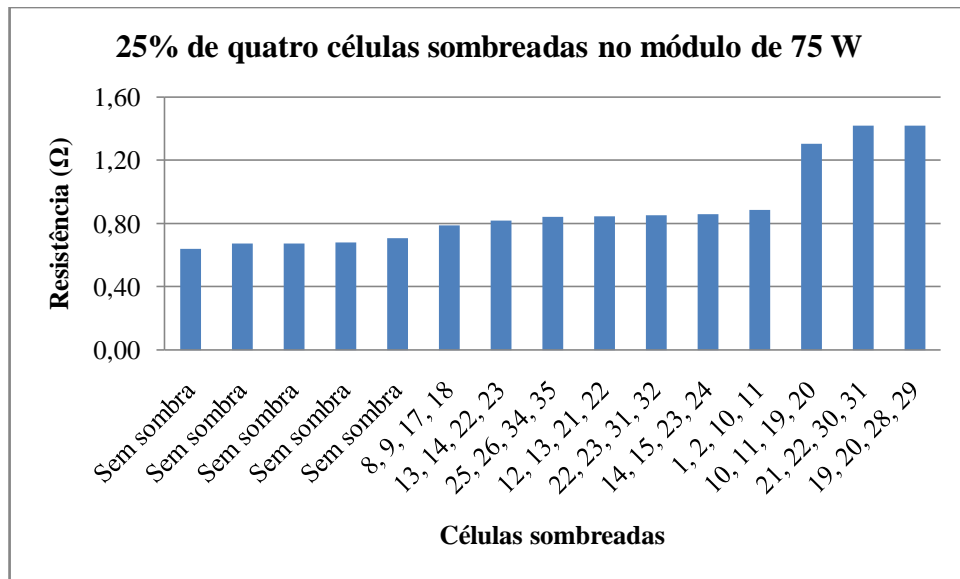


Figura 5.19: Resistências série calculadas pelo método do *FF* do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da *SolarWorld*.

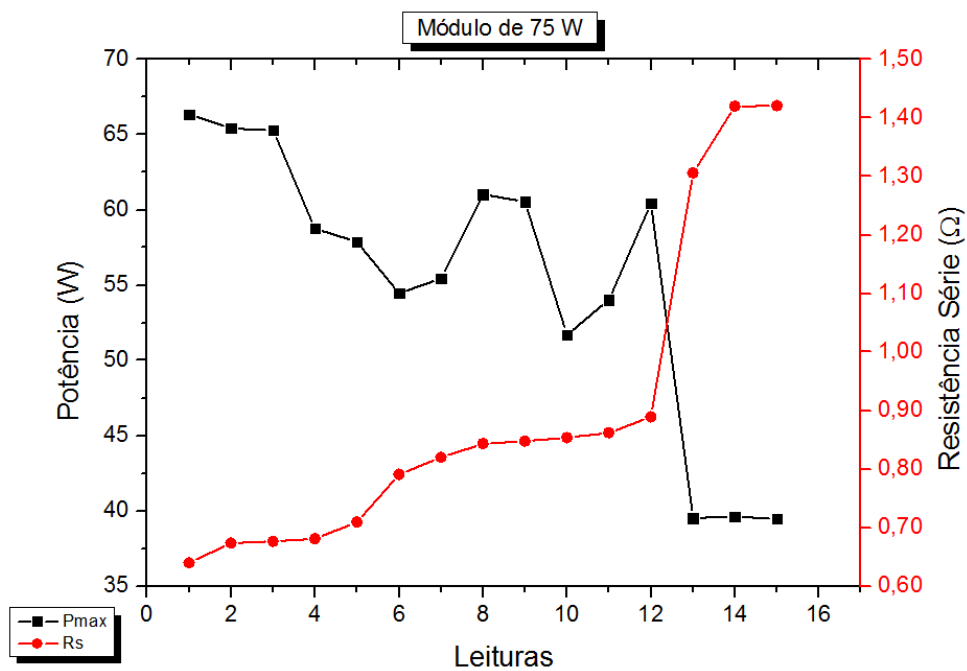


Figura 5.20: P_{max} e R_s pelo método do *FF* do sombreamento de 25% de quatro células no módulo da *SolarWorld*.

Na Tabela 5.11 temos algumas leituras correspondentes ao sombreamento de 100% de duas células nos módulos da *SolarWorld*, com as resistências série calculadas pelo método do *FF* em ordem crescente. As Figuras 5.21 e 5.22 mostram respectivamente os gráficos das resistências série e das potências máximas com suas respectivas resistências.

Tabela 5.11: Resistências série em ordem crescente pelo método do Fator de Forma dos módulos de 75 W para um sombreamento parcial de 100% de duas células adjacentes.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
Sem sombra	13,23	4,44	58,73	18,49	5,41	941,5	64	58,7	0,67
Sem sombra	12,47	4,64	57,88	18,53	5,42	942,3	63	57,7	0,71
Sem sombra	14,14	4,33	61,29	19,38	5,23	929,0	58	60,4	0,71
Sem sombra	13,67	4,59	62,75	19,37	5,44	954,3	58	59,5	0,71
Sem sombra	14,42	4,28	61,80	19,70	5,15	913,5	52	60,9	0,73
25 e 34 CD	5,71	4,48	25,55	14,91	5,34	922,5	63	32,1	1,34
7 e 16 CD	5,80	4,48	25,97	15,57	5,44	958,0	60	30,7	1,46
6 e 15 CD	7,87	3,66	28,77	16,56	5,46	959,2	59	31,8	1,53
6 e 15 SD	8,71	3,63	31,60	17,48	5,14	941,0	54	35,1	1,60
20 e 29 CD	8,64	3,46	29,91	17,27	5,53	965,8	59	31,3	1,62
20 e 29 SD	8,09	3,82	30,90	17,70	5,18	948,8	55	33,7	1,68
13 e 22 CD	8,20	3,24	26,56	16,77	5,33	964,7	60	29,7	1,68
7 e 16 SD	7,65	3,29	25,16	16,69	5,11	947,5	54	29,5	1,76
13 e 22 SD	8,20	3,50	28,70	17,68	5,12	805,0	55	31,7	1,79
25 e 34 SD	6,93	2,83	19,61	15,44	5,07	810,2	56	25,0	1,80

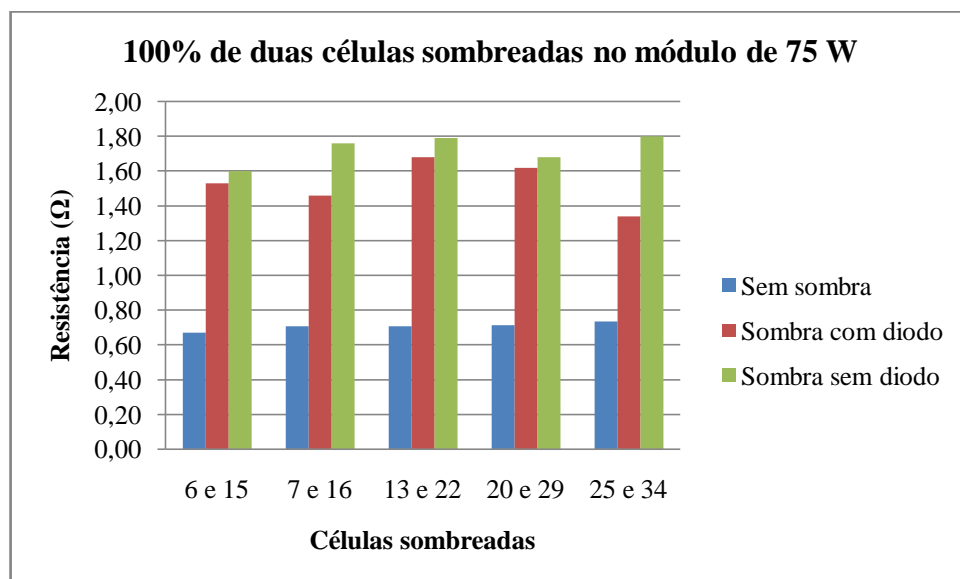


Figura 5.21: Resistências série calculadas pelo método do *FF* do sombreamento de 100% de duas células no módulo da *SolarWorld*.

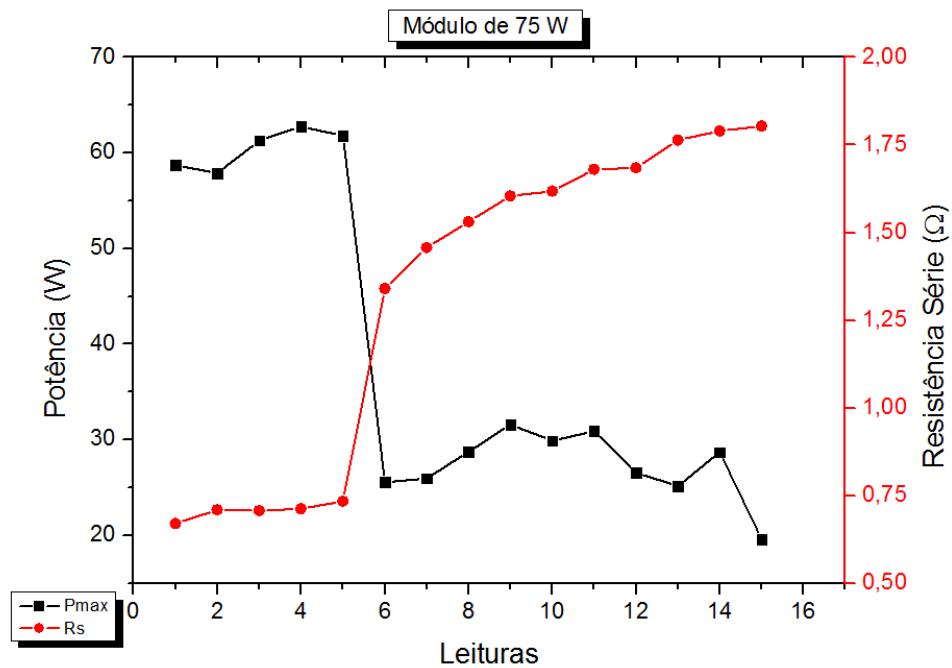


Figura 5.22: P_{max} e R_s pelo método do FF do sombreamento de 100% de duas células no módulo da SolarWorld.

Leituras referentes ao sombreamento de 50% de quatro células no módulo da SolarWorld com as resistências série calculadas pelo método do FF são mostradas na Tabela 5.12. As Figuras 5.23 e 5.24 mostram respectivamente os gráficos das resistências série e das potências máximas com suas respectivas resistências.

Tabela 5.12: Resistências série em ordem crescente pelo método do FF dos módulos de 75 W para o sombreamento parcial de 50% de quatro células adjacentes.

Células	V_{ppm} [V]	I_{ppm} [A]	P_{max} [W]	V_{ca} [V]	I_{cc} [A]	G [W/m ²]	T [°C]	FF [%]	R_s (Ω)
Sem sombra	13,23	4,44	58,73	18,49	5,41	941,5	64	58,7	0,67
Sem sombra	12,47	4,64	57,88	18,53	5,42	942,3	63	57,7	0,71
Sem sombra	14,14	4,33	61,29	19,38	5,23	929,0	58	60,4	0,71
Sem sombra	13,67	4,59	62,75	19,37	5,44	954,3	58	59,5	0,71
Sem sombra	14,42	4,28	61,80	19,70	5,15	913,5	52	60,9	0,73
Sem sombra	13,34	4,27	56,96	18,99	5,06	899,8	60	59,3	0,74
10, 11, 19, 20	15,19	2,60	39,53	18,43	4,51	943,3	64	47,6	1,31
16, 17, 25, 26	15,36	2,58	39,57	18,39	4,58	953,2	64	47,0	1,31
7, 8, 16, 17	15,52	2,57	39,92	18,44	5,42	945,2	64	40,0	1,40
1, 2, 10, 11	15,37	2,59	39,86	18,45	5,45	948,7	64	39,7	1,41
21, 22, 30, 31	15,21	2,61	39,63	18,42	5,47	947,3	63	39,3	1,42
19, 20, 28, 29	15,14	2,61	39,46	18,39	5,47	942,8	63	39,2	1,42
25, 26, 34, 35	15,53	2,52	39,19	19,29	4,59	932,3	58	44,3	1,56
14, 15, 23, 24	15,55	2,50	38,90	19,24	4,72	938,3	57	42,8	1,58
12, 13, 21, 22	15,59	2,51	39,20	19,29	4,80	940,2	56	42,3	1,59

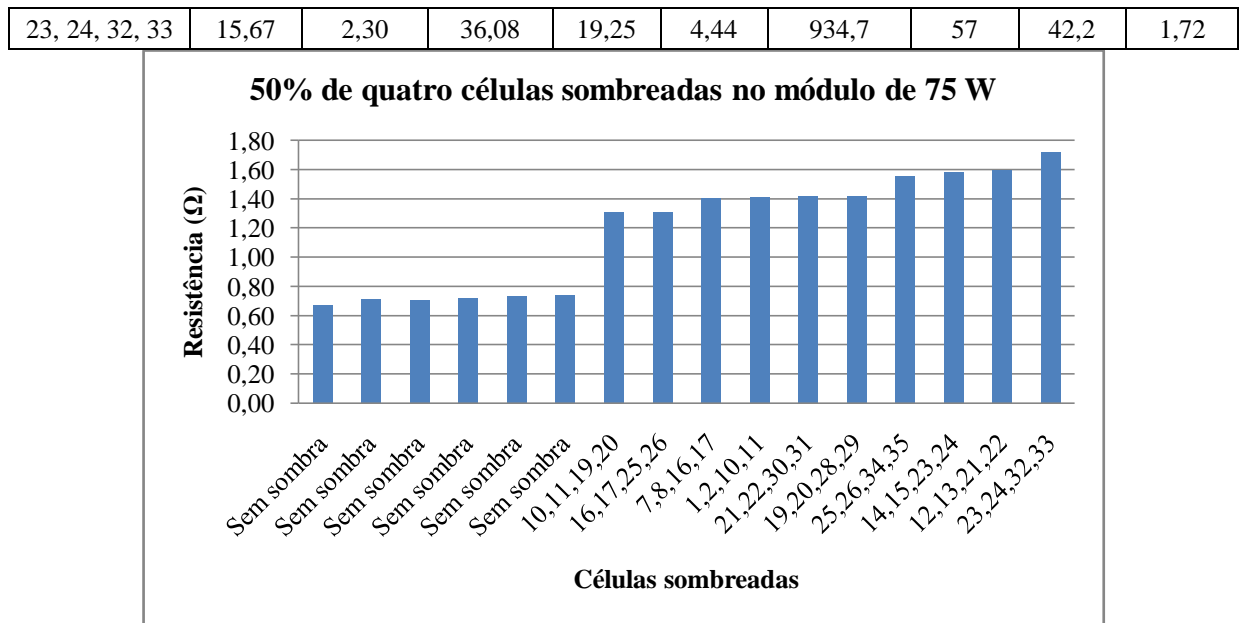


Figura 5.23: Resistências série calculadas pelo método do FF para o sombreamento de 50% de quatro células no módulo de 75 W.

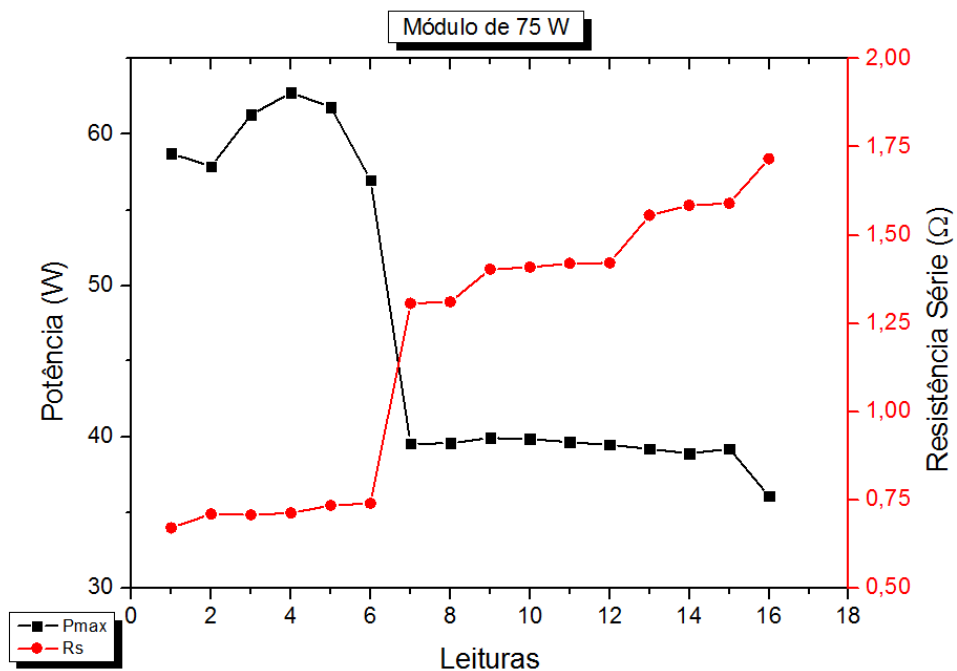


Figura 5.24: P_{max} e R_s pelo método do FF do sombreamento de 50% de quatro células no módulo da SolarWorld.

5.4 Conclusões

O estudo da resistência série dos módulos fotovoltaicos confirmou o seu aumento com a redução da potência, mas sob condições de sombreamentos parciais o valor da resistência série também sofreu aumentos significativos, com exceção no caso do sombreamento de 25% de quatro células nos módulos de 40 W da *ASE–Américas*, que apresentaram resistências série até menores que no caso do módulo sem sombra, lembrando que os módulos da *ASE–Américas* utilizados nesta pesquisa têm 15 anos de fabricação e uso em campo, apresentam pequenas manchas em algumas de suas células, que podem indicar sinais de degradação e apresentaram muitas diferenças entre as resistências série calculadas para mesmas condições de radiação e temperatura nos mesmos tipos de sombreamento. Os módulos da *SolarWorld* utilizados na pesquisa são novos e ainda não haviam sido usados em campo, e não apresentaram muitas divergências quando submetidos aos mesmos tipos de sombreamento e às mesmas condições temperatura e radiação.

De um modo geral, a proposta de identificar se um módulo está ou não sob sombreamento parcial apresentou um bom nível de confiabilidade, mesmo nos módulos desgastados pelo tempo de uso. Esta técnica poderia servir como um complemento a sistemas de monitoramento e Rastreamento do Ponto de Potência Máxima (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*), pois estes apresentam dificuldade em encontrar o ponto ótimo de funcionamento dos módulos quando estes estão sob sombreamento parcial.

No próximo capítulo é apresentado o estudo e desenvolvimento de um modelo computacional baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA), para a simulação computacional do comportamento dos módulos utilizados nesta pesquisa sob as condições de sombreamento parcial propostas e a comparação das saídas da RNA com os dados reais colhidos em campo.

6 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS NO ESTUDO DO SOMBREAMENTO PARCIAL

6.1 Introdução

Técnicas de Inteligência Artificial (IA) têm sido utilizadas por diversos pesquisadores para modelagem, simulação, controle e identificação de sistemas fotovoltaicos, Mellit e Kalogirou (2008) mostram que a maioria destas aplicações lidam com Redes Neurais Artificiais (RNAs). RNAs são sistemas paralelos distribuídos, compostos por unidades de processamento simples (nós) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não-lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões, geralmente unidirecionais. Na maioria dos modelos estas conexões estão associadas a pesos sinápticos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede. A inspiração das RNAs vem do princípio de funcionamento do cérebro humano, o neurônio artificial é um modelo matemático que representa um neurônio biológico. Na Figura 6.1 observam-se as semelhanças entre um neurônio biológico e um computacional, em que as entradas do neurônio artificial (x_i) são análogas aos terminais de recepção do neurônio biológico (Dendritos), a Função de Soma desempenha o papel do Corpo Neuronal e a Função de Ativação representa as reações químicas ao longo do neurônio. A saída (y_j) equivale aos Terminais do Axônio (Transmissão). O índice i corresponde ao número de entradas de um neurônio e j indica o número de neurônios em uma rede. No modelo artificial temos ainda o conjunto de pesos (w_{ji}), que desempenha papel equivalente às reações das conexões sinápticas entre neurônios. Nestas conexões, cada dendrito possui uma reação diferente, estipulada pelas diferentes liberações químicas vindas dos neurônios pré-sinápticos, que poderão possuir caráter inibitório ou excitatório, ao neurônio pós-sináptico. Os pesos representam, portanto, a disposição inibitória ou excitatória dos sinais de entrada.

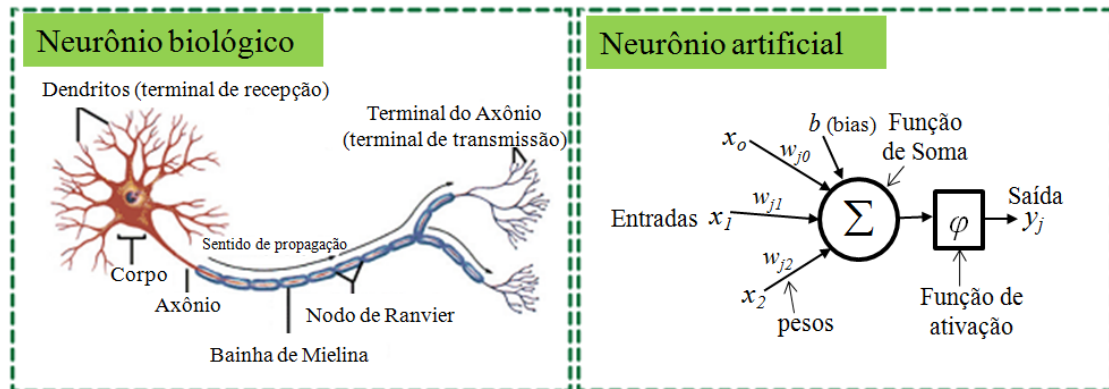


Figura 6.1: Neurônio biológico e neurônio artificial (Fonte: www.mecatronicaatual.com.br, adaptada).

Este neurônio artificial é representado matematicamente por:

$$y_j = \varphi \left(\sum_{i=1}^N w_{ij} x_i + b \right) \quad (6.1)$$

Sendo:

y_j = saída da RNA.

φ = Função de ativação.

N = número de entradas da RNA.

w_{ij} = peso sináptico do neurônio i para o neurônio j .

x_i = entrada da RNA.

b = bias.

Uma RNA pode aproximar e interpolar dados multivariados de maneira rápida, suave e de forma compacta, o que, no caso de técnicas de programação convencionais poderiam exigir enormes bancos de dados. As técnicas envolvendo o uso de RNAs são bem aceitas para a resolução de problemas lineares, não lineares, previsão e regressão estatística, reconhecimento de padrões e em diversas áreas do conhecimento (MATOS, 2011).

6.1.1 Redes *Perceptrons* de Múltiplas Camadas (*MultiLayer*)

Um Perceptron é a forma mais simples de uma rede neural, com apenas um neurônio artificial e por esta razão só é capaz de solucionar problemas linearmente separáveis. A solução para problemas linearmente não separáveis se dá utilizando redes acíclicas como é o caso das redes *MultiLayer Perceptron* (MLP) no qual os neurônios são organizados em

camadas com conexões unidirecionais entre eles, constituindo um conjunto de nós fonte, os quais formam a camada de entrada da rede, uma ou mais camadas escondidas e uma camada de saída (SOLIS e CENTENO, 2012). Um modelo de rede MLP é mostrado na Figura 6.2. Sem as camadas escondidas seria impossível a resolução de problemas linearmente não separáveis. Os sinais de entrada são propagados camada a camada pela rede em uma direção positiva, ou seja, da entrada para a saída. A informação que chega dos dados de entrada é ponderada e processada por funções de ativação ao longo da estrutura da RNA até gerar uma saída.

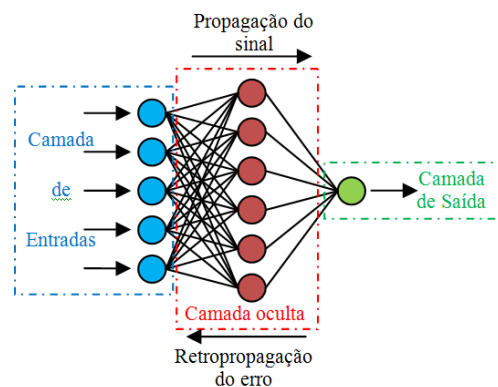


Figura 6.2: Diagrama de uma rede de *Perceptrons* de múltiplas camadas.

Três classes de função de ativação são usualmente utilizadas:

1. Função Sinal [(Fig. 6.3(a))]: neste tipo de função tem-se:

$$F(x) = 1 \quad \text{se } x > 0$$

$$F(x) = 0 \quad \text{se } x \leq 0$$

2. Função Linear por Partes [(Fig. 6.3(b))]: para esta função tem-se:

$$F(x) = 0 \quad \text{se } x \leq -a$$

$$F(x) = x + a \quad \text{se } -a < x < a$$

$$F(x) = 1 \quad \text{se } x \geq a$$

3. Função Sigmoidal: é a função de ativação mais utilizada em RNAs. É definida como uma função monotônica crescente que apresenta propriedades assintóticas e de suavidade. Um exemplo de função sigmoidal é a função logística [(Fig. 6.3(c))] definida por:

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (6.2)$$

Em que a é o parâmetro de inclinação da função. Esta função apresenta saídas dentro do intervalo entre 0 e 1.

Há casos em que é necessário que a saída da função sigmoidal esteja no intervalo entre -1 e 1. Para estes casos utiliza-se a função tangente hiperbólica [(Fig. 6.3(d)] que é dada por:

$$F(x) = \tanh \frac{x}{2} = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (6.3)$$

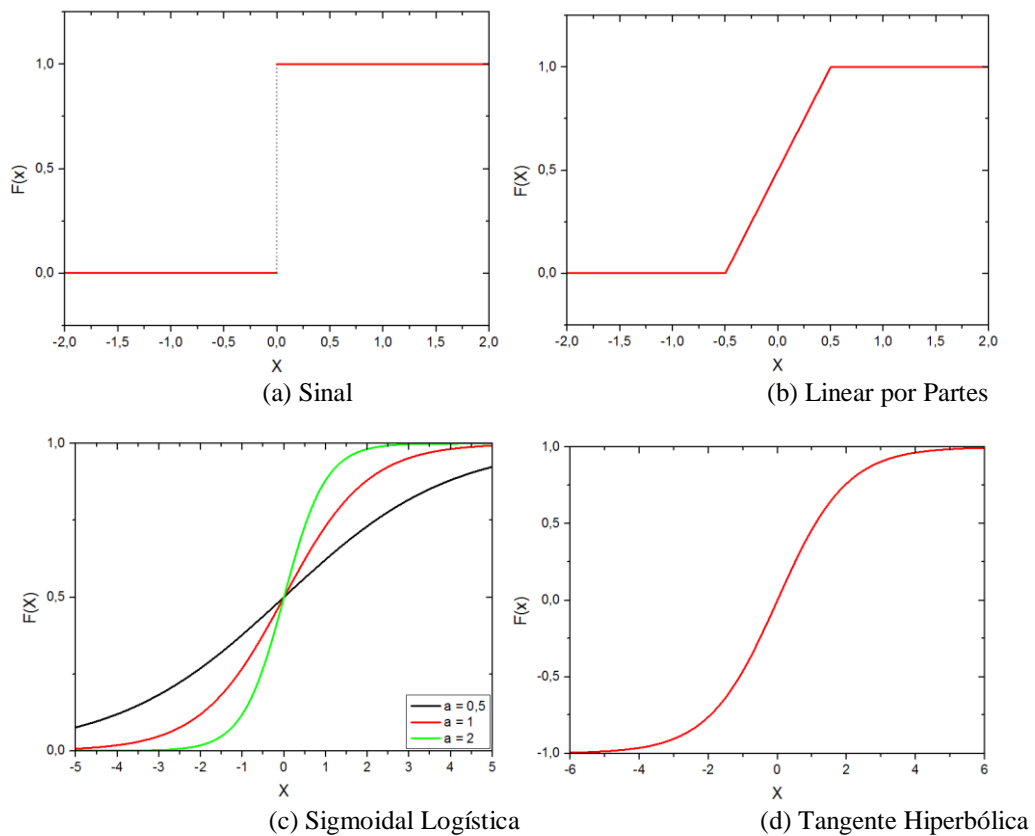


Figura 6.3: Funções de Ativação

6.1.2 Treinamento da RNA

A principal característica das RNAs é a capacidade de aprender a partir de seu ambiente e com isso melhorar seu desempenho, com objetivo de atingir a saída desejada ou o mais próximo possível desta com erro mínimo. Para isto a RNA deve ser treinada e isso é feito através de um processo iterativo de ajustes aplicado a seus pesos para minimização de uma função de erro, com ajuste dos pesos feitos de forma sequencial (Bishop, 2006). Este processo de ajuste dos pesos é realizado pelo algoritmo de aprendizagem, responsável por armazenar na rede o conhecimento observado obtido por meio de exemplos. E, após o

treinamento, a rede pode ser usada para a predição de saídas não-observadas. Na literatura são apresentados vários algoritmos de aprendizagem, supervisionado, não supervisionado e por reforço. Como exemplo de algoritmo supervisionado tem-se o *backpropagation* (retropropagação do erro), que acabou com a limitação das RNAs em resolver problemas não-lineares, tornando-se uma das arquiteturas de redes neurais mais populares atualmente (SOUZA, 2012), (NORIEGA, 2005). Haykin (2001, p. 28) define que uma rede neural extrai seu poder computacional, primeiro, de sua estrutura paralelamente distribuída de forma maciça e, segundo, de sua habilidade de aprender, armazenar e tornar disponível o conhecimento adquirido, e por isso é capaz de generalizar. A generalização se refere ao fato de a RNA produzir saídas adequadas para entradas que não estavam presentes durante o treinamento. A seguir é apresentado o esquema de treinamento do algoritmo *backpropagation*:

1. Iniciar todas as conexões com pesos aleatórios.
2. Apresentar o par de vetores de treinamento (X, d) correspondente ao padrão de entrada (X) e a sua respectiva resposta desejada (d) .
3. Calcular o vetor de saída y da RNA.
4. Comparar o vetor de saída y gerado pela rede com o vetor d de resposta desejada.
5. Calcular o erro δ_i para cada camada da rede, iniciando da camada de saída para a camada de entrada:
 - a. na camada de saída:

$$\delta_i = g'_i(d_i - y_i) \quad (6.4)$$

- b. na camada oculta:

$$\delta_i = g'_i \sum \delta_k w_{ki} \quad (6.5)$$

Sendo:

g'_i : o valor da derivada da função de ativação do neurônio i .

δ_k : o valor do erro para o neurônio k .

w_{ki} : o valor do peso do neurônio k para o neurônio i .

Define-se o valor instantâneo do erro quadrático para o neurônio i como: $\frac{1}{2}\delta_i^2(n)$.

Correspondentemente, o valor instantâneo da soma dos erros quadráticos $\varepsilon(n)$ é obtida somando $\frac{1}{2}\delta_i^2(n)$ sobre todos os neurônios da camada de saída. A soma instantânea dos erros quadráticos na camada de saída do MLP é então escrita como:

$$\varepsilon(n) = \frac{1}{2} \sum_{i \in C} \delta_i^2(n) \quad (6.6)$$

Onde o conjunto C inclui todos os neurônios na camada de saída.

6. Calcular a atualização dos pesos Δw_{ij} aplicando a equação:

$$\Delta w_{ij} = \eta \delta_i \cdot y_j \quad (6.7)$$

Em que:

Δw_{ij} : valor da atualização do peso;

η : taxa de aprendizagem da RNA;

δ_i : valor do erro para o neurônio i ;

y_j : valor de saída do neurônio j ;

Cada apresentação de todo o conjunto de treinamento durante o processo de aprendizagem é chamada de época. O processo de aprendizagem é repetido época após época, até que o conjunto de pesos e bias estabilize e o erro quadrático médio do conjunto de treinamento convirja para um valor mínimo ou que se complete o número de iterações escolhido antes do início da execução da RNA. A taxa de aprendizagem η da RNA influencia diretamente na forma com a qual a rede converge para a solução correta, de modo que, se a taxa escolhida for muito pequena deixará a convergência lenta e corre o risco de ficar presa num mínimo local, ou se a taxa for muito grande fará a RNA oscilar com um passo que ocasionará oscilações no processamento da rede impossibilitando-a de chegar ao resultado desejado. É aconselhável fazer com que a ordem de apresentação das amostras seja feita de forma aleatória, para prevenir tendências associadas a esta ordem de apresentação e fazer com que a busca no espaço de pesos tenha um caráter estocástico ao longo dos ciclos de treinamento.

Os problemas de lentidão na convergência, mínimos locais e oscilações no processamento e atualização dos pesos e bias podem ser reduzidos com a inclusão do termo *momentum* (ρ), melhorando o desempenho da RNA. O *momentum* impede que a RNA fique presa num mínimo local e a parada do processamento antes da convergência correta dos pesos, sua utilização é opcional e sua influência é determinada pelo seu valor que varia entre 0 (ρ não utilizado) e 1 (influência máxima). A inclusão do *momentum* modifica a equação 6.7 para:

$$\Delta w_{ij} = \eta \delta_i \cdot y_j + \rho \cdot \Delta w_{a_{ij}} \quad (6.8)$$

Em que:

$\Delta w_{a_{ij}}$: Valor da atualização do peso da iteração anterior;

ρ : *Momentum*

6.1.3 Teste da RNA

Depois que a rede é treinada com o erro em um nível satisfatório, ela deve ser testada para verificar sua capacidade de generalização adquirida no treinamento, o conjunto de teste é utilizado para determinar o desempenho da rede com dados que não foram previamente utilizados. O desempenho da rede, medida nesta fase, é uma boa indicação de seu desempenho real, para que possa ser utilizada como uma ferramenta de classificação de novos dados. Para isto, a rede é utilizada apenas no modo progressivo (*feed-forward*), ou seja, novas entradas são apresentadas à camada de entrada, são processadas na camada intermediária e os resultados são apresentados na camada de saída, como no treinamento, mas sem a retropropagação do erro. A saída apresentada é o modelo dos dados, na interpretação da rede.

6.2 Aplicação de RNAs no Sombreamento Parcial de Módulos Fotovoltaicos

Existem vários programas de simulação para determinação dos parâmetros de funcionamento de células fotovoltaicas (MATOS, 2006) e sistemas fotovoltaicos (RODRIGUES, 2012), contudo, em condições desfavoráveis como no caso de sombreamento parcial do módulo fotovoltaico estes programas podem apresentar dificuldades para desempenhar com segurança seus objetivos, devido às peculiaridades deste problema (QUASCHNING; HANITSCH, 1995). A partir da observação do comportamento de resposta de células e módulos fotovoltaicos, conclui-se que a RNA se mostra uma ferramenta propícia para a extração das características de operação destes. Isto devido à capacidade de uma RNA reconhecer e manipular a informação a partir da experiência adquirida no treinamento e aplicar esse conhecimento na resolução de problemas que exigem aprendizado (MATOS, 2011).

Com base nestas propriedades, foi desenvolvido um modelo de RNA do tipo *MultiLayer Perceptron* de camada escondida única com algoritmo de aprendizado *backpropagation* e função de ativação Sigmoidal, configurada para receber cinco entradas e fornecer uma saída e assim simular as condições de sombreamento parcial impostas sobre os módulos utilizados nesta pesquisa.

Como citado no capítulo 4, cada leitura no *Mini KLA* fornece a tensão de circuito aberto (V_{ca}), a corrente de curto-circuito (I_{cc}), a tensão e corrente no ponto de potência máxima (V_{ppm} e I_{ppm}), a intensidade da radiação solar (G), o fator de preenchimento (FF) e a temperatura (T) do módulo fotovoltaico. A cada leitura do *mini KLA* estes parâmetros são gravados juntos em um único arquivo txt, para a configuração das RNAs estes parâmetros foram separados em arquivos individuais, tendo assim um conjunto de dados para cada parâmetro.

Foram configuradas cinco RNAs, cada uma tendo como saída um dos parâmetros fornecidos pelo *Mini KLA* sendo estes: V_{ca} , I_{cc} , V_{ppm} , I_{ppm} e FF . Cada uma das RNA recebeu como entradas: a temperatura na superfície do módulo (T), a intensidade da radiação solar (G), a quantidade de células sombreadas, o percentual do sombreamento parcial em cada célula (100%, 50% e 25%), a potência do módulo (40 W ou 75 W) e a presença ou não dos diodos de desvio.

Antes da execução da RNA o usuário deve definir o número de neurônios na camada escondida, a taxa de aprendizagem da RNA, o número de ciclos (épocas) que serão executados e a inicialização com novos pesos ou com pesos da execução anterior (inicia-se com novos pesos sempre que houver alterações na topologia anterior). Quando se observa que a RNA não está convergindo para um erro mínimo satisfatório, para uma nova execução, devem-se fazer alterações na topologia da RNA, no número de ciclos, quantidade de neurônios da camada escondida e taxa de aprendizagem, além disso, durante a execução da RNA pode-se alterar a taxa de aprendizagem, pois esta é lida no início de cada ciclo, e desta forma buscar melhorar a precisão de convergência da RNA durante o processo de execução dos ciclos.

6.3 Resultados

No total foram utilizados 896 leituras (elementos) dos módulos de 40 W (*ASE–Américas*) e 668 leituras dos módulos de 75 W (*SolarWorld*), que foram normalizadas e mescladas de forma aleatória para cada modelo de módulo. Após a normalização e mesclagem das leituras fez-se a separação dos dados para compor os vetores de entrada e saída das cinco RNAs. Os dados também foram divididos em dois conjuntos: um de treinamento e um de teste das RNAs. Na primeira etapa fizeram-se os treinamentos e testes das RNAs para os módulos de 40 W e 75 W separadamente e na segunda etapa as leituras dos dois modelos de módulos foram unidas e mescladas aleatoriamente.

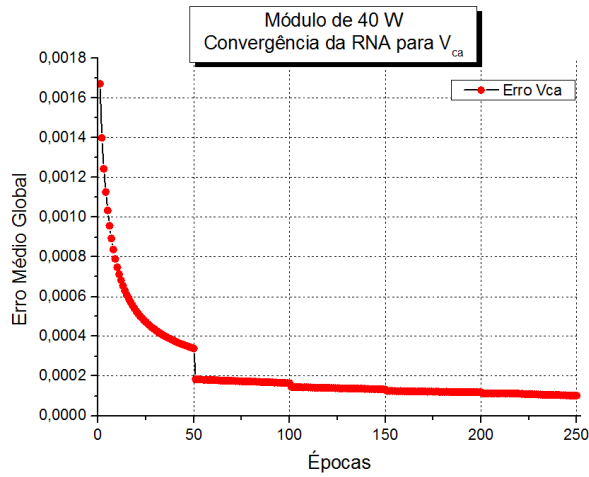
6.3.1 RNAs aplicadas nos Módulos de 40 W da *ASE–Américas, Inc.*

Das 896 leituras feitas nos módulos de 40 W da *ASE–Américas, Inc.*, 599 formaram o conjunto de treinamento e 297 formaram o conjunto de teste das RNAs. A Figura 6.4 mostra as convergências das RNAs para os cinco parâmetros do módulo de 40 W e a Tabela 6.1 mostra os erros médios globais da convergência da RNA de cada parâmetro. Os cinco parâmetros exigiram várias execuções das redes em busca da melhor configuração da topologia para que houvesse a convergência para um erro mínimo satisfatório sem que a rede ficasse presa num mínimo local. Dos cinco parâmetros a corrente de curto-circuito (I_{cc}) e a

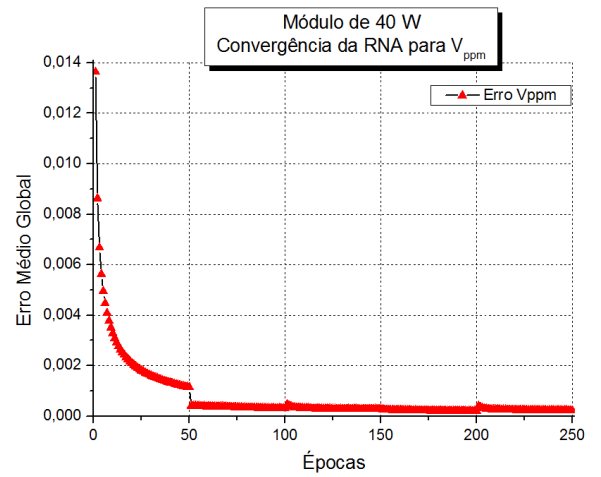
tensão de circuito aberto (V_{ca}) precisaram de um maior número de execuções testando diferentes configurações até que convergissem para um erro mínimo aceitável.

Tabela 6.1: Erro Médio Global das RNAs para os módulos de 40 W.

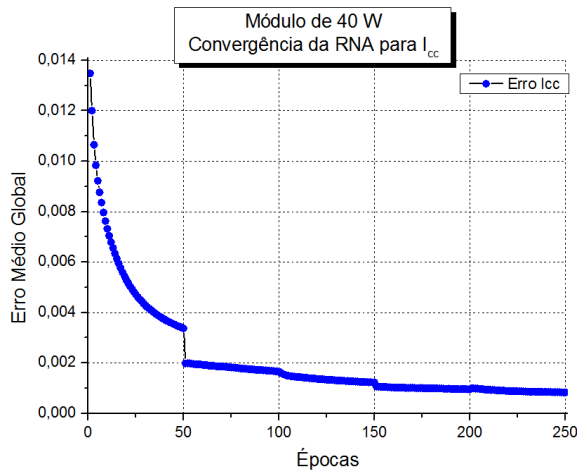
V_{ca}	I_{cc}	V_{ppm}	I_{ppm}	FF
$6,89 \times 10^{-5}$	$8,29 \times 10^{-4}$	$2,19 \times 10^{-4}$	$6,26 \times 10^{-4}$	$5,25 \times 10^{-4}$



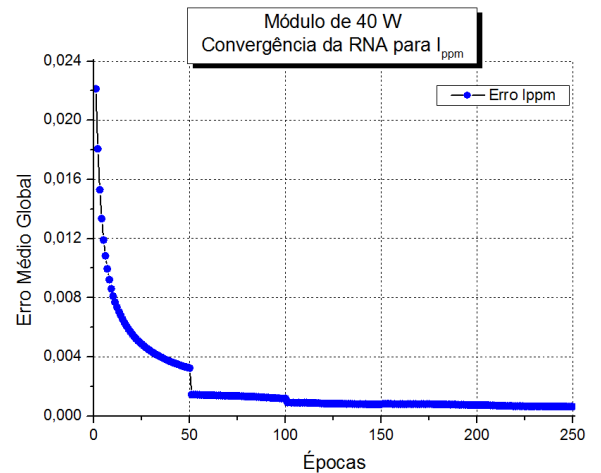
(a) Convergência para V_{ca}



(b) Convergência para V_{ppm}



(c) Convergência para I_{cc}



(d) Convergência para I_{ppm}

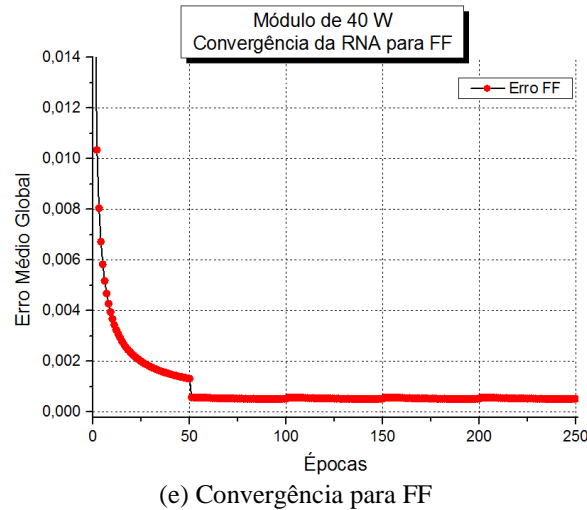
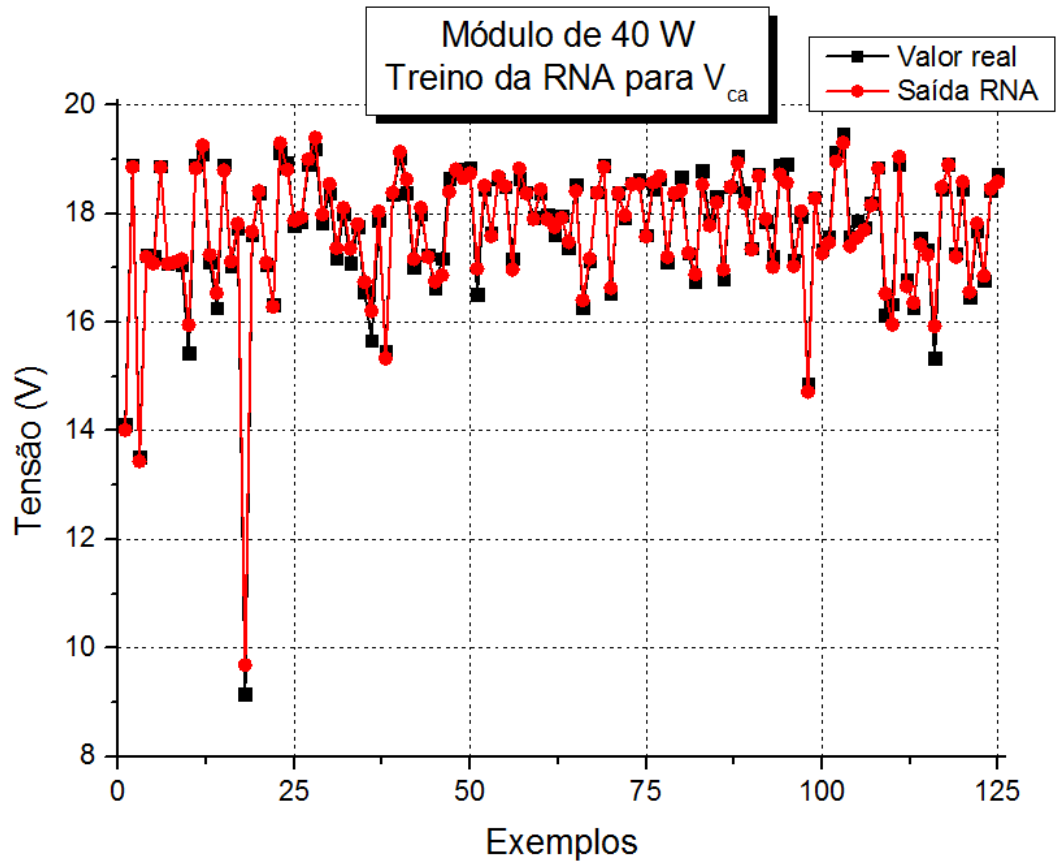
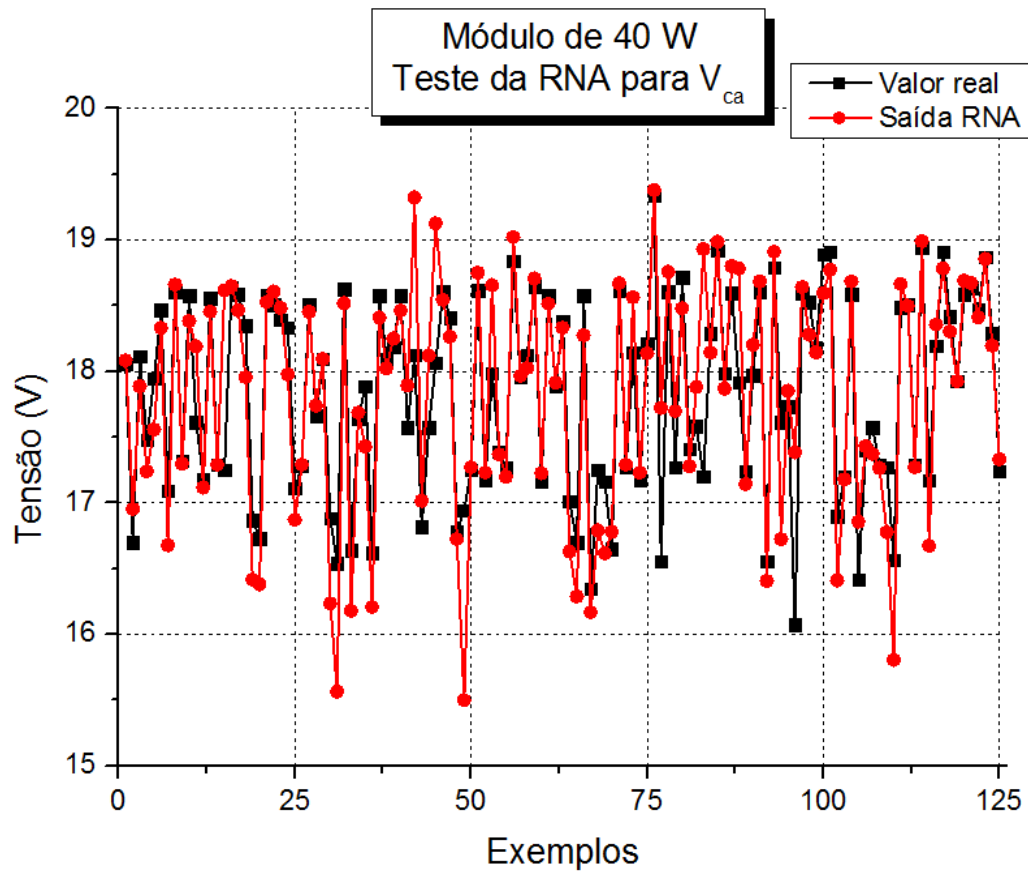


Figura 6.4: Convergências das RNAs para os parâmetros dos módulos de 40 W

Após o treinamento das RNAs foi apresentado a elas o conjunto de dados reservados para os testes das mesmas; em seguida fez-se a plotagem das saídas geradas pelas redes nos treinamentos e testes com seus respectivos dados reais (*targets*) como mostram as Figuras de 6.5 a 6.9. Como visto no capítulo 4, os módulos de 40 W fabricados a mais de quinze anos apresentaram comportamento imprevisível quando submetidos às condições de sombreamento parcial, ora tendo respostas similares para condições distintas, ora respostas muito distintas para condições similares e ainda assim pode-se observar que as RNAs devidamente configuradas conseguem generalizar este comportamento estranho ao senso comum e se aproximar relativamente bem das respostas esperadas. A rede que apresentou menor desempenho foi para encontrar a corrente no ponto de potência máxima (I_{ppm}).



(a)



(b)

Figura 6.5: (a) Treino da RNA e (b) Teste da RNA para V_{ca} do módulo da ASE–Américas, Inc.

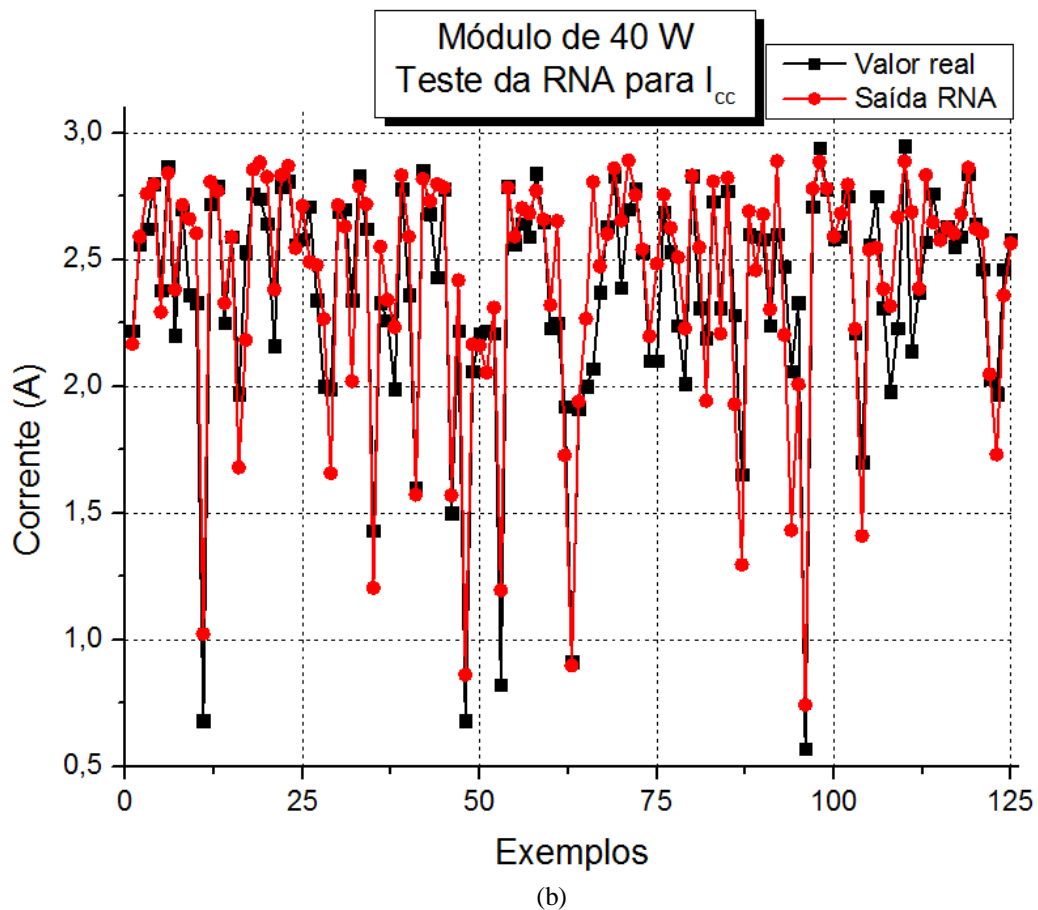
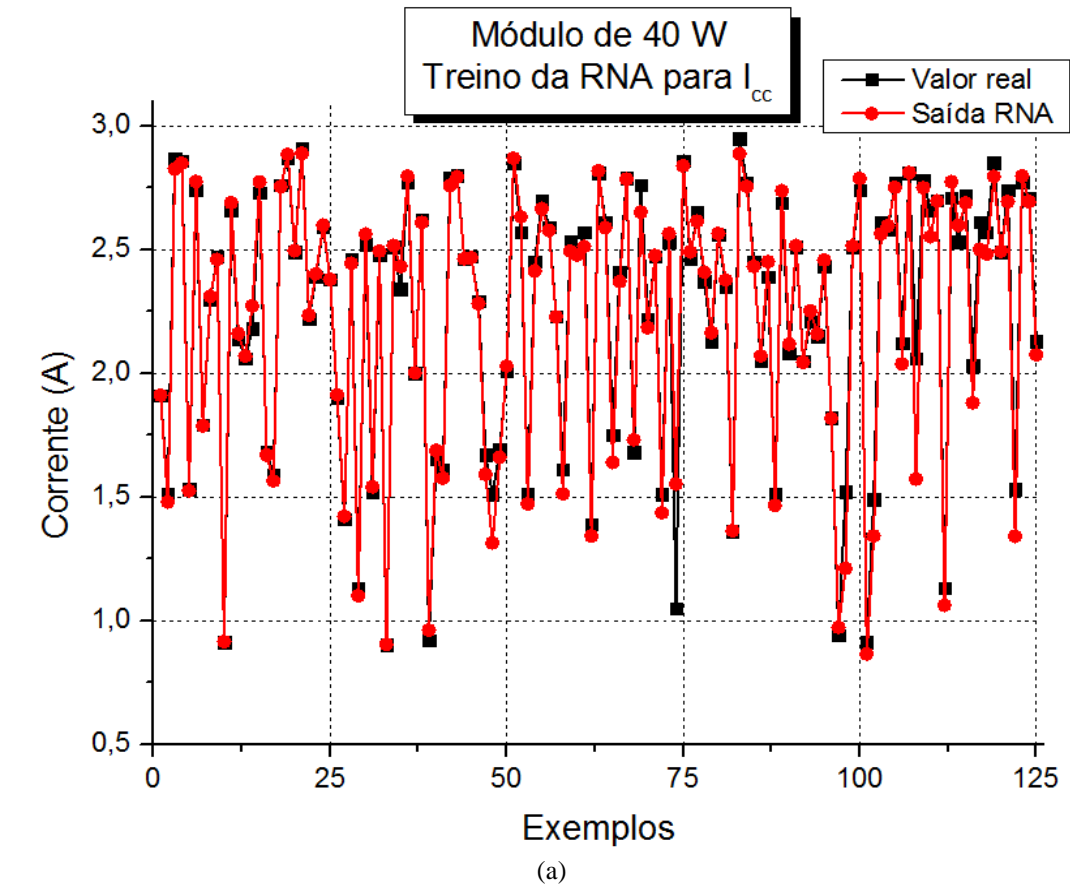


Figura 6.6: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{cc} do módulo da ASE-Américas, Inc.

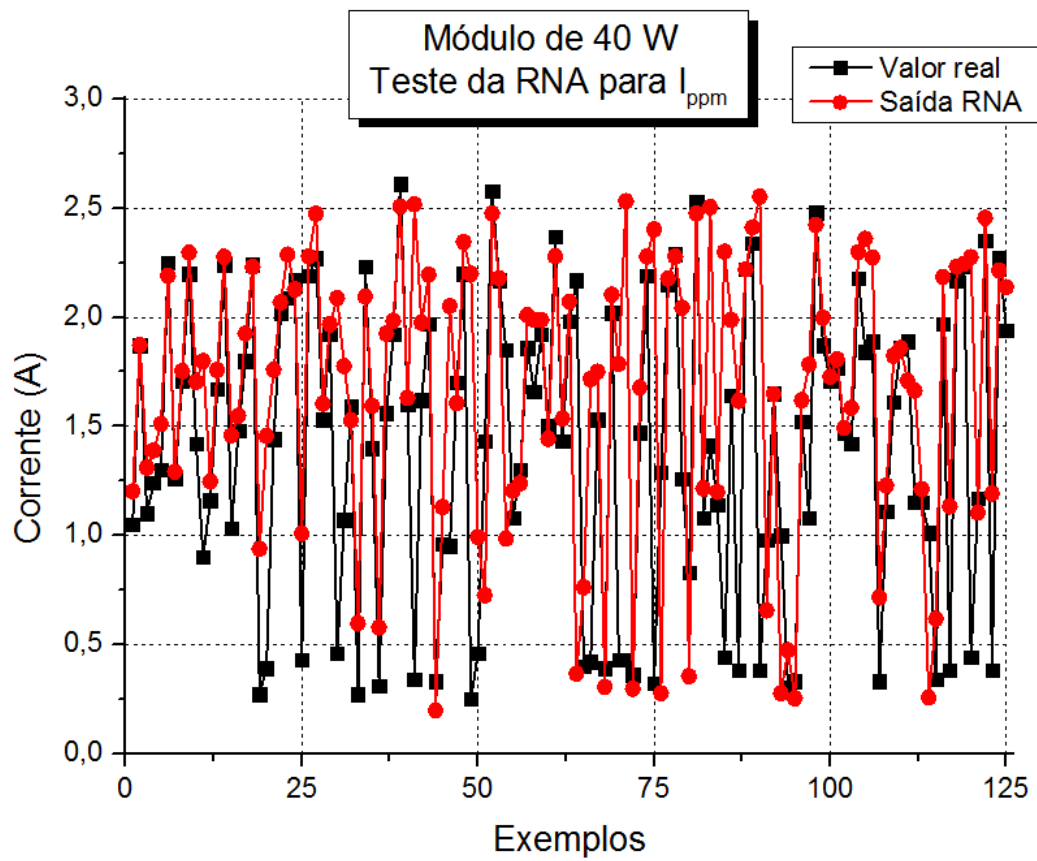
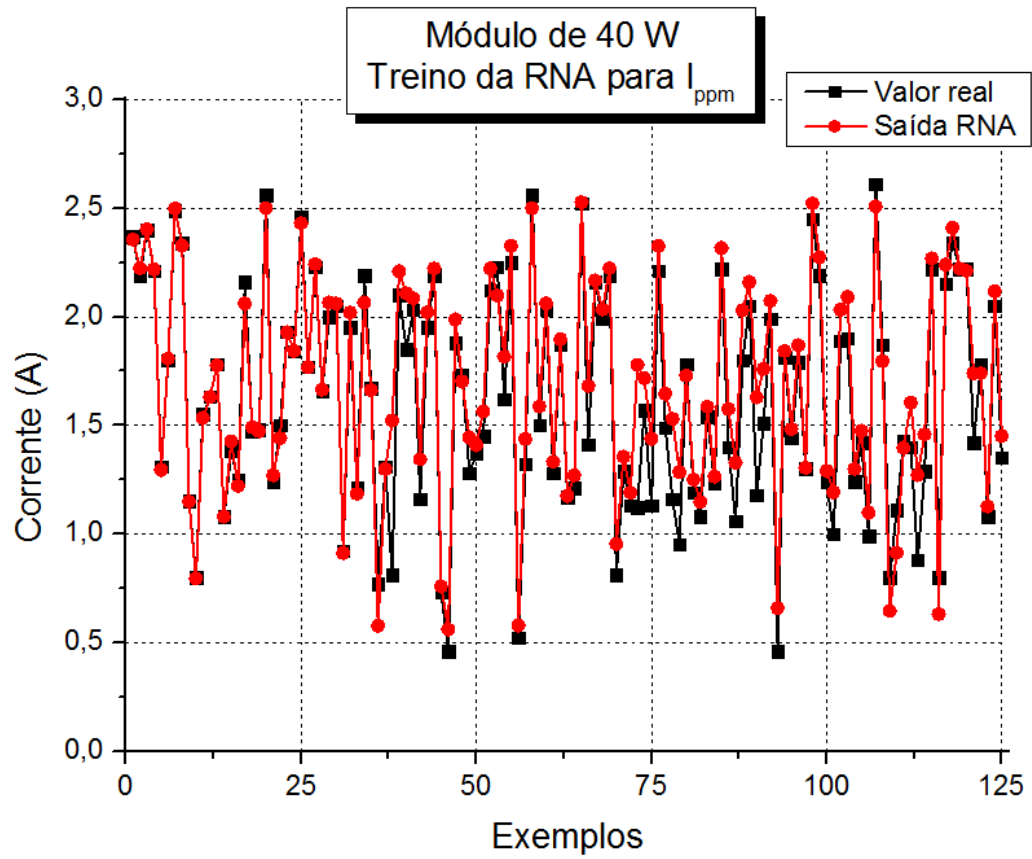
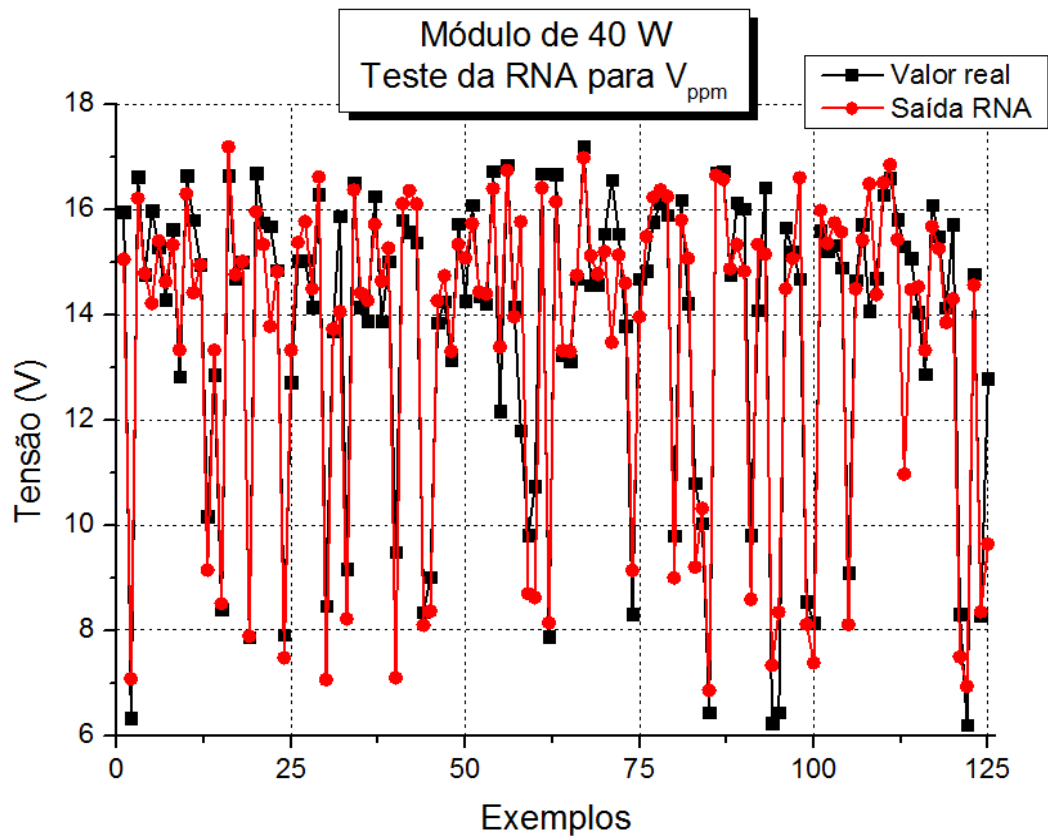
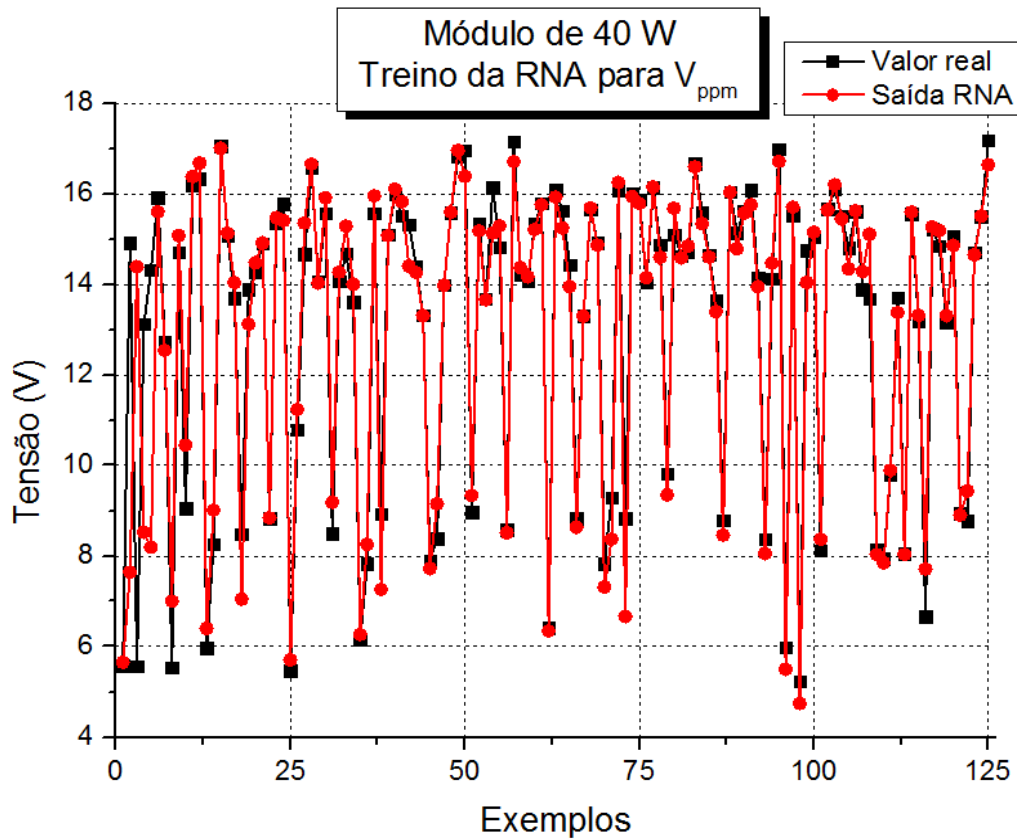


Figura 6.7: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{ppm} do módulo da ASE-Américas, Inc.

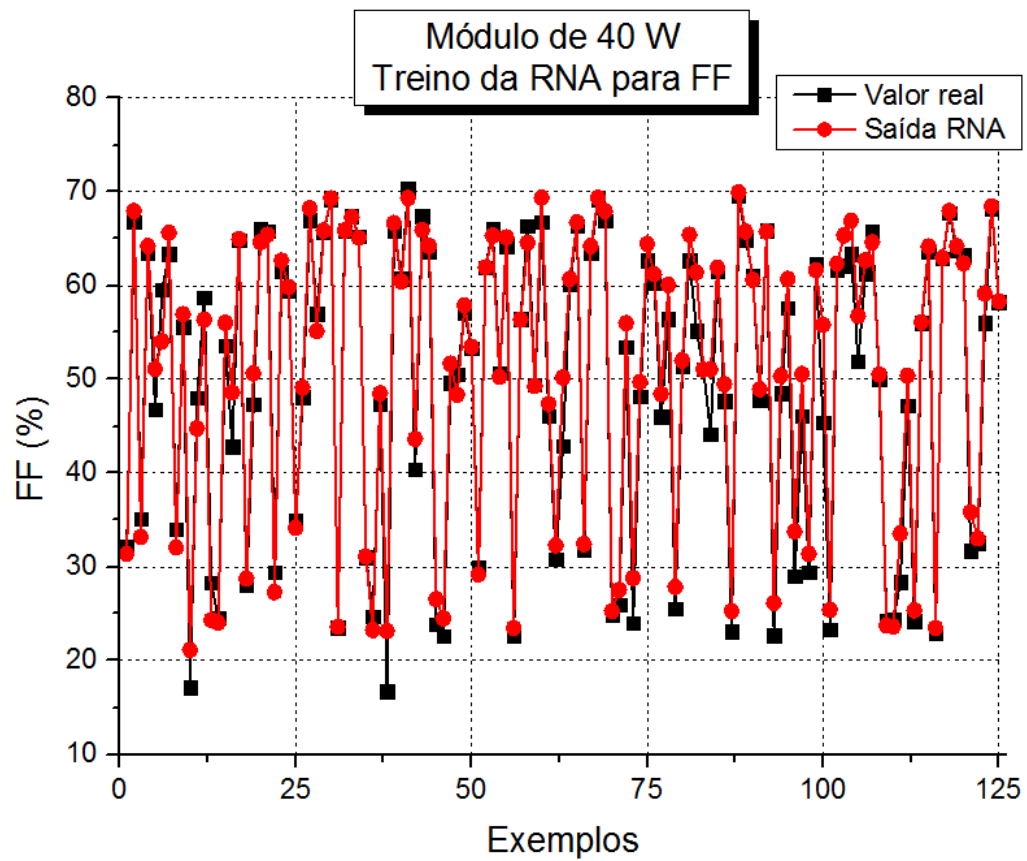


(a)

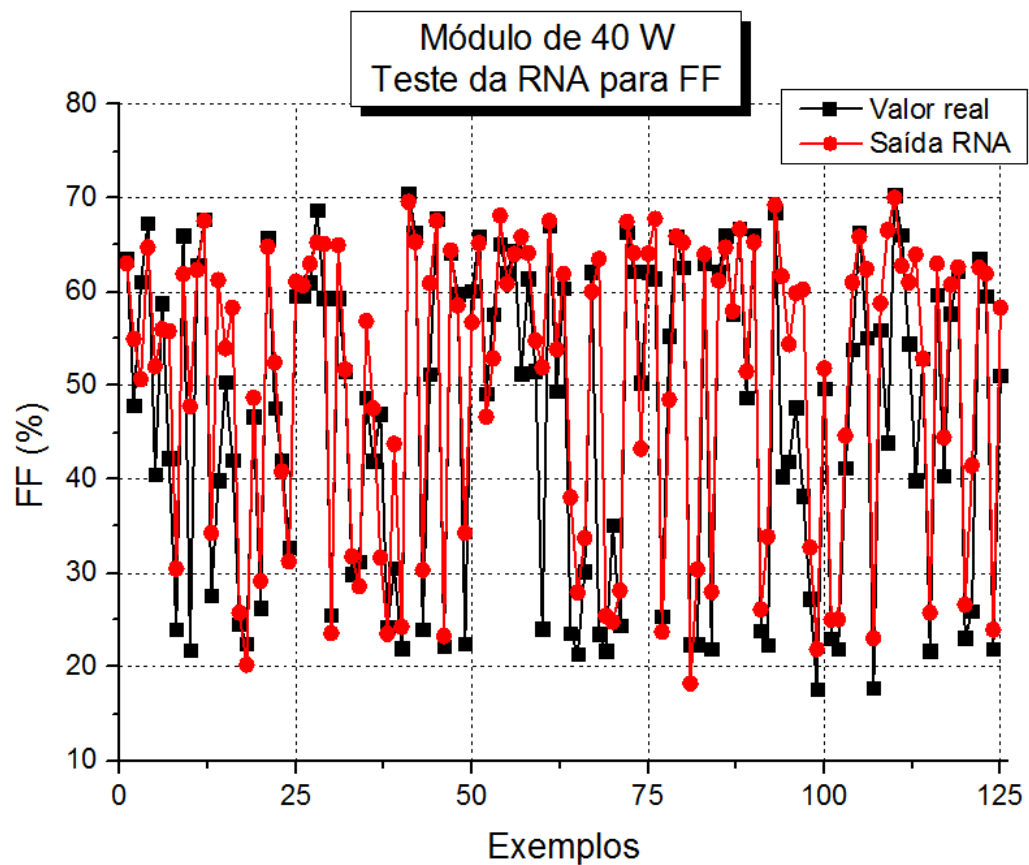


(b)

Figura 6.8: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ppm} do módulo da ASE-Américas, Inc.



(a)

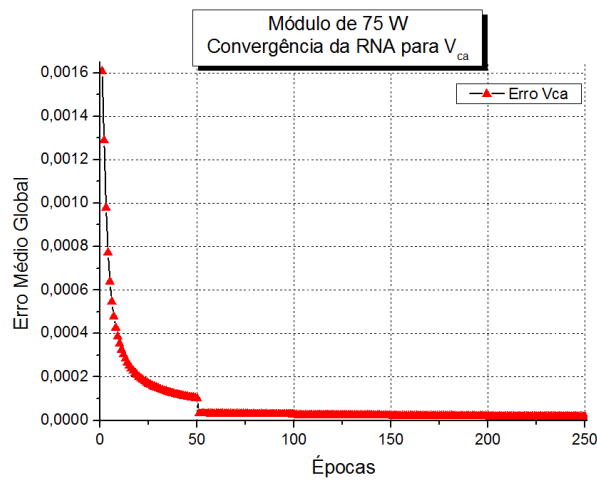


(b)

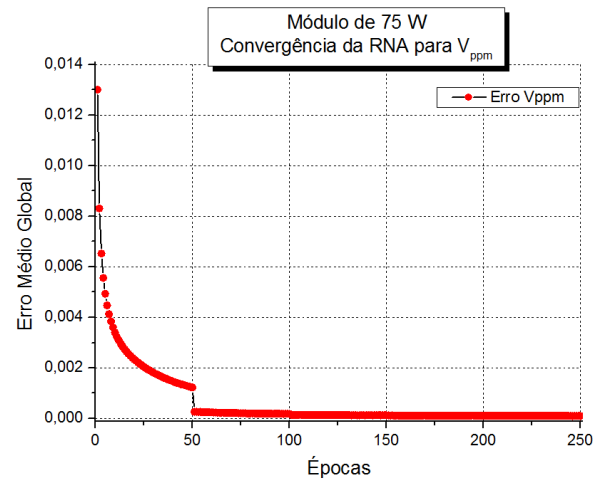
Figura 6.9: (a) Treino e (b) Teste da RNA para FF do módulo da ASE-Américas, Inc.

6.3.2 RNAs aplicadas nos Módulos de 75 W da *SolarWorld*

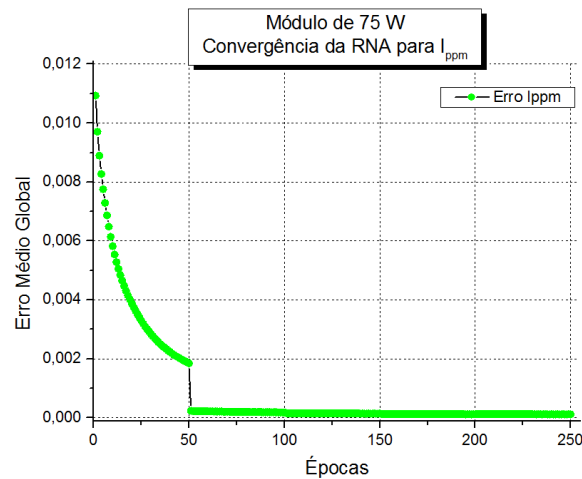
O conjunto de treinamento das RNAs dos módulos de 75 W da *SolarWorld* foi composto de 454 elementos e 214 para o teste de cada RNA. Diferentemente dos módulos de 40 W, as RNAs dos módulos de 75 W (novos) tiveram melhor convergência sem a necessidade de tantas execuções e alterações na topologia como ocorreu nos módulos mais antigos. A Figura 6.10 mostra as convergências das RNAs para os cinco parâmetros do módulo de 75 W e a Tabela 6.2 mostra os erros médios globais da convergência da RNA de cada parâmetro.



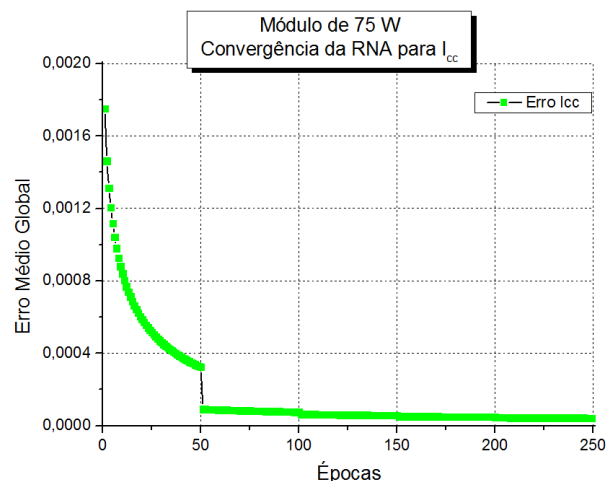
(a) Convergência para V_{ca}



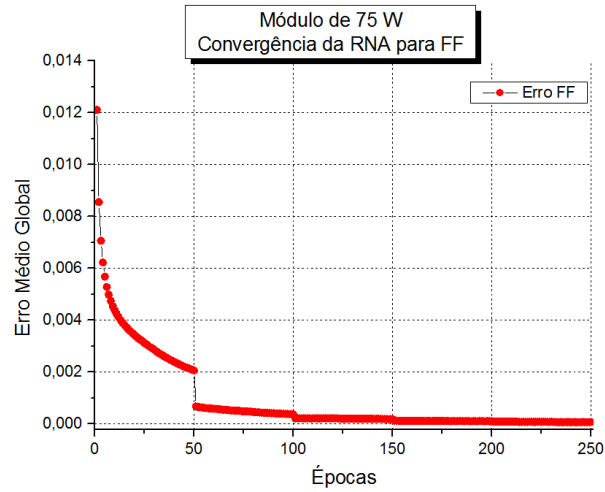
(b) Convergência para V_{ppm}



(c) Convergência para I_{ppm}



(d) Convergência para I_{cc}



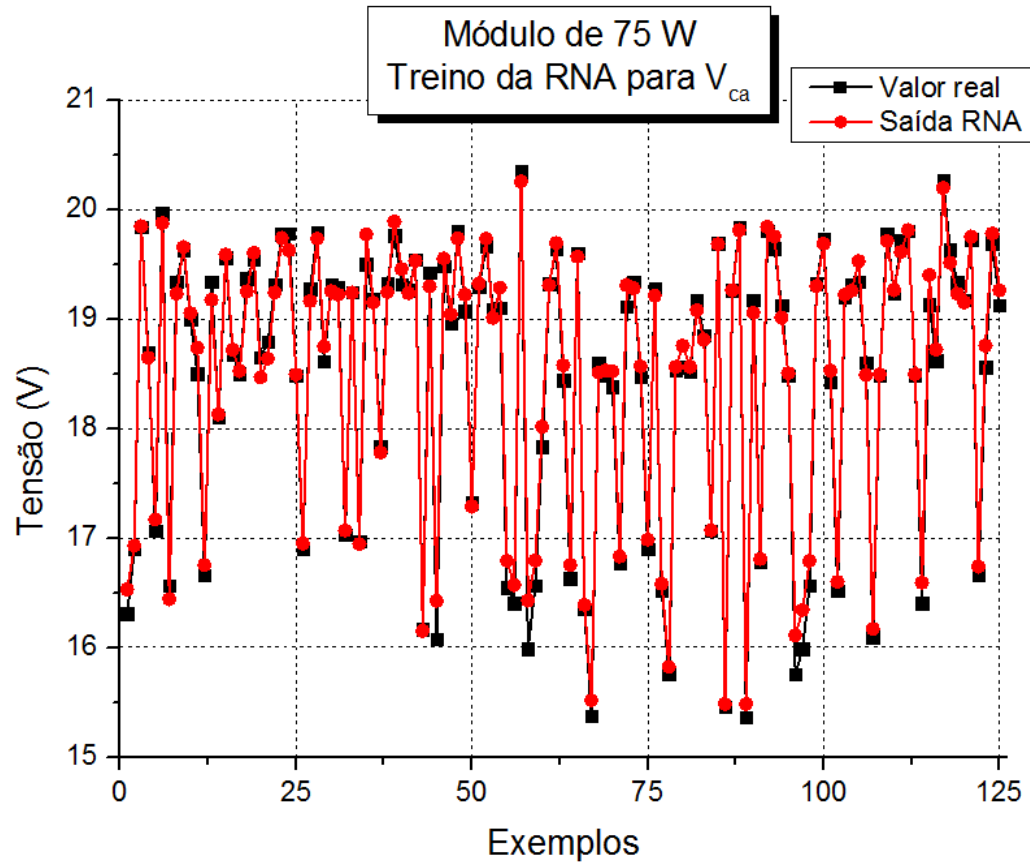
(e) Convergência para FF

Figura 6.10: Convergências das RNAs para os parâmetros dos módulos de 75 W

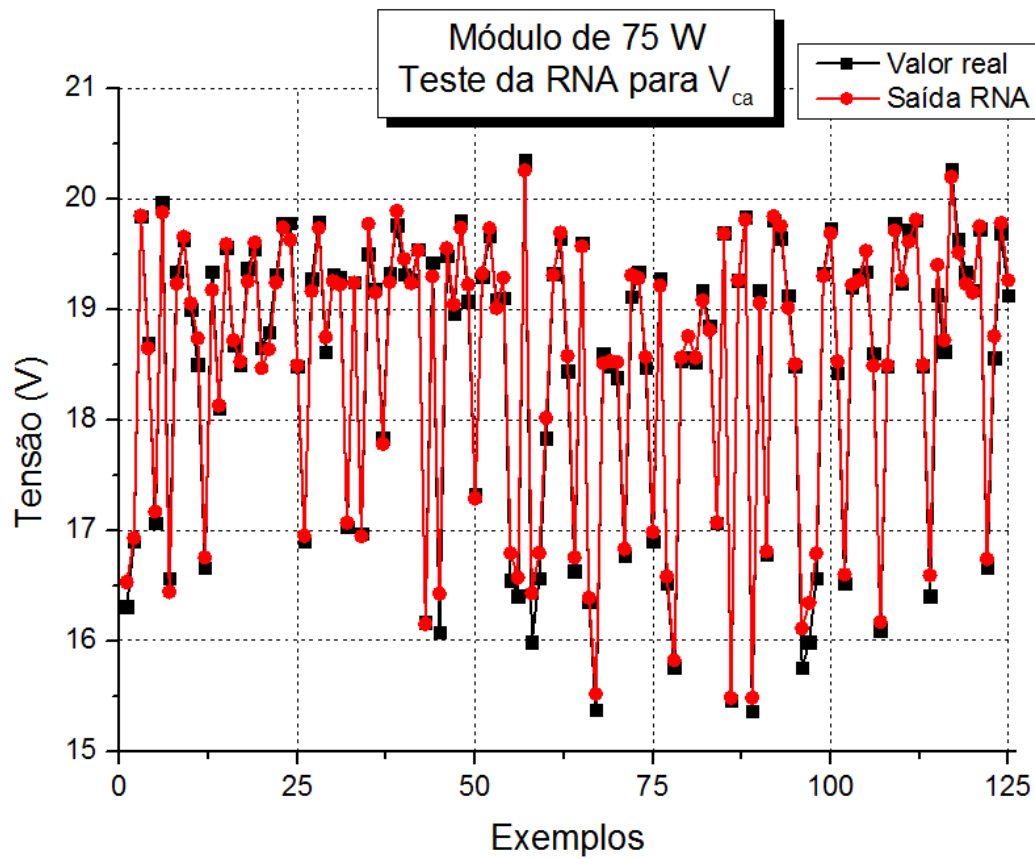
Tabela 6.2: Erro Médio Global das RNAs para os módulos de 75 W.

V_{ca}	I_{cc}	V_{ppm}	I_{ppm}	FF
$1,78 \times 10^{-5}$	$4,17 \times 10^{-5}$	$9,93 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-4}$	$7,23 \times 10^{-5}$

Nas Figuras 6.11 a 6.15 estão os gráficos comparando as saídas dos treinamentos e testes das RNAs com os respectivos valores reais, onde se observa que as RNAs para os módulos de 75 W (novos) tiveram melhor desempenho nos treinamentos e nos testes com os dados desconhecidos.



(a)



(b)

Figura 6.11: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ca} do módulo da *SolarWorld*.

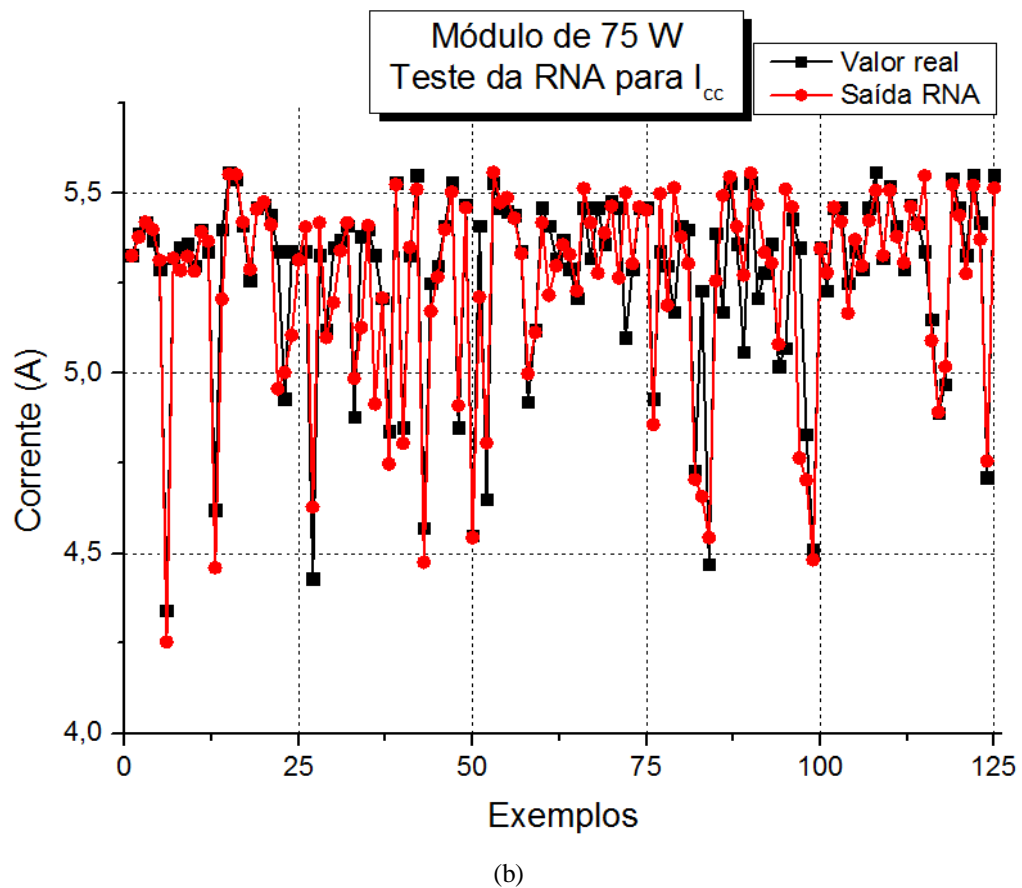
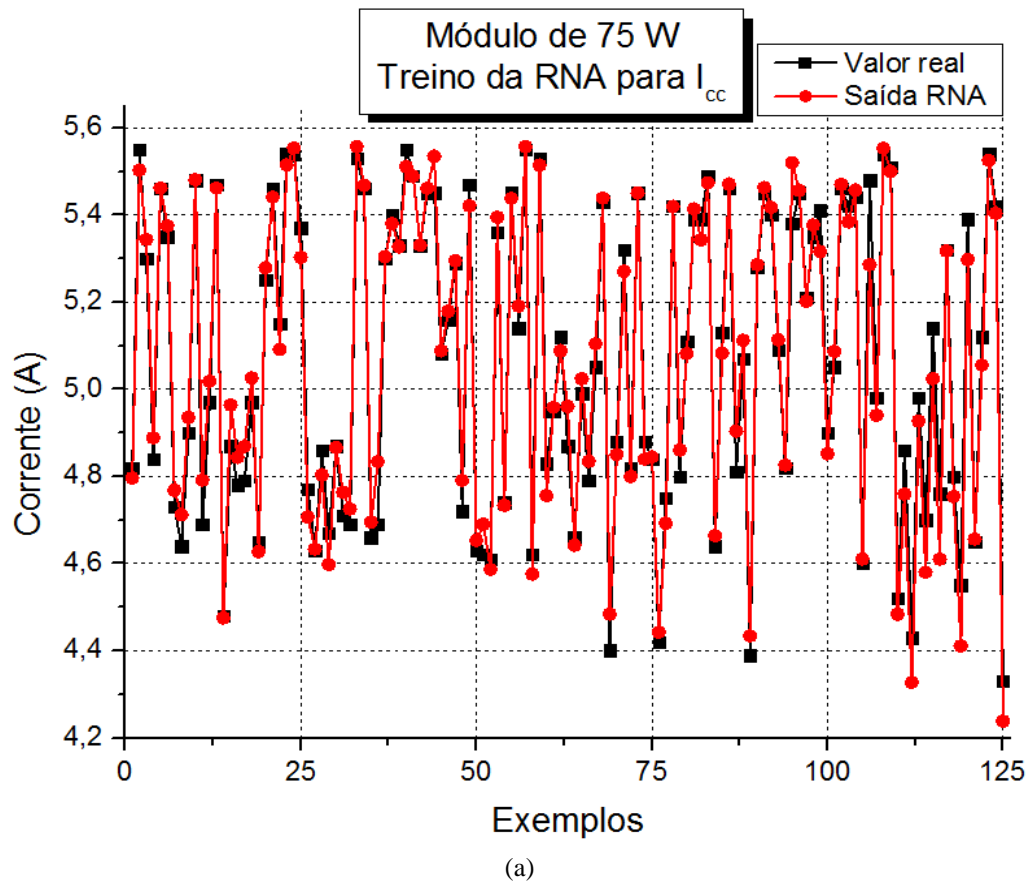


Figura 6.12: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{cc} do módulo da *SolarWorld*.

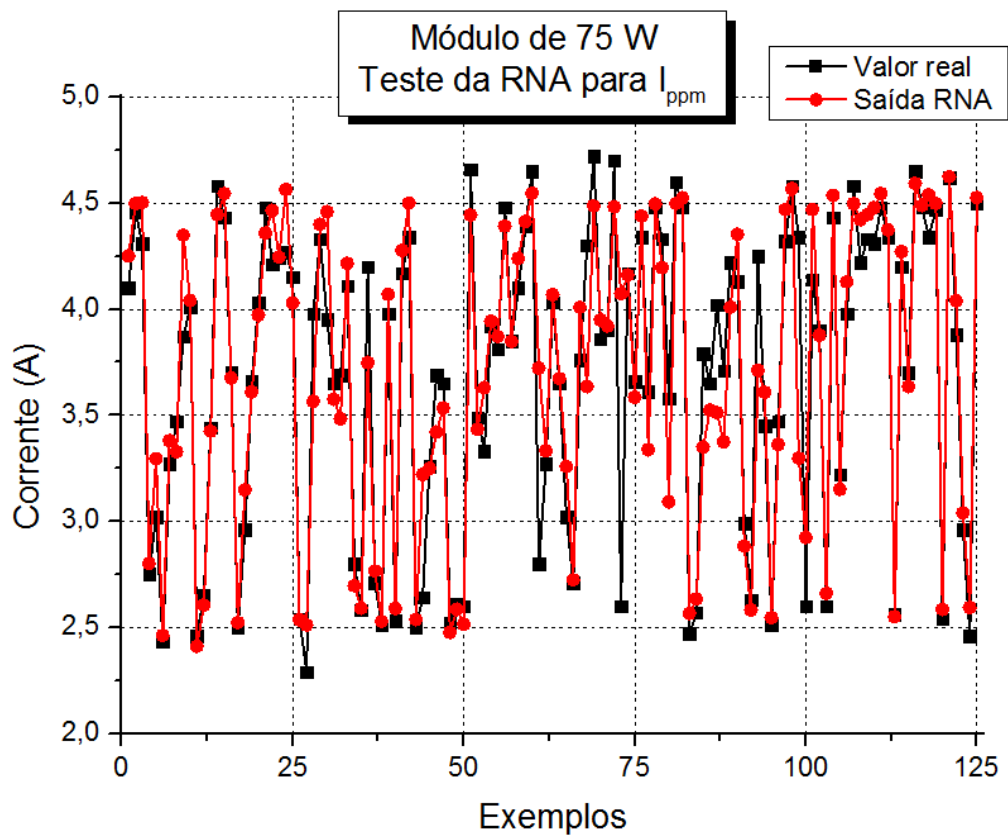
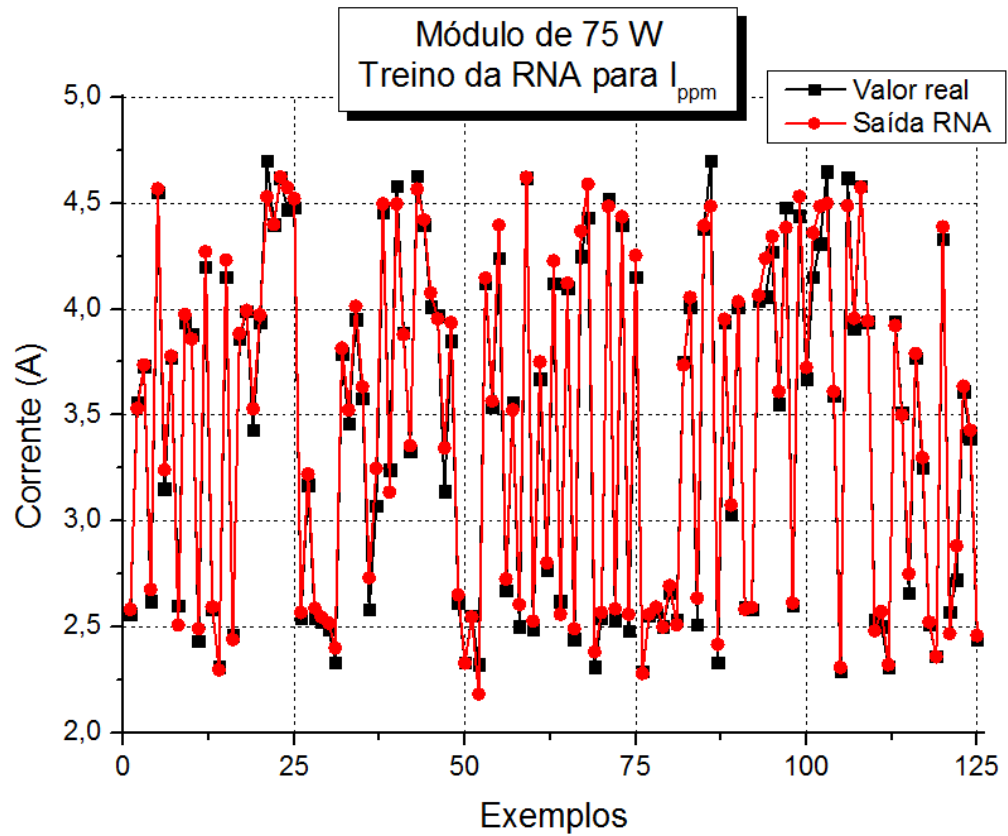
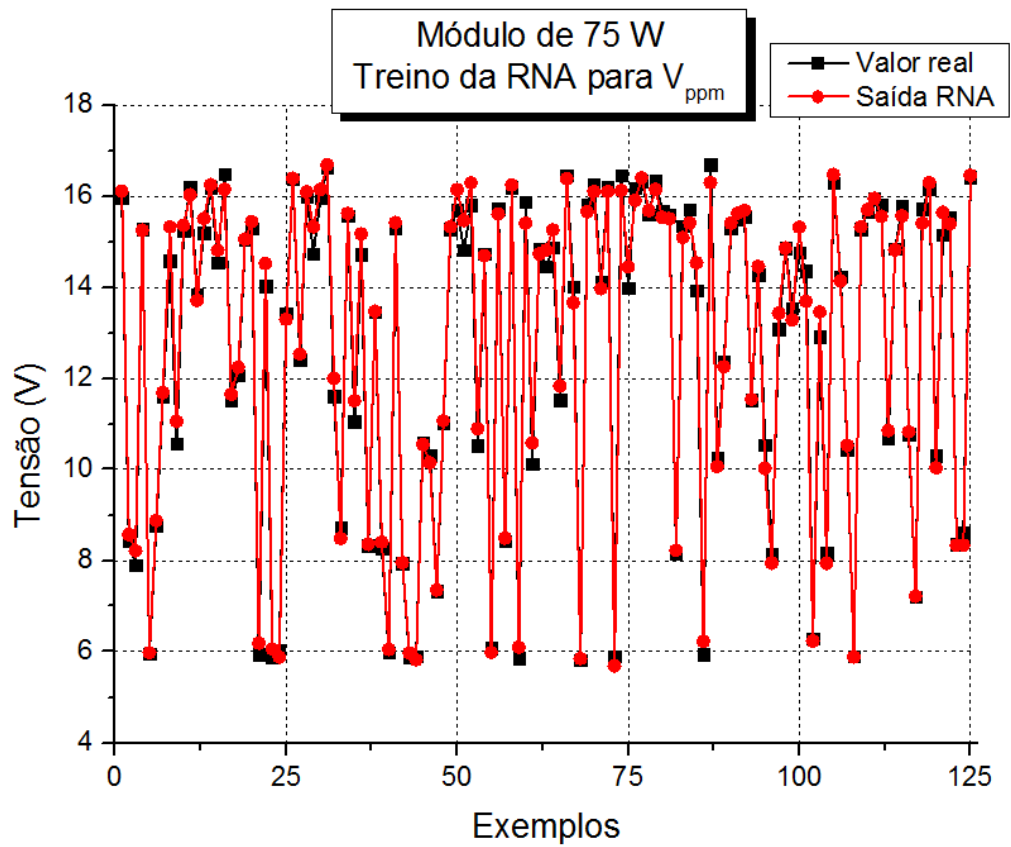
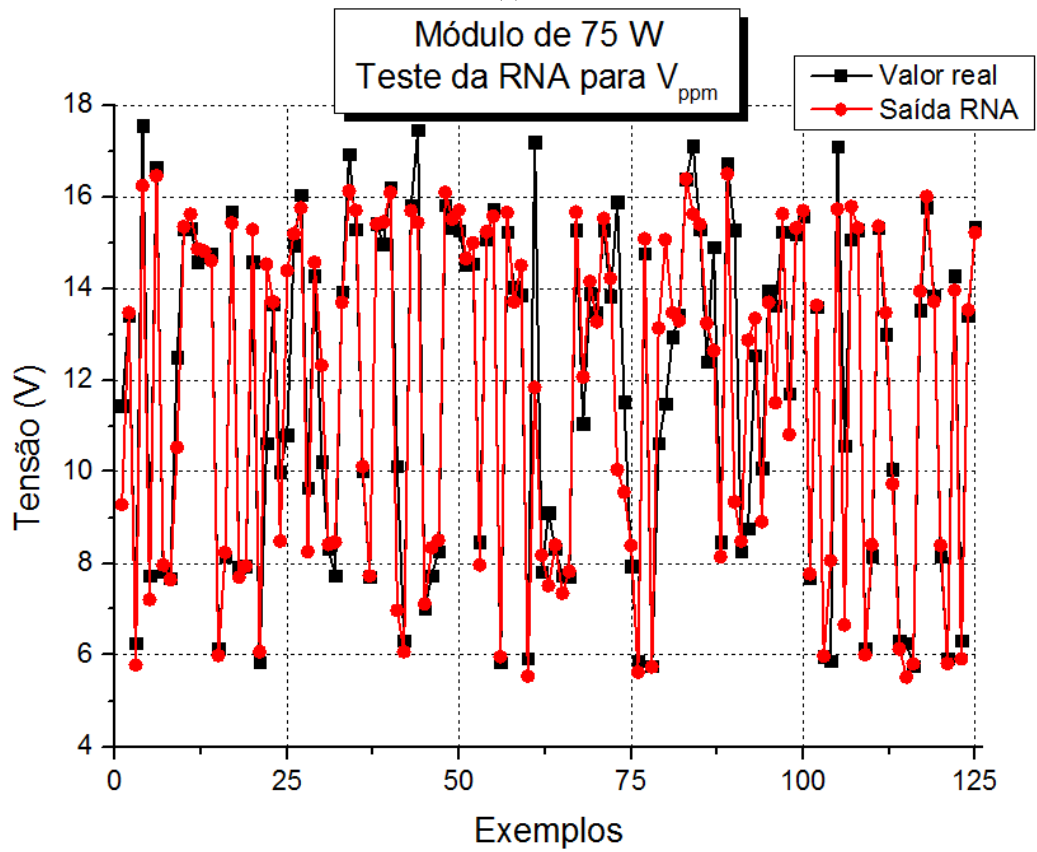


Figura 6.13: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{ppm} do módulo da *SolarWorld*.

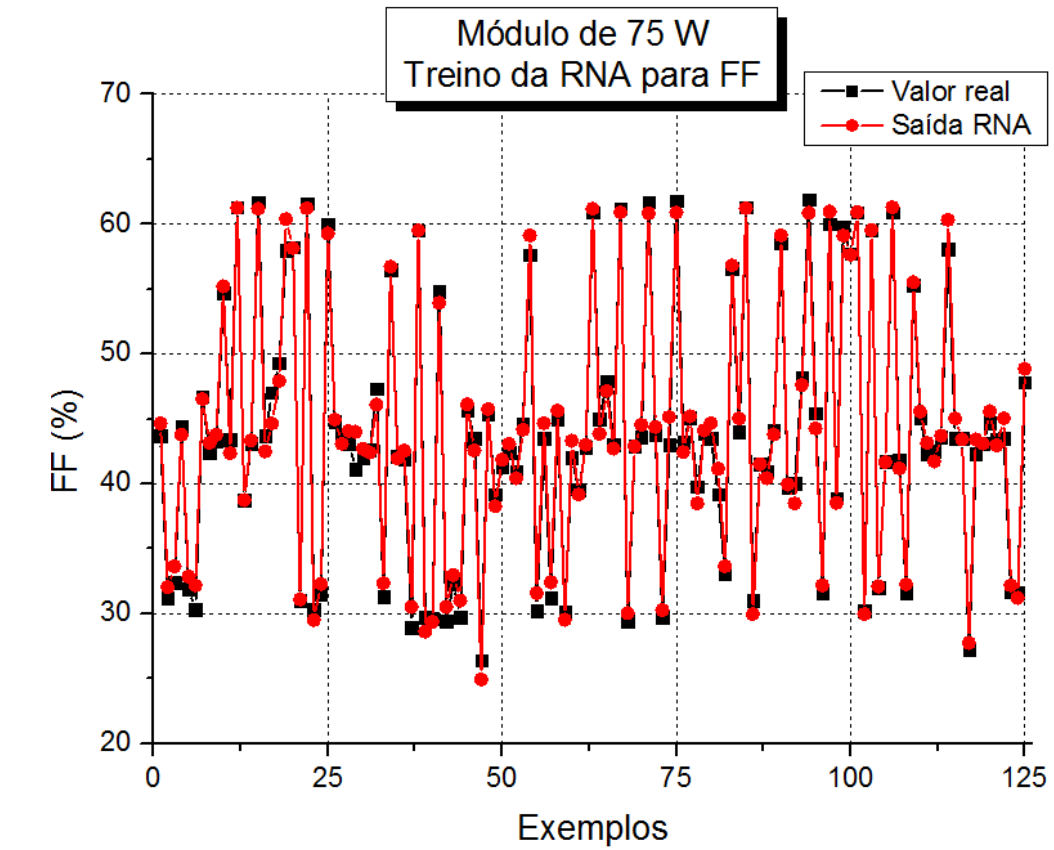


(a)

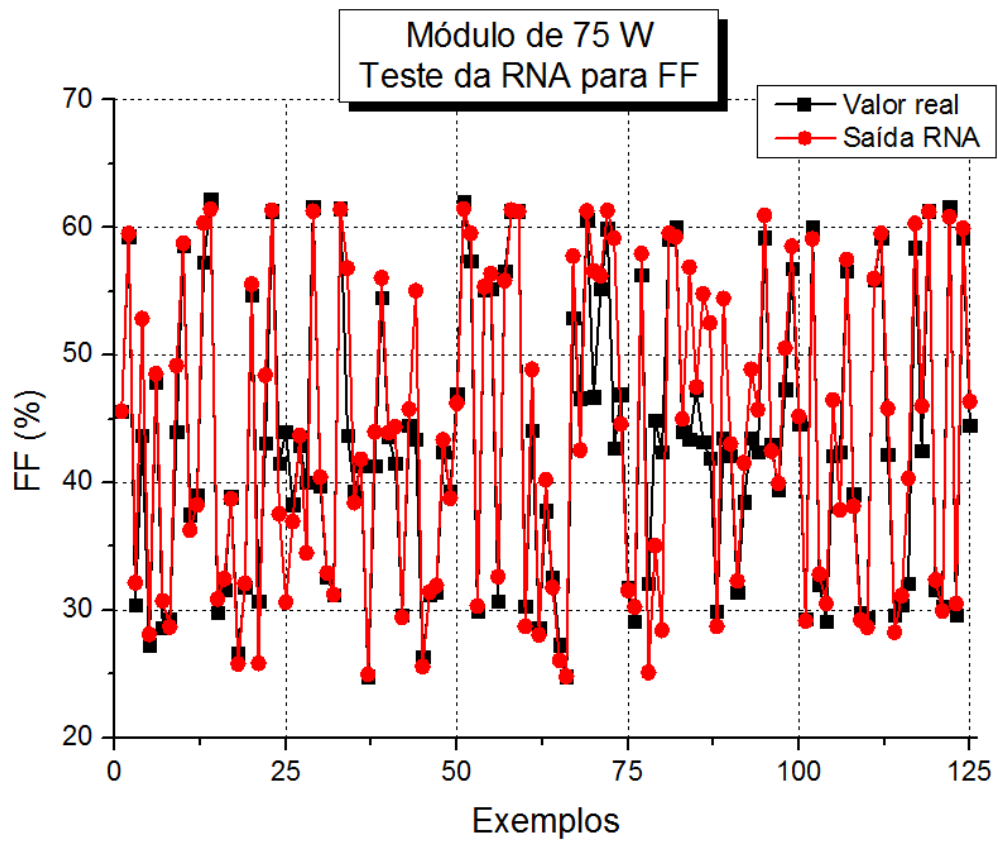


(b)

Figura 6.14: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ppm} do módulo da *SolarWorld*.



(a)



(b)

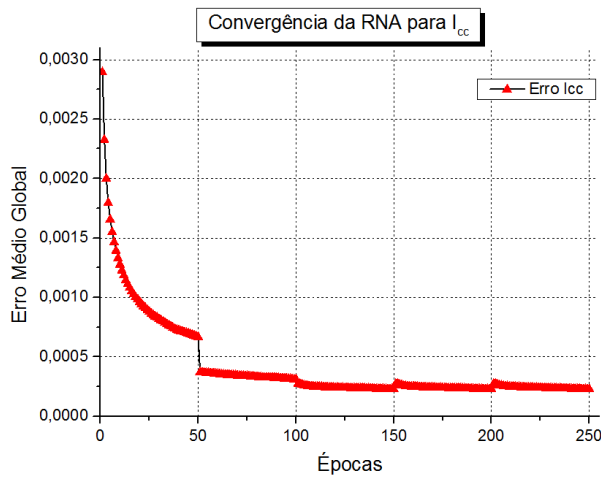
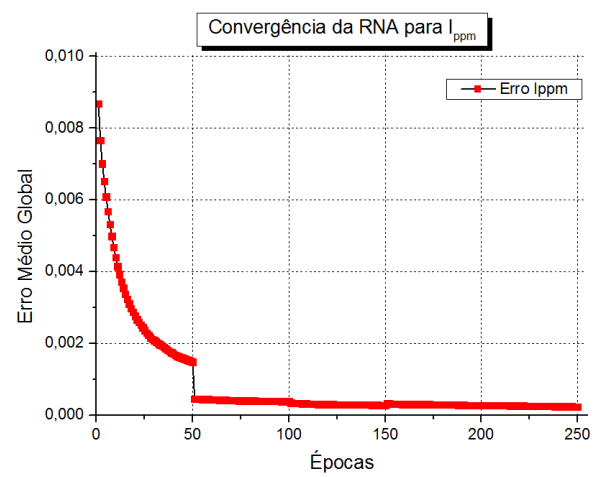
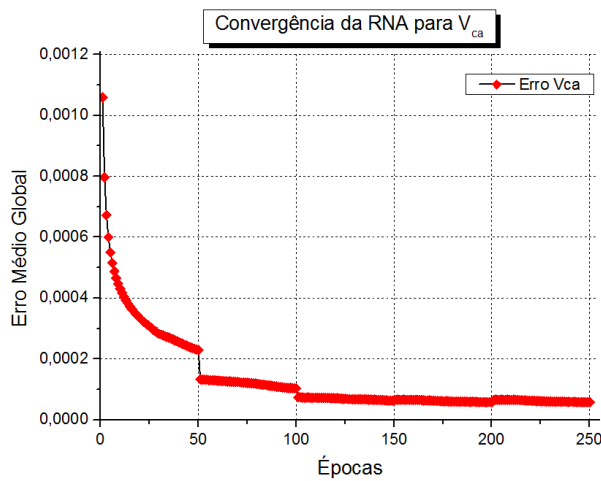
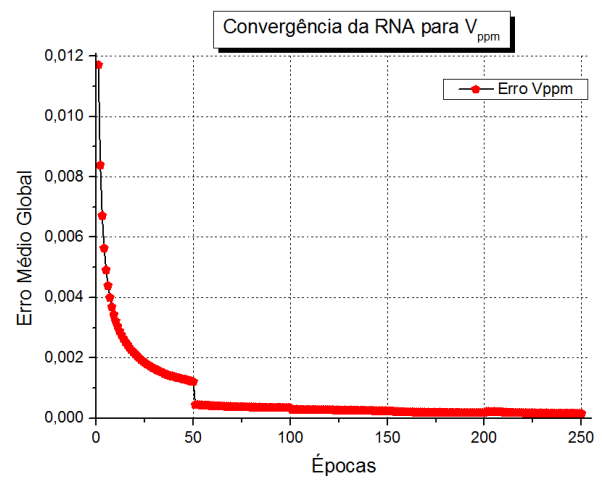
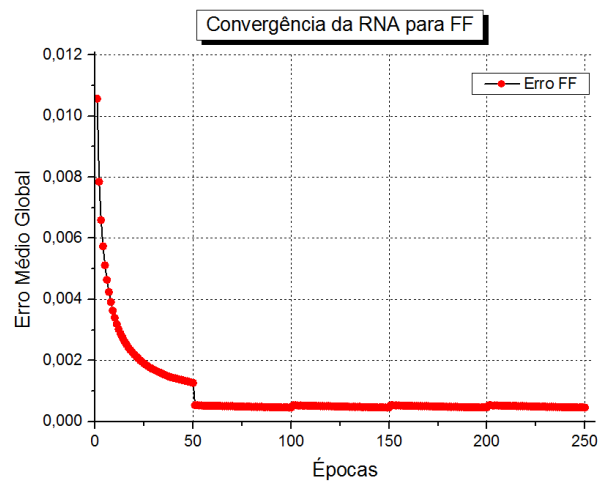
Figura 6.15: (a) Treino e (b) Teste da RNA para FF do módulo da *SolarWorld*.

6.3.3 RNAs aplicadas nos Módulos de 40 W e 75 W juntos.

Ao reunir as leituras dos módulos da *ASE-Américas* e da *SolarWorld* tem-se um conjunto de 1564 elementos separados em 1053 para treinamento e 511 para teste das RNAs. Não seria uma situação normal interligar módulos de potências tão diferentes por conta da diferença entre suas correntes de operação, mas neste caso o propósito foi de gerar um banco de dados mais diversificado do que os gerados pelos sombreamentos parciais em cada módulo, e desta forma testar a capacidade de generalização das RNAs diante de tanta diversidade. Além da diferença de potência, há também a diferença de idade e por consequência de comportamento dos módulos nas situações de sombreamento parcial, pois se depois de alguns anos de uso, um sistema fotovoltaico for ampliado, não serão encontrados módulos da mesma idade ou exatamente com as mesmas condições de funcionamento (desgastes pelo tempo) e então se poderia ter um sistema de monitoramento do sistema a partir do treinamento apropriado de uma RNA para prevenir situações de incompatibilidade de parâmetros. A Tabela 6.3 apresenta os erros médios globais das convergências das RNAs para os dados dos dois modelos de módulos juntos no mesmo conjunto de treinamento e a Figura 6.16 mostra as curvas de convergência da RNA para cada parâmetro.

Tabela 6.3: Erro Médio Global das RNAs para os módulos de 75 W e 40 W juntos.

V_{ca}	I_{cc}	V_{ppm}	I_{ppm}	FF
$5,74 \times 10^{-5}$	$2,26 \times 10^{-4}$	$1,51 \times 10^{-4}$	$2,30 \times 10^{-4}$	$4,57 \times 10^{-4}$

(a) Convergência para I_{cc} (b) Convergência para I_{ppm} (c) Convergência para V_{ca} (d) Convergência para V_{ppm} 

(e) Convergência para FF

Figura 6.16: Convergências das RNAs para os parâmetros dos módulos de 40 W e 75 W juntos.

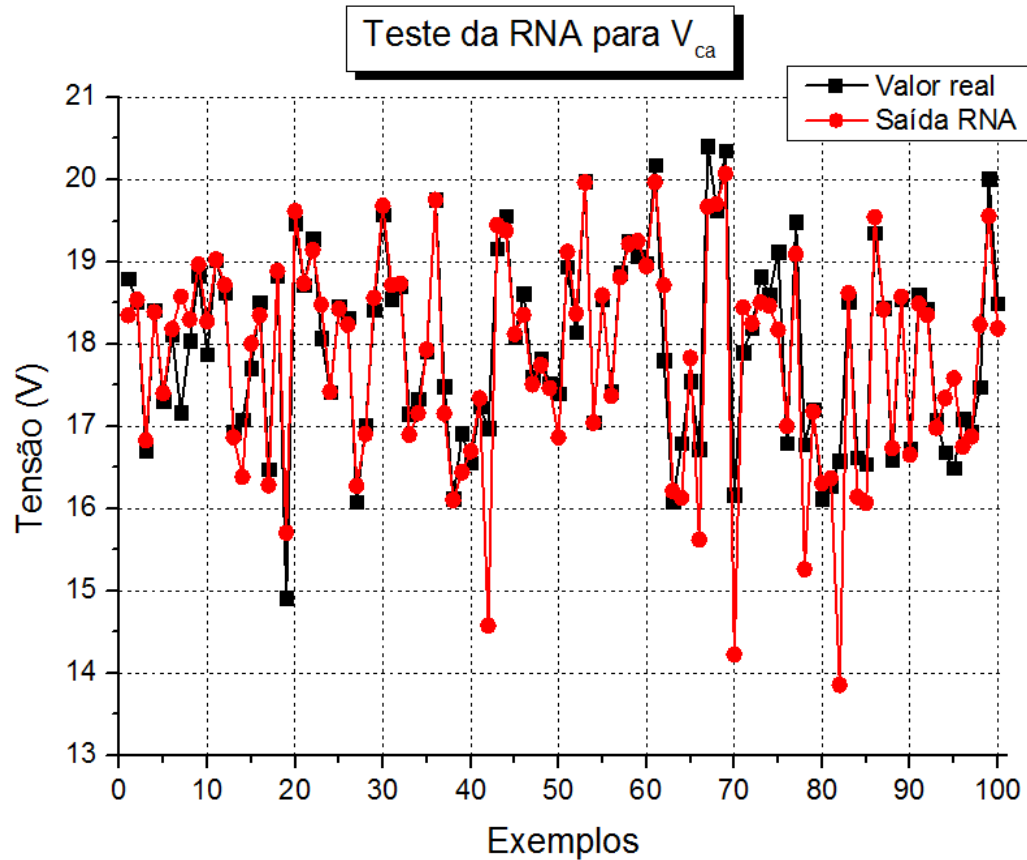
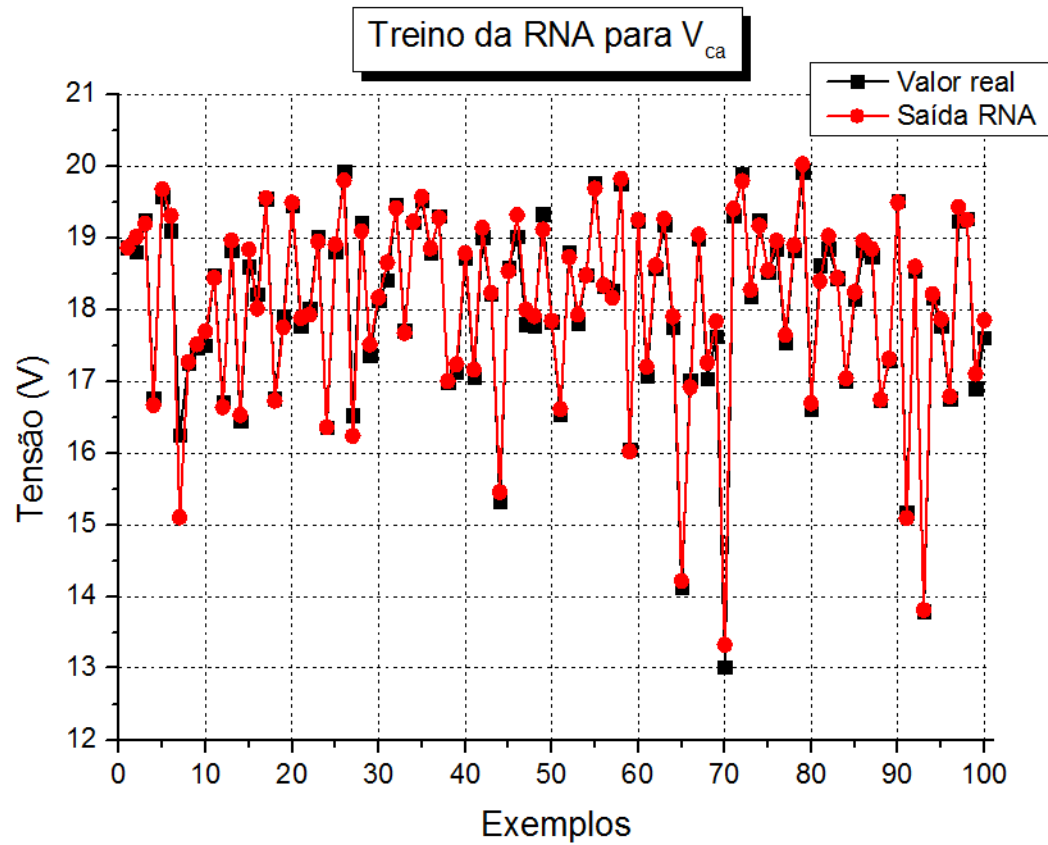
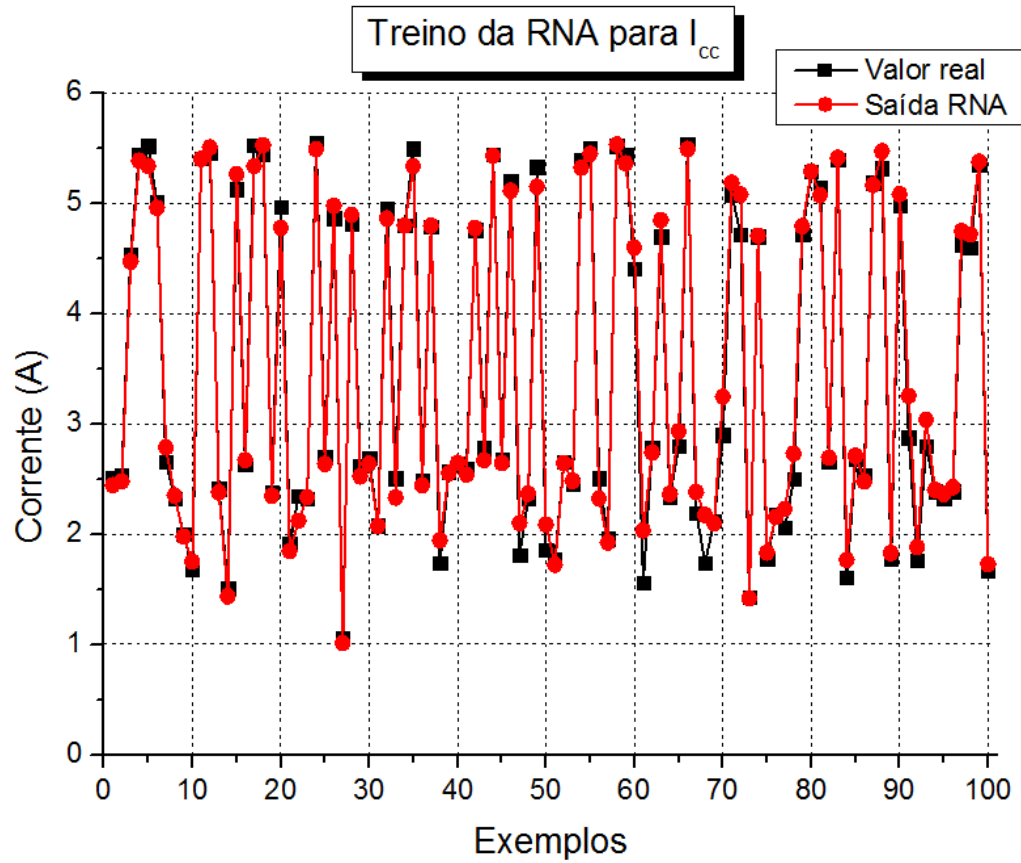
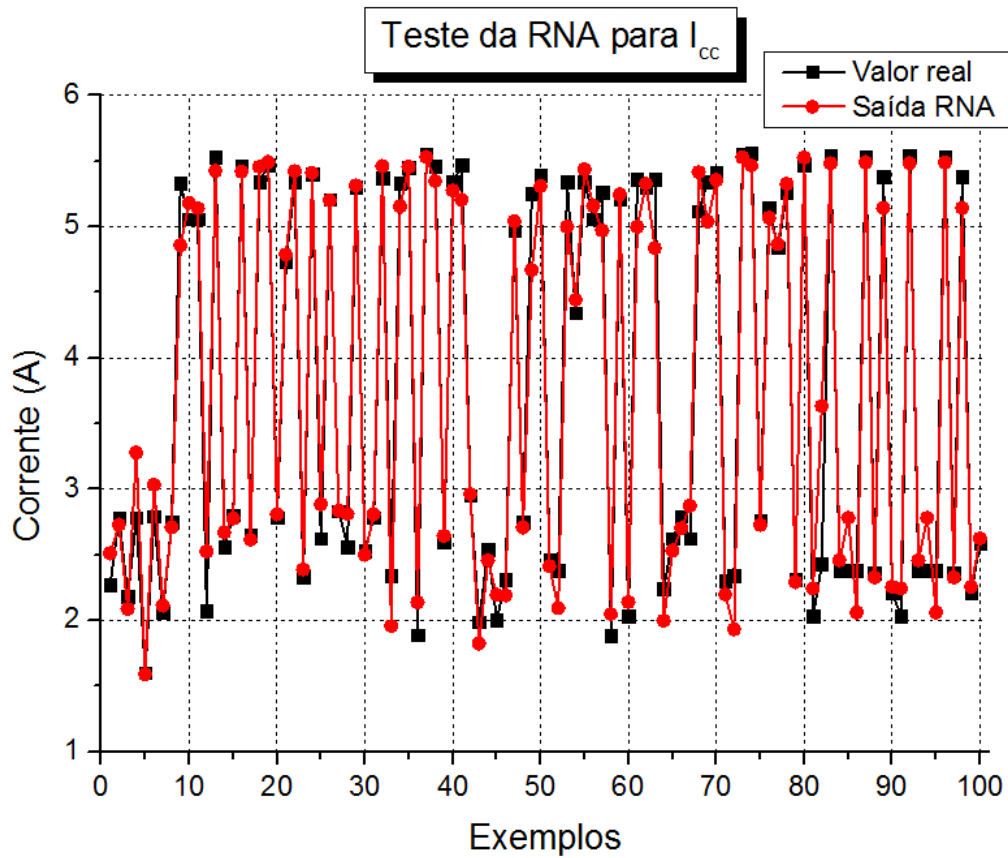


Figura 6.17: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ca} dos módulos de 40 W e 75 W juntos.

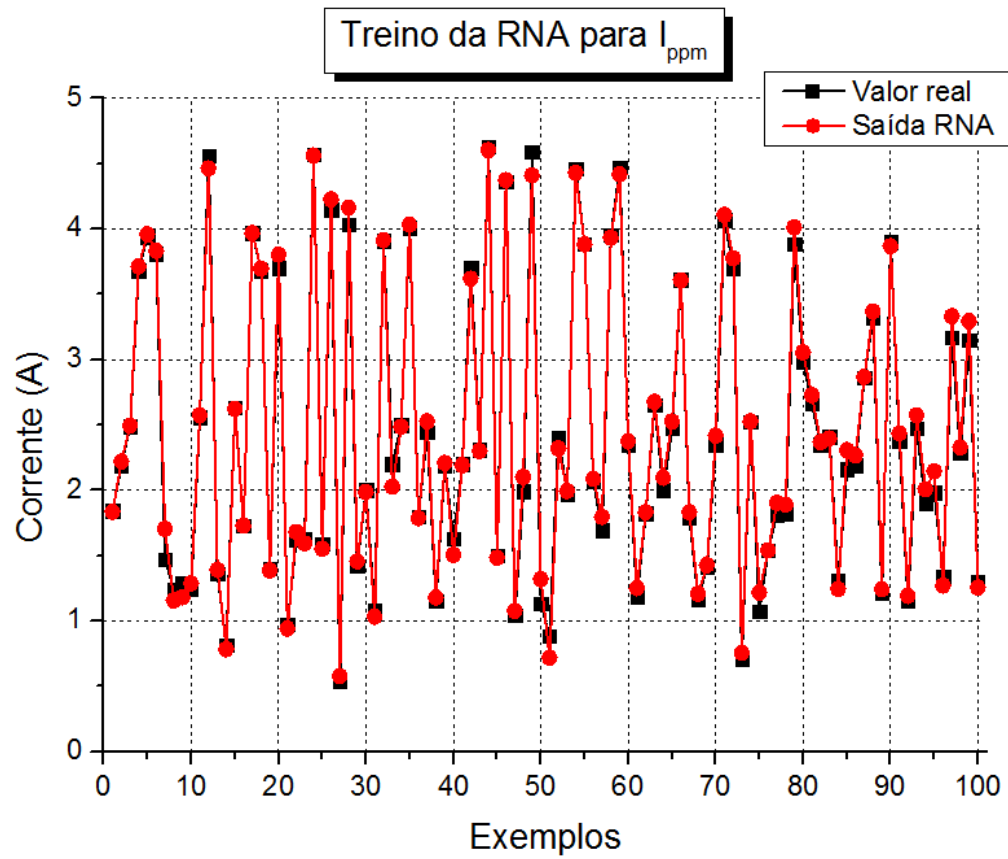


(a)

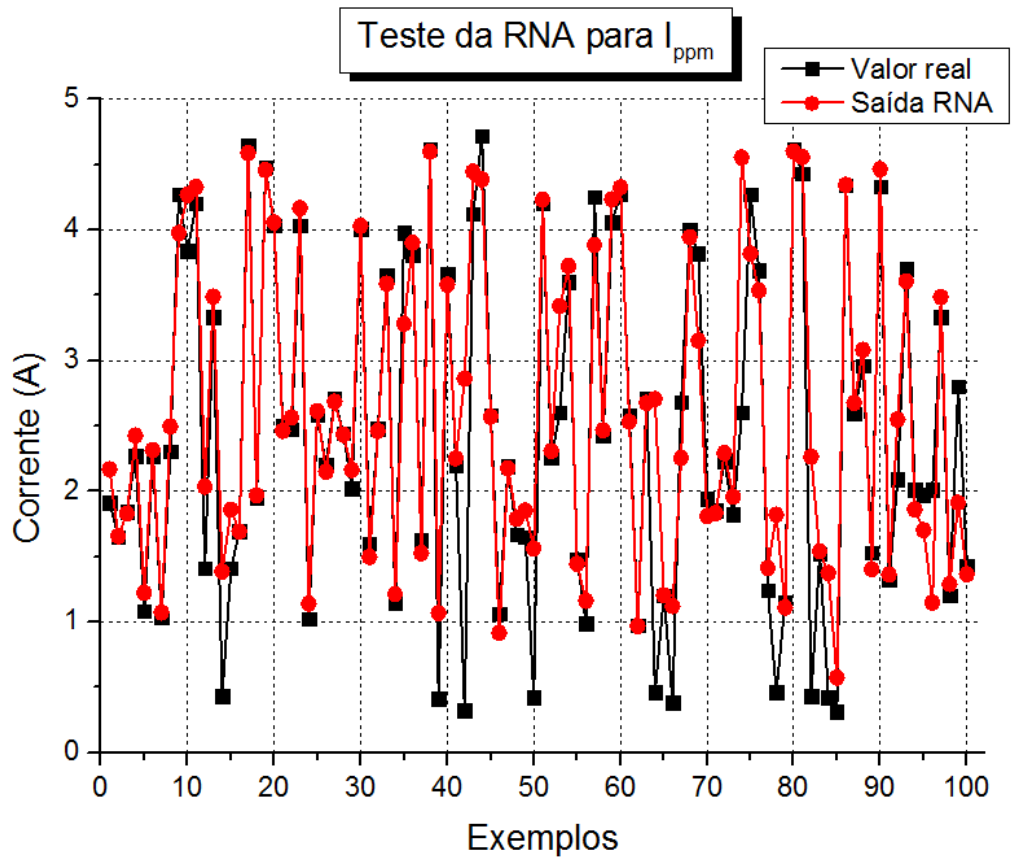


(b)

Figura 6.18: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{cc} dos módulos de 40 W e 75 W juntos.



(a)



(b)

Figura 6.19: (a) Treino e (b) Teste da RNA para I_{ppm} dos módulos de 40 W e 75 W juntos.

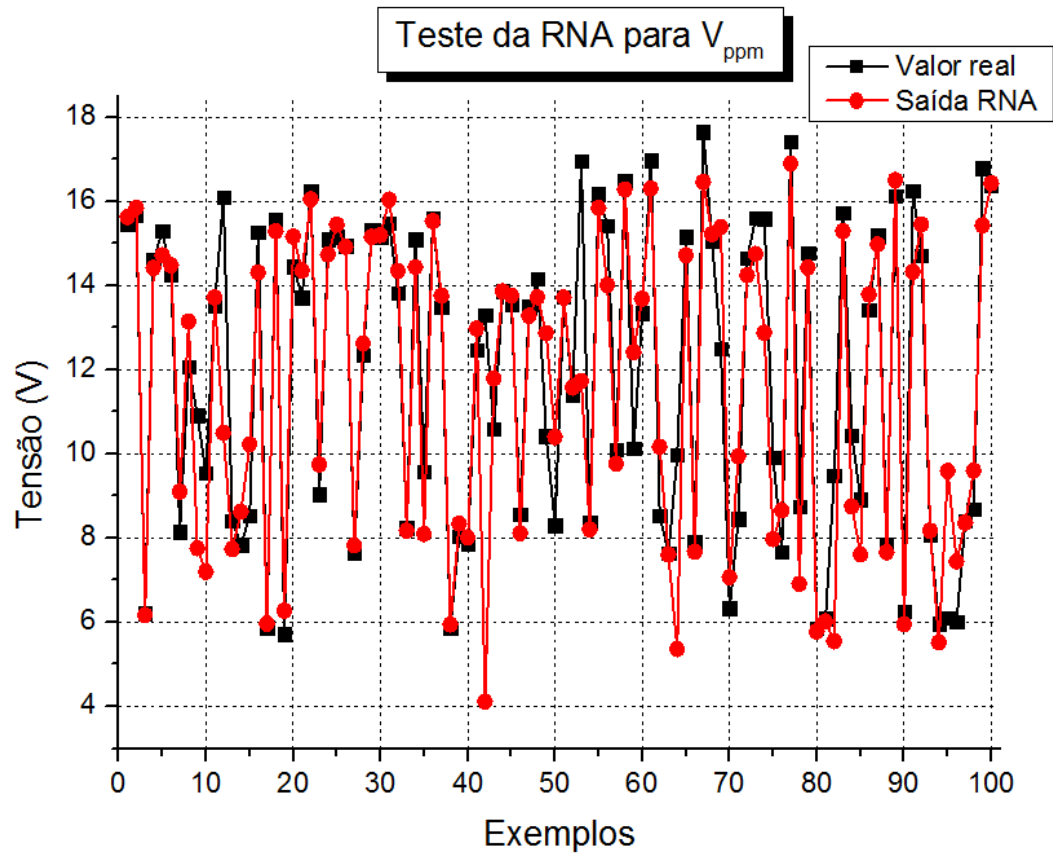
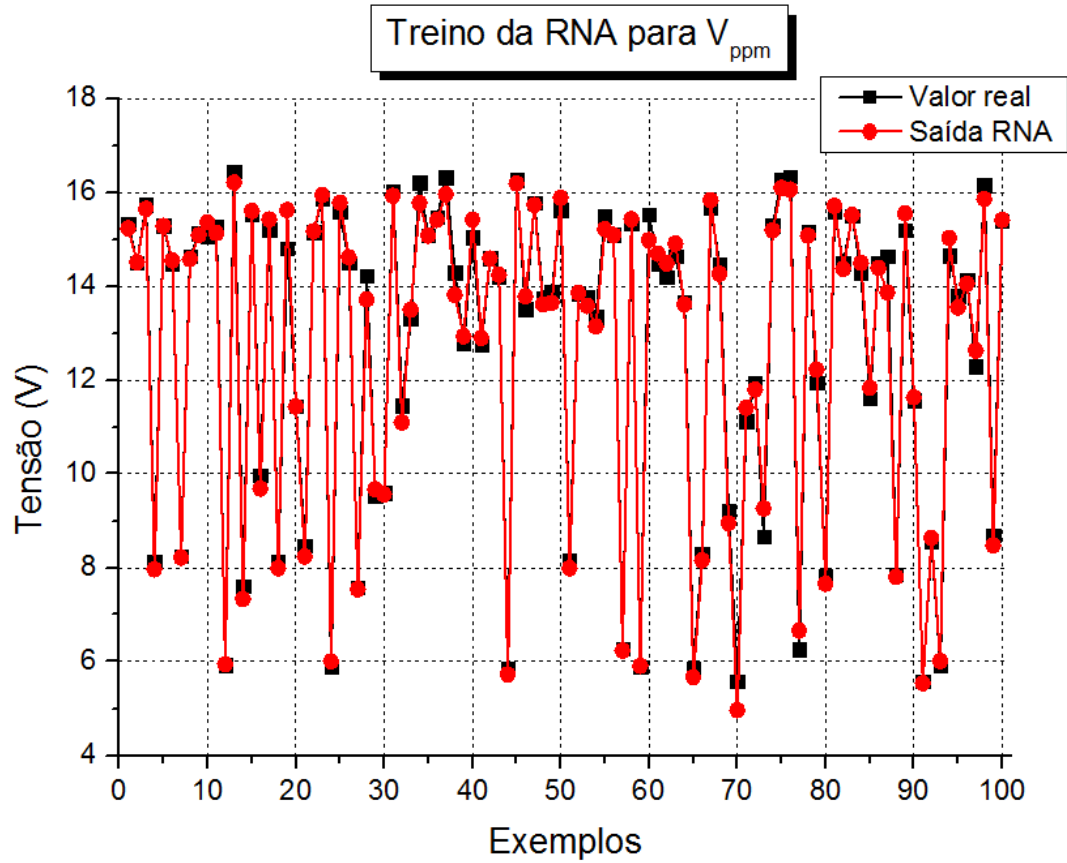
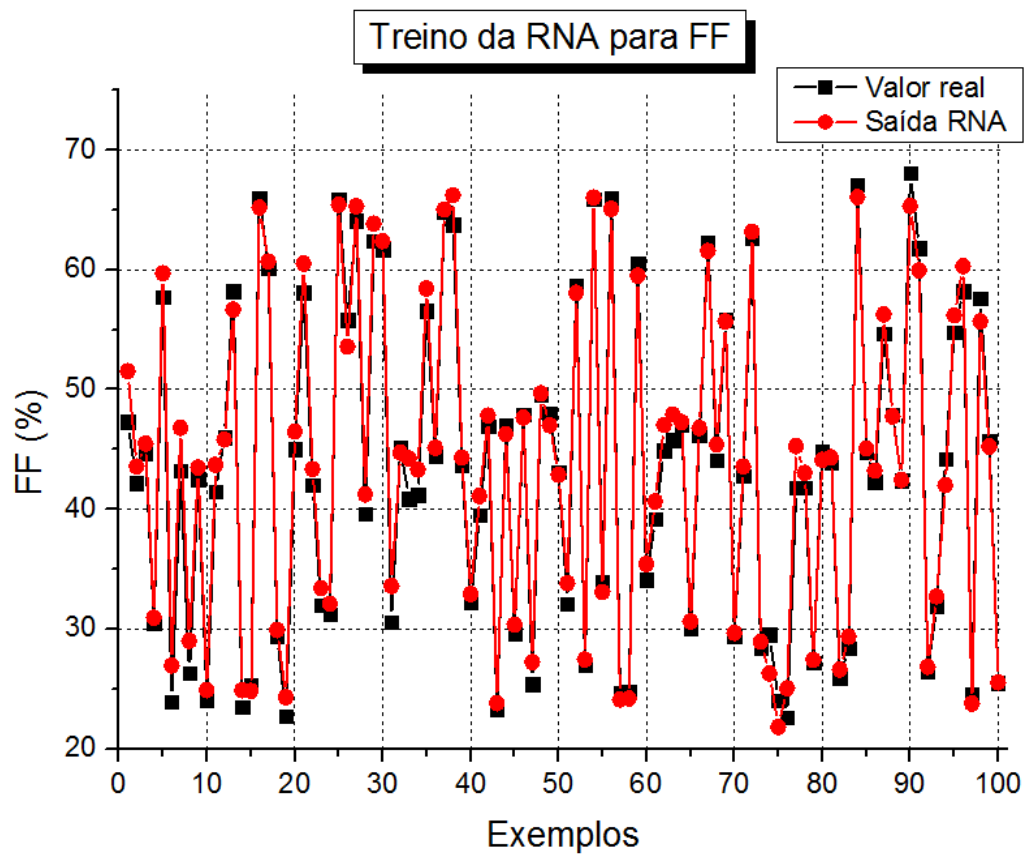
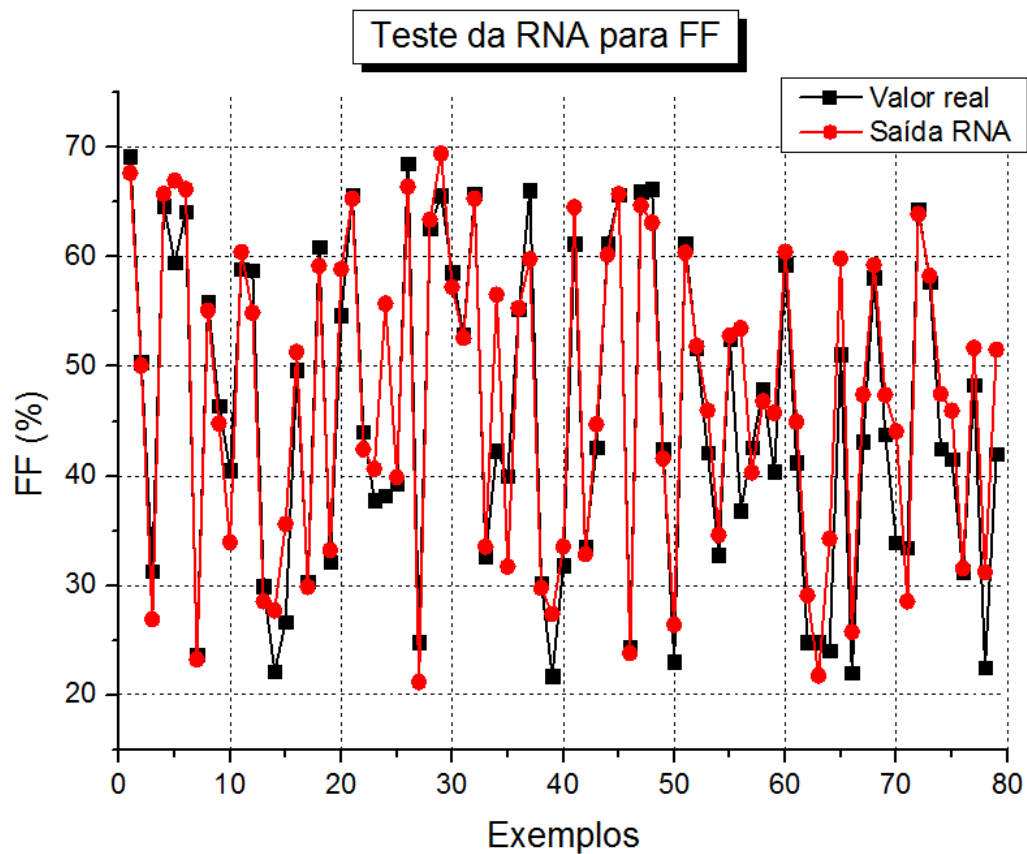


Figura 6.20: (a) Treino e (b) Teste da RNA para V_{ppm} dos módulos de 40 W e 75 W juntos.



(a)



(b)

Figura 6.21: (a) Treino e (b) Teste da RNA para FF dos módulos de 40 W e 75 W juntos.

6.4 Conclusão

O treinamento e teste das RNAs com as leituras dos dois modelos de módulos misturadas tiveram o objetivo de mostrar a grande capacidade de generalização de uma RNA e os resultados mostraram que a diferença de potências, de idade e de comportamento dos módulos diante das situações de sombreamento parcial não impediu o aprendizado de cada uma das RNAs e suas convergências durante os treinamentos. Na verdade o que se observa nos gráficos de convergência do erro e comparativo entre as saídas das RNAs e os valores reais é que a grande diversidade nos dados de treinamento permitiu que a rede generalizasse melhor que nos casos dos módulos separados, o que reafirma o grande potencial das RNAs em solucionar problemas de alto grau de dificuldade e complexidade que não seriam solucionados por métodos convencionais.

No próximo capítulo são feitas as considerações finais a respeito da pesquisa desenvolvida nesta dissertação e sugestões de trabalhos futuros.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

O estudo da resistência série dos módulos fotovoltaicos confirmou o seu aumento com a redução da potência, mas sob condições de sombreamentos parciais o valor da resistência série também sofreu aumentos significativos, exceto no caso do sombreamento de 25% e 50% de quatro células adjacentes nos módulos de 40 W da *ASE-Américas*, lembrando que nestes dois tipos de sombreamento os diodos de desvio (*by-pass*) não atuam, deixando os módulos ainda mais vulneráveis, além disso, os módulos da *ASE-Américas* utilizados nesta pesquisa têm 15 anos de fabricação e uso em campo, e apresentam pequenas manchas abaixo do vidro de proteção das células, em que não foi possível detectar se pertencem ao vidro ou às células o que poderia ser um indício de degradação em algumas de suas células, mas é algo que deveria ser mais bem pesquisado no futuro, além disso, também foi percebido um pouco de corrosão nas placas onde estão conectados os diodos. Um dos módulos da *ASE-Américas* apresentou comportamento muito adverso em algumas células, quando comparado ao demais da mesma marca e submetidos às mesmas condições de sombreamento parcial. Ao abrir a caixa de conexão dos diodos atrás do módulo, a razão deste comportamento adverso foi descoberta; neste módulo havia muito mais corrosão do que nos demais e um dos diodos estava com a solda na placa quebrada, o que fez com que apenas metade do módulo tivesse a proteção do diodo. Isto é algo que os módulos estão sujeitos, devido à ação do tempo e se não forem corretamente instalados no local de uso e não for feita uma manutenção preventiva, principalmente em regiões em que os módulos estejam sujeitos a algum tipo de sombreamento parcial.

A importância dos diodos *by-pass* na segurança de funcionamento das células e sua influência na potência de saída durante o sombreamento pode ser verificada na comparação das leituras dos módulos sombreados com e sem os diodos conectados, que de modo geral apresentaram um aumento significativo na resistência série, mostrando os riscos a que as células sombreadas correm na falta deste dispositivo.

Os módulos da *SolarWorld* utilizados na pesquisa eram novos e nunca haviam sido usados em campo e não apresentaram nenhum tipo de adversidade quando submetidos às

mesmas condições de sombreamento parcial, temperatura e radiação, tendo suas curvas de potência praticamente sobrepostas. Isto leva à conclusão que é possível identificar o estado de sombreamento parcial através do monitoramento da resistência série calculada pelo método do Fator de Forma, uma vez que os módulos estejam em boas condições técnicas de uso. O sombreamento parcial além de prejudicar o fornecimento de energia podendo causar grandes reduções na potência de saída dos módulos também é prejudicial ao próprio módulo podendo danificar de forma irreversível as células sombreadas devido à formação de *hot-spots*.

De um modo geral, a proposta de identificar se um módulo está ou não sob sombreamento parcial apresentou um bom nível de confiabilidade, mesmo nos módulos desgastados pelo tempo e mal cuidados. Esta técnica poderia servir como um complemento a sistemas de monitoramento e Rastreamento do Ponto de Potência Máxima (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*), pois estes apresentam dificuldade em encontrar o ponto ótimo de funcionamento dos módulos quando estes estão sob sombreamento parcial, devido o surgimento de máximos locais que podem prender o rastreador em um máximo local diferente do máximo global.

A Rede Neural Artificial desenvolvida no capítulo 6 mostrou boa convergência para encontrar as saídas referentes às leituras de sombreamento parcial imposto sobre os módulos em uma área de aproximadamente 3% da área fotovoltaica; equivalente a uma célula inteira, mas que também foi testada para a mesma área dividida em 50% de duas células e 25% de quatro células. Esta divisão da área sombreada mostrou que os diodos de desvio não são ativados com 50% de duas células ou 25% de quatro células, devido ao fato de que a célula não estando totalmente bloqueada continua fornecendo corrente ao circuito, porém em menor quantidade e por isso o diodo não atua desviando a corrente. Isto comprova que não é possível associar a redução na potência de saída de um módulo fotovoltaico diretamente à área sombreada. Como os diodos de desvio estão conectados a grupos de 18 células nos módulos utilizados, isto faz com que, mesmo sombreando apenas uma das 36 células do módulo, a redução na potência de saída seja extremamente elevada, onde com os dados colhidos nesta pesquisa a redução média de potência foi de 56,86% com diodos de desvio nos módulos da ASE–Américas e 70,58% sem os diodos, e nos módulos da SolarWorld 39,76% com os diodos e 49,31% sem os diodos.

O deslocamento da sombra sobre os módulos mostrou grandes distorções nas curvas características dos módulos da ASE–Américas, Inc. (40 W), o que não ocorreu nos módulos da

SolarWorld (75 W). Este fato pode estar associado à idade dos módulos de 40 W, fabricados e usados há quinze anos apresentam pequenas manchas que podem ser sinais de degradação e desgaste desigual entre as células, é um caso que merece um estudo mais específico sobre envelhecimento de células solares.

É possível que a dificuldade das RNAs em convergirem com os dados dos módulos de 40 W esteja associada ao comportamento adverso destes módulos (fabricados há mais de quinze anos), quando submetidos às condições de sombreamento parcial propostas nesta pesquisa. Ficou claro no estudo do capítulo 4 que os módulos da *ASE-Américas* sofreram desgastes e envelhecimento de forma desigual entre suas células e em seus diodos *by-pass*.

Estas alterações podem estar associadas a desgastes ocorridos nos diodos e a degradação não uniforme ou mesmo contaminações das células após quinze anos de operação, o que estaria afetando de formas distintas o desempenho do módulo quando submetido a sombreamento parcial em posições diferentes.

7.2 Sugestões de trabalhos futuros:

- ✓ Desenvolver um sistema de coleta de dados de maior capacidade para que o estudo da resistência série em condições de sombreamento parcial possa ser feito em painéis e arranjos fotovoltaicos e em tempo real, com módulos ligados em série/paralelo, verificando a possibilidade do monitoramento da resistência série identificar uma possível condição de sombreamento parcial sobre o sistema, pois esta pesquisa ficou limitada ao uso de um módulo fotovoltaico por vez, em detrimento do baixo limite de corrente do *Mini KLA* utilizado. Além disso, num sistema fotovoltaico composto de vários módulos deve-se verificar que além da resistência série dos módulos há também a resistência nos cabos de conexão, e um desafio seria verificar como separar a R_s dos módulos da R_s dos cabos.
- ✓ Com levantamento de um banco de dados de um sistema fotovoltaico, implementar e treinar uma Rede Neural Artificial para monitoramento da potência de saída como sistema de apoio e alerta para rastreadores do Ponto de Potência Máxima (PPM) que muitas vezes apresentam dificuldades em encontrar e acompanhar o PPM quando ocorrem sombreamentos parciais sobre o sistema.

- ✓ Pesquisar sistemas fotovoltaicos de mesma marca e modelo com idades diferentes para fazer um levantamento sobre o processo de envelhecimento e desgaste de módulos fotovoltaicos e a influência deste processo em seu desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHAVI, A. K., 1997, *Series Resistance Variation of Polysilicon Solar Cells Modified by Electrochemical Coating of Heteropolytungstates*. Renewable Energy, 11(4), pp. 427–438.
- ALCÂNTARA, S. M. F. *Desempenho de um Pannel Fotovoltaico de Baixa Tensão, Acoplado ao Protótipo de um Conversor DC/DC Topologia Booster*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- ARAUJO, G. L.; SANCHEZ, E. *A New Method for Experimental Determination of the Series Resistance of a Solar Cell*. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. Ed-29, N° 10, October, 1982.
- BASHAHU, M.; HABYARIMANA, A. *Review and Test of Methods for Determination of the Solar Cell Series Resistance*. Renewable Energy, 1995, 6(2), pp. 129–139.
- BISHOP, C. M.; *Pattern Recognition and Machine Learning*. Singapore: Springer, 2006. 749 p.
- BONIFÁCIO, P. J. S. *Seguidor Fotovoltaico: Uma Variação do P&O - Simulação e Prototipagem*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- BÜHLER, A. J. *Determinação de Parâmetros Fotovoltaicos a Partir de Ensaio de Curvas Características sem Iluminação*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Rio Grande do Sul, 2007.
- CAMUS, C.; EUSÉBIO, E. *Gestão de Energia – Energia Solar*. ISEL, Lisboa, 2006.
- CARDADOR, M. A. *Seguidor de Potência Máxima para Sistema Fotovoltaico com Conversor Matricial*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- CARNEIRO, J. *Módulos Fotovoltaicos Características e Associações*. Universidade do Minho, Escola de Ciências, Departamento de Física, 2010a.
- CASTRO, R. M. G. *Introdução à Energia Fotovoltaica. Energias Renováveis e Produção Descentralizada*, 2008. Disponível em: <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/171209/1/Fotovoltaico_ed2p2.pdf>. Acessado em: 09/10/2013.
- CHAN, D. S. H.; PHANG, J. C. H. *Analytical Methods for the Extraction of Solar Cell Single and Double Diode Model Parameters from I-V Characteristics*. IEEE Trans. Electron Devices, 1987, ED-34(2), pp. 286–293.
- COELHO, R. F. *Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- CORTEZ, Liliana et al. *Progress on the problems of the study in the performance of a solar module under conditions of random changes of radiation*. International Journal of Energy, Issue 2, Vol. 3, 2009. p. 17-24.

CUMBANE, J. J. *Estudo do Efeito da Temperatura no Rendimento das Células Solares*. Monografia de Graduação. Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências – Departamento de Física, 1994.

DFTE – Departamento de Física Teórica e Experimental. *Efeito Fotoelétrico*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<http://www.dfte.ufrn.br/caio/index.html>>. Acessado em: 26/11/2013.

EL-ADAWI, M. K., and AL-NUAIM, I. A. *A Method to Determine the Solar Cell Series Resistance From a Single I–V. Characteristic Curve Considering its Shunt Resistance – New Approach*. Vacuum, 64, 2002, pp. 33–36.

FIORENTINO, J. J.; SERAPHIM, O. J. *Análise da Eficiência de Módulos Fotovoltaicos Instalados em Condições Normais de Operação*. Energia Agrícola, Botucatu, vol. 20, nº 3, 2005, p. 89–112.

GARCIA, M.; MARURI, J. M.; MARROYO, L.; LORENZO, E.; PEREZ, M. *Partial Shadowing, MPPT Performance and Inverter Configurations: Observations at Tracking PV Plants*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2008, p. 529–536.

GUO, S.; WALSH, T. M.; ABERLE, A. G.; PETERS, M. *Analysing Partial Shading of PV Modules by Circuit Modelling*. IEEE, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 2957–2960, June 2012.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física – Óptica e Física Moderna*. 8ª ed. LTC, 2011. p. 179.

HANITSCH, R. E.; SCHULZ, D.; SIEGFRIED, U. *Shading Effects on Output Power of Grid Connected Photovoltaic Generator Systems*. Renewable Energy: Power Engineering, 2001, p. 93–99.

HASYIM, E. S.; WENHAM, S. R.; GREEN, M. A. *Shadow Tolerance of Modules Incorporating Integral Bypass Diode Solar Cells*. Solar Cells, 19, 1986, p. 109 – 122.

HAYKIN, S. *Redes Neurais, Princípios e Prática*. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HECKTHEUER, L. A. *Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos*. Tese de Doutorado, 2001. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KARATEPE, E.; BOZTEPE, M.; COLAK, M. *Neural network based solar cell model*. Energy Conversion and Management 47 (2006) p. 1159–1178.

KOVACH, A.; SCHMID, J. *Determination of energy output losses due to shading of building-integrated photovoltaic arrays using a ray tracing technique*. Solar Energy, vol. 57, no. 2, pp. 117–124, Aug. 1996.

LORENZO, E. *Energy Collected and Delivered by PV Modules*. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. 2003. 950 p.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*. Ed. Elsevier, 2003, p. 984.

MATOS, F. B. *Aplicação de Ferramentas de Inteligência Computacional para Estimação das Propriedades Físicas de uma Célula Solar de Silício*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

MATOS, F. B. *Modelagem computacional do comportamento de células fotovoltaicas baseado nas propriedades físicas dos materiais*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

MECATRÔNICA ATUAL. *Redes Neurais Artificiais – Parte 2*. [Online]. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1208-redes-neurais-artificiais-parte-2>> Acessado em: 07/02/2014.

MELLIT, A.; KALOGIROU S. A. *Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review*. Progress in Energy and Combustion Science 34 pp. 574–632, 2008.

MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. *Photovoltaic System Engineering*. 2^a ed. CRC Press, 2004. 435 p.

NORIEGA, L. *Multilayer Perceptron Tutorial*. School of Computing, Staffordshire University, 2005. [Online]. Disponível em: <http://www.cs.sun.ac.za/~kroon/courses/machine_learning/lecture5/mlp.pdf> Acessado em: 10/09/2013.

PATEL, H.; AGARWAL, V. *Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 4, April 2008.

PATEL, M. R. *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, 1999. 348 p.

PRIYANKA; LAL, M.; SINGH, S. N. *A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells*. Solar Energy Materials & Solar Cells 91 (2007), p. 137–142.

QUASCHNING, V.; R. HANITSCH. *Numerical Simulation of Photovoltaic Generators with Shaded Cells*. 30th Universities Power Engineering Conference, Greenwich, p. 583-586, 1995.

RAMABADRAN, R.; MATHUR, B. *Effect of Shading on Series and Parallel Connected Solar PV Modules*. Modern Applied Science. Vol. 3, Nº 10, October 2009. p. 32-41.

RODRIGUES, P. *Extração dos parâmetros de módulos fotovoltaicos a partir da solução de um sistema de equações não lineares utilizando técnicas da região de confiança*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

RÜTHER, R. *Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e O Trabalho do Labsolar nesta Área*. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Energia Solar, 1999.

SABRY, M.; GHITAS, A. E. *Influence of Temperature on Methods for Determining Silicon Solar Cell Series Resistance*. Journal of Solar Energy Engineering, 2007, Vol. 129, p. 331-335.

SANTOS, B. R.; PETRY C. A.; LIMA C. B. *Desenvolvimento de um traçador de curvas VxI para painéis fotovoltaicos*. RTC, Florianópolis, SC, v.02, nº 01, 2010, p.17-23.

SÉRA, D. *Real-time Modeling, Diagnostics and Optimized MPPT for Residential PV systems*. PhD Thesis. Faculty of Engineering, Science & Medicine at Aalborg University. 2009.

SÉRA, D.; BAGHZOUZ, Y. *On the Impact of Partial Shading on PV Output Power*. International Conference on Renewable Energy Sources. Greece. 2008.

SILVESTRE, S.; CHOUDER A. *Effects of Shadowing on Photovoltaic Module Performance*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2008, p. 141–149.

SISSOKO, G.; MBODJI S. *A Method to Determine the Solar Cell Resistances from Single I-V Characteristic Curve Considering the Junction Recombination Velocity (Sf)*. Int. J. Pure Appl. Sci. Technology, 6(2) (2011), pp.103-114.

SOLAR BRASIL. *Cartilha de Energia Solar Fotovoltaica*. Edição 2010. [Online]. Disponível em: <<http://www.solarbrasil.com.br/Cartilha%20Solar%202010.pdf>> Acessado em: 02/12/2013.

SOLIS, T. M.; CENTENO, T. M. *Análise Comparativa de Diferentes Funções de Ativação e Número de Camadas na Rede de Leitura de Máquinas de Estado Líquido*. XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnologia da UTFPR, 2012.

SOUZA, F. A. A. *Análise de Desempenho da Rede Neural Artificial do tipo MultiLayer Perceptron na era Multicore*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

TEIXEIRA, T. B. *Influência da Temperatura em Aglomerados Auto-Reconfiguráveis de Células Solares Fotovoltaicas*. Monografia de Especialização. Universidade Federal de Minas Gerais - Instituto de Ciências Exatas, 2008.

VEMURU, S.; SINGH, P.; NIAMAT, M. *Modeling Impact of Bypass Diodes on Photovoltaic Cell Performance Under Partial Shading*. IEEE, International Conference on Electro/Information Technology, May 2012.

VERA, L. H.; GASPARIN, F. P.; KREZINGER, A. *Resultados Simulados e Medidos em um Sistema Fotovoltaico Autônomo*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente , Vol. 12, 2008, Argentina. ISSN 0329-518.

ZHANG, Q.; SUN, X.; ZHONG, Y.; MATSUI, M. *A Novel Topology for Solving the Partial Shading Problem in Photovoltaic Power Generation System*. IEEE, IPEDMC, 2009.