

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Maximização do aproveitamento energético de painéis
fotovoltaicos usando rastreadores mecânicos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

João Manoel Lenz Vianna da Silva

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Maximização do aproveitamento energético de painéis fotovoltaicos usando rastreadores mecânicos

João Manoel Lenz Vianna da Silva

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau em

Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, Ph.D.

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Lenz Vianna da Silva, João Manoel
Maximização do aproveitamento energético de painéis
fotovoltaicos usando rastreadores mecânicos / João Manoel
Lenz Vianna da Silva.-2015.
103 f.; 30cm

Orientador: Felix Alberto Farret
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2015

1. Energia fotovoltaica 2. Rastreador mecânico 3.
Maximização energética 4. Modelagem fotovoltaica I.
Farret, Felix Alberto II. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a João Manoel Lenz Vianna da Silva. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail para contato: joaomlenz@mail.ufsm.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**Maximização do aproveitamento energético de painéis fotovoltaicos usando
rastreadores mecânicos**
elaborada por

João Manoel Lenz Vianna da Silva

como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:



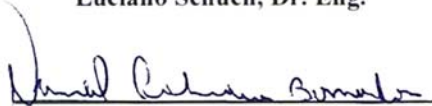
Felix Alberto Farret, PhD. Eng.
(Presidente/Orientador)



Ricardo Quadros Machado, Dr. Eng.



Luciano Schuch, Dr. Eng.



Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. Eng.
(Suplente)

Santa Maria, 13 de março de 2015.

Dedico esse trabalho à ciência, pois sobre seus ombros caminha o conhecimento humano.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas tenho a agradecer por contribuir, de alguma forma, no desenvolvimento desta dissertação de maneira direta ou indireta, nem todos serão citados aqui, mas saibam que sou sempre grato.

Aos meus pais, Vera Lucia e Paulo de Tarso, por serem os meus pilares e desde pequeno me ensinarem a importância da educação e do conhecimento. Mas, principalmente, me ensinarem o valor da profissão de professor, pesquisador e educador. Essa dissertação é fruto dos meus valores e, por consequência, dos seus.

A toda minha família, pelo constante apoio e incentivo, sem o qual essa tarefa com certeza seria ainda mais árdua. Especialmente aos meus tios, Carmem e Polé, minhas primas, Manuela e Marcela, e a minha irmã, Ana Paula. O carinho de vocês, mesmo que distante, conforta nos momentos difíceis.

À Camila Rodrigues, que acompanhou cada segundo dessa jornada com companheirismo e apoio, acreditando em mim mesmo quando eu tinha dúvidas.

Aos ex-colegas de CEESP, Cláudia, Leonardo e Leandro, que foram fundamentais para a realização deste trabalho e cuja amizade foi um bem adquirido nos últimos anos. Também ao Jordan, pelo auxílio e ensinamentos desde tempos remotos de iniciação científica, e ao Diego Ramos, por ser sempre prestativo e ter me ajudado quando mais precisei. A todos os atuais colegas, especialmente ao Frank, pelo companheirismo diário e sempre estar disposto a ajudar.

Agradeço, também, aos colegas de ONG Infância-Ação e as amigas Regina e Rejana, pelos momentos de alívio e alegria. Em especial, ao Thomas e ao Tiago, cuja amizade vai além das palavras que posso expressar aqui.

E, claro, meu grande agradecimento ao meu orientador, Prof. Felix Farret, por todos esses anos de convívio e ensinamentos. E, principalmente, por ter me ensinando a importância da ética na pesquisa científica e na vida acadêmica.

Também agradeço a Companhia Estadual de Energia Elétrica pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa científica em fontes alternativas de energia. Por último, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e à Universidade Federal de Santa Maria, instituições que participaram da minha formação como pessoa e como profissional, e sempre terei orgulho de ter sido parte.

*“Those who can, do. Those who
understand, teach.”*

Lee Shulman

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

Maximização do aproveitamento energético de painéis fotovoltaicos usando rastreadores mecânicos

AUTOR: JOÃO MANOEL LENZ VIANNA DA SILVA

ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET

Local e Data da defesa: Santa Maria, 13 de março de 2015.

A consolidação do mercado fotovoltaico ocorrida na última década resultou no aumento da contribuição dessa fonte na geração mundial de energia elétrica, especialmente em geração distribuída comercial e industrial. O custo por kWh de geração fotovoltaica, contudo, ainda é um fator impeditivo, levando a busca de técnicas de maximização da energia produzida. Equipamentos eletromecânicos para movimentar a superfície dos módulos em direção ao Sol garante maior incidência de radiação e, por consequência, maior conversão em energia elétrica. O uso desse tipo de dispositivo, porém, ainda é ponto de debate tanto na indústria quanto no meio acadêmico, especialmente pelo aumento do custo inicial de investimento, da manutenção e complexidade de operação. Essa dissertação apresenta um estudo acerca da melhor solução de utilização de rastreadores mecânicos para painéis fotovoltaicos, analisando o ganho energético entre configurações de um e dois eixos e comparando-os com montagem fixa para diferentes ângulos de inclinação para a cidade de Santa Maria, RS. Com o objetivo de aplicação futura em uma central fotovoltaica de 10 kW, examinou-se a maneira mais eficiente de operar um rastreador solar considerando radiação local disponível, a temperatura de operação dos painéis e as perdas por consumo elétrico. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia para cálculo da energia solar sob superfícies, através da posição solar e da transmissividade atmosférica, e uma modelagem de painel fotovoltaico puramente em função da radiação e temperatura. Cada etapa do trabalho foi validada com ensaios experimentais e com dados meteorológicos coletados de órgãos oficiais, de modo que esses modelos sustentem a confiabilidade da análise proposta.

Palavras-chave: Geração fotovoltaica, Rastreadores mecânicos, maximização energética, modelagem PV

ABSTRACT

Master Thesis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Federal University of Santa Maria

Maximization of energy harvesting from photovoltaic panels through mechanical trackers

AUTHOR: JOÃO MANOEL LENZ VIANNA DA SILVA

SUPERVISOR: FELIX ALBERTO FARRET

Place and Date: Santa Maria, March 13th, 2015.

Photovoltaic market consolidation occurred in the last decade resulted in an increased contribution of this energy source in global electric power generation, especially in commercial and industrial distributed generation. The kWh cost of photovoltaics, nevertheless, is still an impediment factor, resulting in the search for techniques for maximizing the produced energy. Electromechanical equipment to move the module surface towards the sun ensures a higher radiation incidence, and therefore, higher conversion into electrical energy. Feasibility of trackers, however, is still in discussion in industry as well as in academia, especially due to the increasing initial investment cost, maintenance and complexity of operation. This thesis presents a study of the best solution using mechanical trackers for photovoltaic panels, analyzing the energy gain between operation in one and two axes, and comparing with fixed mounting for different inclination angles in Santa Maria, Brazil. Aiming at a future application in a photovoltaic plant of 10 kW, the most efficient way to operate a solar tracker was examined, considering available local radiation, operating temperature of panels and losses from electrical consumption. A methodology was developed for computing solar energy incidence in surfaces, through solar position and atmospheric transmissivity, and a photovoltaic panel modeling solely in function of radiation and temperature. Each study phase was validated with experimental tests and meteorological data collected from meteorological agencies, so that these models support the proposed approach.

Keywords: Photovoltaic generation, solar trackers, energy maximization, PV modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Níveis de energia para o semicondutor e, em detalhe, para o silício.	30
Figura 3.2 - Espectro solar na superfície terrestre e taxa de absorção do silício. (VIRIDIAN SOLAR, 2014).....	31
Figura 3.3 - Circuito equivalente de um diodo da célula fotovoltaica.	31
Figura 3.4 – Curva $I \times V$ característica de uma célula PV genérica.	34
Figura 3.5 - Diagrama de blocos do processo iterativo para correção dos valores de R_s e R_p	39
Figura 3.6 - Diagrama em blocos da ordem de cálculos para o modelo proposto da célula fotovoltaica.	42
Figura 4.1 - Diferença entre radiação emitida pelo Sol e que atinge a Terra.	44
Figura 4.2 - Caracterização da massa de ar a ser percorrida pela luz solar.	46
Figura 4.3 - Representação do ângulo horário de um corpo celeste.	48
Figura 4.4 - Representação gráfica do sistema de coordenadas para posicionamento do Sol com origem no centro da Terra.	51
Figura 4.5 - Diagrama da posição do Sol em função do sistema de coordenadas com origem no observador.	52
Figura 4.6 - Representação gráfica da angulação entre vetores unitários nos diferentes sistemas de coordenadas.	53
Figura 4.7 - Posicionamento de uma superfície no sistema de coordenadas do observador.	54
Figura 4.8 - Parte do hemisfério de uma superfície inclinada que não recebe radiação difusa.	56
Figura 4.9 - Movimentação do rastreamento a) em um eixo azimutal e b) em dois eixos.	57
Figura 4.10 - Diagrama de blocos para modelo de análise de desempenho de PV com rastreamento.	59
Figura 4.11 - Variação do azimute em função da hora para os solstícios de verão e inverno, e equinócio de primavera.	60
Figura 4.12 - Variação da elevação solar em função da hora para os solstícios de verão e inverno, e equinócio de primavera.	60
Figura 4.13 - Razão entre Azimute e Elevação solar ao longo do dia de solstício de verão.	61
Figura 4.14 - Diagrama de blocos da proposta de rastreamento em três posições.	62
Figura 5.1 - Trajetória solar para o dia 355 do ano, em relação ao azimute (eixo x) e elevação (eixo y), em graus, e a hora do dia no eixo secundário.	66
Figura 5.2 – Comparação entre ângulos simulados e obtidos do Almanaque Astronômico.	66
Figura 5.3 - Posicionamento solar ao longo do ano, em relação ao azimute (eixo x) e elevação (y), em graus.	67
Figura 5.4 - Posições do sol, no solstício de verão, nas coordenadas do observador.	68
Figura 5.5 - Radiação solar global e direta simuladas para o meio dia solar ao longo do ano.	70
Figura 5.6 - Energia solar global disponível ao longo do ano, para Santa Maria – RS.	70
Figura 5.7 - Comparação entre valores de irradiação simulados para uma superfície horizontal e dados meteorológicos em um período de 5 anos.	71
Figura 5.8 - Comparação entre irradiação medida por estação do INMET e valores simulados, para uma superfície plana.	72
Figura 5.9 - Vista em perspectiva dos vetores resultantes para a posição solar e a normal de uma superfície inclinada, e b) vista superior da mesma.	73

Figura 5.10 - Variação do ângulo de incidência para superfícies sob diferentes posicionamentos e estratégias de rastreamento.	73
Figura 5.11- Radiação incidente ao longo do dia simulada para os diferentes cenários de posicionamento de superfície.	74
Figura 5.12 - Relação entre irradiação em uma superfície plana e seu ângulo de inclinação, ao longo do ano.	75
Figura 5.13 - Modelo simulado do painel fotovoltaico Siemens para incidência de radiação constante e diferentes temperaturas.	77
Figura 5.14- Modelo simulado do painel fotovoltaico Siemens para temperatura constante e diferentes níveis de radiação incidente.	78
Figura 5.15 - Comparação entre os resultados experimentais e simulados para a condição de teste 1.	79
Figura 5.16 - Comparação entre os resultados experimentais e simulados para a condição de teste 2.	79
Figura 5.17 - Comparação entre os resultados experimentais e simulados para a condição de teste 3.	80
Figura 5.18 - Comparação entre potência medida e simulada para painel em posição fixa.	82
Figura 5.19 - Comparação entre potência medida e simulada para painel em rastreamento otimizado de um eixo.	82
Figura 5.20 - Comparação entre potência medida e simulada para painel em rastreamento em dois eixos.	83
Figura 5.21 - Comparação da geração energética mensal entre diferentes topologias de montagens fixas e rastreamento.	88
Figura 5.22 – Simulação de radiação incidente em superfície com rastreamento em um eixo otimizado e dois eixos, para o solstício de verão.	89
Figura 5.23 - Simulação de radiação incidente em superfície com rastreamento em um eixo otimizado e dois eixos, para o equinócio de outono.	89
Figura 5.24 - Simulação de radiação incidente em superfície com rastreamento em um eixo otimizado e dois eixos, para o solstício de inverno.	90
Figura A.1 - Estruturas construídas para ensaio de painéis fotovoltaicos em diferentes posicionamentos.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Identificação de parâmetros do modelo de um diodo.....	32
Tabela 3.2 - Equações de carga e do diodo PV para os três diferentes pontos de operação. ...	33
Tabela 5.1 - Posição angular do Sol simulados e de dados do AA/USNO.	65
Tabela 5.2 - Comparação entre valores de radiação incidente, para o meio dia solar, entre dados meteorológicos e o modelo de radiação utilizado.	69
Tabela 5.3 - Energia solar acumulada em cada superfície nos dois cenários.	74
Tabela 5.4 - Parâmetros internos modelados para o painel fotovoltaico Siemens Pro4JF.....	76
Tabela 5.5 - Principais parâmetros do modelo de um diodo do painel Siemens, em diferentes situações de operação.	77
Tabela 5.6 - Condições de testes práticos realizados com o PV Siemens Pro 4JF.....	78
Tabela 5.7 - Resultados simulados de radiação incidente e corrente fotogerada para as diferentes condições de teste.	80
Tabela 5.8 - Condições de teste realizadas com módulos PV.	81
Tabela 5.9 - Posições otimizadas para o rastreamento em um eixo, para o dia 32 do ano.	81
Tabela 5.10 - - Energia mensal produzida simulada para montagem fixa em diferentes condições de ângulo de inclinação.	84
Tabela 5.11 - Energia mensal produzida simulada para rastreador azimutal em diferentes condições de ângulo de inclinação.	86
Tabela 5.12 - Energia mensal produzida para rastreador azimutal com 50° de inclinação com o solo e em diferentes períodos de correção de posição.	86
Tabela 5.13 - Energia mensal produzida para rastreador em dois eixos e em diferentes períodos de correção de posição.	87
Tabela 5.14 - Comparação entre consumo de táticas de rastreamento.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS

EPIA	Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (<i>European Photovoltaic Industry Association</i>)
PV	Fotovoltaico (<i>photovoltaic</i>)
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
CEESP	Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
I&M	Instalação e manutenção
IxV	Corrente versus tensão
CC	Corrente contínua
CIS	Cobre-Índio-Gálio
c-Si	Cristalino de Silício
SC	Curto-circuito (<i>short circuit</i>)
OC	Circuito aberto (<i>open circuit</i>)
STC	Condições padrão de teste (<i>Standard test conditions</i>)
NOC	Condições nominais de operação (<i>Normal operation conditions</i>)
MP	Máxima potência
AM	Massa de ar (<i>Air mass</i>)
1E	1 Eixo
2E	2 Eixos
AA	Almanaque Astronômico (<i>Astronomical Almanac</i>)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria

LISTA DE SÍMBOLOS

I_L	Corrente foto gerada
V_D	Tensão na junção $p-n$ (V)
I_D	Corrente na junção $p-n$ (A)
η	Constante de idealidade do diodo
R_P	Resistência paralela (Ω)
R_S	Resistência série (Ω)
V_L	Tensão de saída do painel fotovoltaico (V)
I_L	Corrente de saída do painel fotovoltaico (A)
R_L	Carga (Ω)
I_P	Corrente na resistência paralela (A)
I_S	Corrente de saturação reversa do diodo (A)
V_T	Tensão térmica do semiconductor (V)
k	Constante de Boltzmann (J/K)
q	Carga do elétron (C)
T	Temperatura (K ou $^{\circ}C$)
G	Radiação incidente na superfície (W/m^2)
μ_i	Coefficiente de temperatura da corrente
I_{SC}	Corrente de curto-circuito (A)
V_{OC}	Tensão de circuito aberto (V)
ψ	Coefficiente de não-linearidade da temperatura
μ_v	Coefficiente de temperatura da tensão
E_g	Energia da banda proibida (eV)
V_{MP}	Tensão no ponto de máxima potência (V)
I_{MP}	Corrente no ponto de máxima potência (A)
μ_L	Coefficiente de mobilidade intrínseca do semiconductor
FF	Fator de preenchimento
T_C	Temperatura de operação do painel PV (K)
T_a	Temperatura ambiente (K)
S_0	Constante solar (W/m^2)
D	Dia do ano
Γ	Dia angular
S_{global}	Radiação incidente global (W/m^2)

S_{direta}	Radiação incidente direta (W/m^2)
S_{difusa}	Radiação difusa (W/m^2)
$S_{refletida}$	Radiação refletida (W/m^2)
AM	Coefficiente de massa de ar
L	Comprimento percurso ótico da luz (m)
θ_z	Ângulo zênite solar ($^\circ$)
τ	Coefficiente de transmissividade da atmosfera
ρ	Índice de refletância do solo
ω	Ângulo horário ($^\circ$)
t_s	Tempo solar (<i>horas</i>)
TL	Tempo local (<i>horas</i>)
ET	Equação do tempo (<i>minutos</i>)
CL	Correção de longitude (<i>horas</i>)
H_v	Correção para horário de verão (<i>horas</i>)
δ	Declinação terrestre ($^\circ$)
S'	Vetor resultante da posição do Sol relativo ao centro da Terra
S'_m	Componente meridional do vetor resultante S'
S'_o	Componente oeste do vetor resultante S'
S'_p	Componente do eixo de rotação terrestre do vetor resultante S'
α	Elevação solar em relação ao horizonte ($^\circ$)
A	Ângulo de azimute solar em relação do Norte ($^\circ$)
i	Vetor unitário em sistema de coordenadas cartesianas tridimensional
j	Vetor unitário em sistema de coordenadas cartesianas tridimensional
k	Vetor unitário em sistema de coordenadas cartesianas tridimensional
S	Vetor resultante da posição do Sol relativo ao observador
S_z	Componente zenital do vetor resultante S
S_e	Componente leste do vetor resultante S
S_n	Componente norte do vetor resultante S
Φ	Latitude local ($^\circ$)
θ_i	Ângulo de incidência ($^\circ$)
β	Ângulo de inclinação de superfície com o solo ($^\circ$)
γ	Ângulo de azimute da superfície em relação ao Norte ($^\circ$)
N	Vetor normal à superfície
N_z	Componente zenital do vetor resultante N

N_e	Componente leste do vetor resultante N
N_n	Componente norte do vetor resultante N
J	Energia solar (J/m^2)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Considerações iniciais.....	19
1.2 Objetivo Geral.....	21
1.3 Objetivos Específicos	22
1.4 Organização da Dissertação.....	22
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Modelagem de células e painéis fotovoltaicos.....	23
2.2 Modelos de radiação solar incidente em superfícies fotovoltaicas.....	25
2.3 Modelos e métodos de rastreamento de painéis fotovoltaicos.....	26
2.4 Considerações finais	27
CAPÍTULO 3 MODELO FOTOVOLTAICO.....	29
3.1 Física do efeito fotovoltaico.....	29
3.2 Modelo equivalente com um diodo.....	31
3.2.1 Características de corrente vs tensão da junção PV.....	33
3.3 Equacionamento dos parâmetros	34
3.3.1 Corrente fotogerada	34
3.3.2 Tensão de circuito aberto.....	35
3.3.3 Corrente de saturação reversa.....	36
3.3.4 Fator de idealidade do diodo	37
3.3.5 Resistências paralelo e série	38
3.3.6 Correção de temperatura sobre R_S e R_P	38
3.3.7 Fator de preenchimento	40
3.3.8 Temperatura de operação.....	41
3.4 Modelo da célula fotovoltaica.....	41
3.5 Resumo do Capítulo.....	41
CAPÍTULO 4 MODELO DE RADIAÇÃO INCIDENTE EM SUPERFÍCIES	43
4.1 Energia solar disponível.....	43
4.2 Radiação incidente na superfície terrestre	44
4.2.1 Massa de ar e radiação direta.....	45
4.2.2 Radiação difusa	46
4.2.3 Radiação refletida.....	47
4.3 Posição do Sol.....	48
4.3.1 Conversão temporal.....	48

4.3.2	Ângulo de declinação	50
4.3.3	Ângulos entre observador e Sol.....	50
4.4	Incidência sob superfícies	54
4.4.1	Radiação incidente no plano horizontal.....	55
4.4.2	Radiação incidente em superfície inclinada	56
4.5	Modelo de rastreador solar.....	57
4.5.1	Proposta da tática de otimização	58
4.6	Resumo do Capítulo.....	62
CAPÍTULO 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS		64
5.1	Posicionamento solar na esfera celeste	64
5.1.1	Coordenadas vetoriais da posição solar.....	67
5.2	Modelo de radiação incidente	68
5.3	Incidência em superfícies.....	72
5.4	Ângulo ótimo para superfícies fixas	74
5.5	Modelagem célula fotovoltaica.....	75
5.5.1	Validação dos modelos de radiação incidente e PV	76
5.5.2	Validação do modelo de energia produzida e rastreamento mecânico	80
5.6	Análise do ganho energético.....	83
5.6.1	Montagem fixa sob diferentes ângulos.....	84
5.6.2	Rastreador com um eixo	85
5.6.3	Rastreador com dois eixos.....	85
5.7	Análise da tática proposta	88
5.7.1	Consumo e perdas.....	90
5.8	Resumo do capítulo	91
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES.....		92
6.1	Contribuições do Trabalho.....	93
6.2	Propostas de trabalhos futuros	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		95
APÊNDICES.....		100
ANEXOS.....		102

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Apesar da baixa contribuição na matriz energética brasileira, a geração elétrica através de painéis fotovoltaicos teve crescimento exponencial na última década e hoje representa um mercado consolidado tanto em plantas de geração de alta potência quanto em geração distribuída. Com expectativas de atender até 11% da demanda elétrica na Europa até 2020, segundo a Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (EPIA, 2014), também crescem o número de trabalhos em pesquisa e desenvolvimento de métodos para aumentar a eficiência da produção fotovoltaica (PV). No Brasil, porém, esta forma de energia é incipiente.

O desenvolvimento tecnológico da indústria de semicondutores aliada à constante busca pela independência de combustíveis fósseis fomentou a redução de custo de instalações PVs, contudo a eficiência desse tipo de fonte ainda é considerada baixa. A direta dependência das condições climáticas, a necessidade de controle de carga e a susceptibilidade a fatores como sombreamento e temperatura, são alguns dos desafios a serem contornados.

Nesse cenário despontam estudos que buscam tanto a melhor compreensão do funcionamento da célula solar quanto das táticas para a busca da operação em máxima potência com rastreamento eletrônico (MPPT, *Maximum Power Point Tracking*) e rastreamento mecânico da posição solar.

1.1 Considerações iniciais

Para contribuir com o crescimento da geração fotovoltaica no Brasil, o Centro de Estudos em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), da Universidade Federal de Santa Maria, teve aprovado um projeto de pesquisa e desenvolvimento junto à Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) com objetivos de projeto e construção de uma central fotovoltaica de 10 kW, com diferentes métodos para maximizar a produção de energia. Um desses métodos consiste no uso do rastreamento mecânico dos módulos, para garantir uma maior captação de

energia solar. Por ter caráter de pesquisa experimental, o projeto busca analisar diferentes metodologias de rastreamento e, com isso, encontrar a melhor solução de sua utilização. Esse objetivo vai de encontro à busca de um maior rendimento energético, viabilização do custo de implantação e incentivo a difusão da tecnologia.

A energia produzida por painéis fotovoltaicos, assim como por coletores térmicos está diretamente associada a quantidade de radiação solar incidente no dispositivo. A utilização de componentes eletromecânicos para direcionar a superfície do módulo ao Sol resulta em um aumento evidente na geração elétrica. No entanto, essa prática ainda é frequentemente contestada devido ao aumento do custo de instalação e manutenção (I&M), confiabilidade do sistema, e do tempo de retorno de investimento (Plesz et al., 2009). A montagem fixa de estruturas fotovoltaicas garante o menor custo I&M, mas possui menor aproveitamento da radiação solar disponível. O rastreamento mecânico pode ser executado com movimentação em um eixo ou em dois eixos, buscando a posição diária do Sol na movimentação de Leste à Oeste e/ou sua elevação em relação ao horizonte.

Para haver ganho líquido na energia produzida por painéis fotovoltaicos com rastreamento, é necessário que o consumo do dispositivo eletromecânico não seja maior que o aumento de incidência de radiação. O posicionamento inicial dos módulos PVs e os intervalos de movimentação, portanto são determinantes no custo-benefício dos rastreadores mecânicos. Da mesma forma, uma condição climática adversa ou imprecisão do posicionamento pode inviabilizar sua utilização.

A maximização da potência de saída de um painel fotovoltaico não depende somente da sua posição relativa ao Sol. Além da radiação incidente, a célula solar é altamente sensível a temperatura de operação, o que torna essencial o conhecimento da característica corrente *versus* tensão e os parâmetros internos da mesma. A célula PV é considerada um sistema caixa-preta, uma vez que as únicas variáveis possíveis de serem medidas externamente são a corrente foto gerada e a tensão de saída, o que torna sua modelagem complexa e não-linear.

Esta dissertação propõe uma análise da solução ótima para utilização de rastreadores mecânicos, levando em conta tanto a maximização da radiação incidente quanto o modelo elétrico equivalente do painel fotovoltaico. Como a energia na saída do painel PV depende de inúmeras variáveis, buscou-se modelar todos os parâmetros envolvidos, se abstendo de utilizar aproximações ou simplificações.

A metodologia proposta aqui se baseia em dois pilares fundamentais, sendo o primeiro um modelo de radiação incidente em uma superfície e o segundo a modelagem precisa do painel

fotovoltaico. Para prever a energia disponível à conversão elétrica pela célula PV, é preciso, antes conhecer com precisão a posição do Sol em qualquer instante, a taxa da radiação que penetra a atmosfera e chega ao solo e o posicionamento da superfície em relação ao Sol. O segundo pilar reside no conhecimento do comportamento fotovoltaico e dos seus parâmetros internos, para isso foi realizado uma modelagem da célula PV em função tanto da radiação incidente quanto da temperatura. Todas as etapas dessa metodologia foram desenvolvidas e simuladas em software de computador e comprovada com ensaios experimentais realizados em módulos PVs. Foram feitas validações do modelo elétrico e dos parâmetros calculados, enquanto o modelo de radiação incidente foi validado por comparação com dados meteorológicos. Sobre esses resultados, analisou-se a otimização dos rastreadores mecânicos para que atendessem o objetivo deste projeto de P&D.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia capaz de analisar a energia produzida por painéis fotovoltaicos sob diferentes esquemas de posicionamento e rastreamento mecânico, a fim de se estabelecer a melhor solução do ponto de vista da maximização energética. A literatura apresenta diversos trabalhos focados somente em modelos de rastreadores ou então na modelagem dos parâmetros da célula PV. Entre estes, poucos unem as duas ferramentas com precisão uma vez que diversos fatores são desconsiderados ou simplificados. Para uma maior confiabilidade nos resultados, objetivou-se uma rigorosa revisão da matemática existente para prever a radiação incidente. Nesse aspecto, foi modelada a dinâmica da movimentação Sol-Terra, a transmissividade da atmosfera e a transformação de coordenadas necessária para posicionar a radiação proveniente do Sol na referência de uma superfície no solo.

A previsão do ganho energético com rastreadores solares está relacionada com a eficiência do painel fotovoltaico em questão. Seu rendimento, por sua vez, depende da qualidade do módulo, dos seus parâmetros internos, do controle de carga e da temperatura de operação. Os dados fornecidos pelo fabricante raramente são suficientes para uma análise do funcionamento do módulo sob condições diferentes das nominais ou de teste. Com essa perspectiva, foi desenvolvida uma metodologia para determinar os parâmetros do painel tendo como contribuição a avaliação diferencial da influência da temperatura sobre todos os parâmetros da célula PV e sobre a produção de energia em diferentes técnicas de rastreamento.

O estudo dos ângulos ótimos de inclinação para estruturas fixas e rastreadores de um eixo em função da época do ano, os períodos e angulações ótimas de movimentação e a geração líquida de energia com essas táticas são alguns dos objetivos estudados para a avaliação diferencial. Os resultados obtidos por simulação são validados com testes experimentais em módulos fotovoltaicos, e extrapolados a fim de comparar com o cenário da central de geração de 10 kW proposta no projeto de pesquisa.

1.3 Objetivos Específicos

- i. Desenvolver um modelo de radiação solar incidente em superfícies sob diferentes ângulos de posicionamento;
- ii. Efetuar uma modelagem do painel fotovoltaico a ser utilizado, adequando todos os parâmetros em função da radiação incidente e temperatura de operação;
- iii. Validar os modelos de radiação e célula PV com resultados experimentais;
- iv. Analisar os resultados diferenciais pretendidos e obter a melhor solução de uso de rastreamento mecânico em painéis fotovoltaicos.

1.4 Organização da Dissertação

O capítulo 1 introduz o cenário atual na geração fotovoltaica e apresenta a motivação para o estudo de técnicas que aumentem a eficiência dessa fonte renovável.

No capítulo 2 faz-se uma revisão de literatura dos trabalhos existentes em modelagem de radiação incidente, modelagem de células fotovoltaicas, influência da temperatura e rendimento de rastreadores mecânicos para painéis PVs.

No capítulo 3 descreve-se o funcionamento físico da célula fotovoltaica, com a metodologia usada para modelagem dos parâmetros internos.

O capítulo 4 traz a matemática para previsão da radiação incidente em uma superfície e o modelo utilizado para a mesma.

Os resultados simulados são apresentados e analisados no capítulo 5, assim como as validações e os valores experimentais.

O capítulo 6 apresenta as conclusões finais desta dissertação, contribuições e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda uma revisão dos principais trabalhos que tratam os assuntos pilares dessa dissertação. Inicialmente, são apresentados estudos a respeito de modelos elétricos da célula fotovoltaica e métodos para determinação dos seus parâmetros, após, é feita uma revisão de trabalhos envolvendo a geometria da interação Sol-Terra e modelos para calcular a radiação solar incidente no solo. Por último, uma revisão bibliográfica a respeito de técnicas de rastreamento mecânico de painéis fotovoltaicos é apresentada.

2.1 Modelagem de células e painéis fotovoltaicos

A célula fotovoltaica é composta de uma fina camada de material supercondutor com dopagem positiva ou negativa, sendo os módulos comerciais mais comuns feitos de Silício cristalino. Pela natureza não-linear da junção $p-n$ e a impossibilidade de medir diretamente os parâmetros internos, diversos modelos elétricos equivalentes são propostos para representar o funcionamento do painel PV, sendo aquele que utiliza um diodo pode ser considerado com boa precisão para células solares de silício cristalino (LINEYKIN; AVERBUKH; KUPERMAN, 2014).

Os principais parâmetros do modelo de um diodo que caracterizam a curva I_xV são as resistências série e paralela, a corrente de saturação reversa, o fator de idealidade do diodo e a corrente foto gerada. Os fabricantes dificilmente fornecem tais informações ou detalhes que acercam as características físicas do módulo PV, provendo tipicamente valores de corrente e tensão de saída para diferentes condições de operação. A modelagem depende, portanto, do desenvolvimento matemático do efeito fotovoltaico no diodo semiconductor e de valores de saída do painel.

Em Coelho; Concer; Martins (2009) é apresentada uma modelagem matemática para descrever numericamente módulos e *arrays* fotovoltaicos, utilizando o modelo de um diodo.

Contudo, os parâmetros modelados são a corrente foto gerada, o fator de idealidade do diodo e a corrente do diodo. Já as resistências internas e a tensão de circuito aberto não são detalhadas e foram ajustadas manualmente conforme a necessidade. Os parâmetros foram calculados com base em um painel fotovoltaico da Kyocera, e após foi modelado na interface do Simulink®. Os resultados obtidos são comparados com valores de *datasheet* e experimentais para diferentes condições de temperatura e radiação. Também são apresentados resultados de simulação do modelo operando com um conversor CC-CC em MPPT.

É descrito por Nanjannavar; Gandhi; Patel (2013) uma análise das variações na característica de saída de uma célula PV de Silício em decorrência de mudanças de temperatura e radiação. Foi elaborado uma interface no LabVIEW® com o modelo equivalente de um diodo e a modelagem matemática proposta. Utilizando os dados de entrada fornecidos pelo fabricante, o modelo calcula a curva corrente vs. tensão, a eficiência da célula, valores de máxima potência e carga resistiva ótima para diferentes condições de temperatura. A matemática proposta, todavia, não aborda detalhes físicos do semicondutor e se utiliza de aproximações, além de desconsiderar a influência da temperatura em alguns dos parâmetros.

Benda e Machacek (2010) abordam detalhes físicos das influências da temperatura e da radiação na eficiência da célula fotovoltaica, com circuito equivalente de um diodo. Não é apresentado um método de determinação dos parâmetros, mas é descrito em detalhes a influência o processo físico fotovoltaico e a variação da resistência série em detrimento de diferentes temperaturas. Também é analisada a influência do ponto de máxima potência em função da resistência. Resultados de simulação do circuito para diferentes níveis de temperatura e radiação são comparados com dados experimentais para uma célula de silício e uma de CIS (Cobre-Índio-Gálio).

O modelo generalizado de um painel fotovoltaico proposto por Rahman; Varma; Vanderheide (2013) baseia-se apenas em valores de corrente e tensão fornecidos pelo fabricante. A técnica de modelagem determina todos os parâmetros do painel PV de modo explícito, sem necessidade de métodos numéricos ou iterativos. O modelo foi simulado em software e os parâmetros obtidos comparados com valores de *datasheet* de seis painéis comerciais diferentes e também com valores para radiação solar e temperatura do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos. Os resultados apresentados pelos autores são concisos e mostram baixo índice de erro quando comparado com os valores do fabricante. Porém, o erro chega até a 10% quando a validação é feita com condições não padrão de operação.

Uma estimativa da energia produzida por sistemas fotovoltaicos com coeficientes dependentes da temperatura é apresentado por Accetta; Piroddi; Ferrarini (2012), com base em medições de radiação global e temperatura ambiente. Utilizando os cinco parâmetros tradicionais do modelo de um diodo, é apresentada uma nova dependência matemática da temperatura com a corrente foto gerada e com a tensão de circuito aberto. A influência da radiação sobre a tensão de circuito aberta e as variações das resistências, contudo, foram desprezadas. A modelagem foi comparada com resultados experimentais de uma planta de 18 kW, e teve ajustes de coeficientes para adequar a potência máxima do modelo com a medida.

2.2 Modelos de radiação solar incidente em superfícies fotovoltaicas

A determinação da quantidade de radiação que chega ao solo depende da distância entre Sol e Terra, da posição do observador no globo terrestre e da transmissividade atmosférica no local. Como a dinâmica da interação Sol-Terra varia constantemente em função do deslocamento orbital, é preciso saber posicionar o Sol em relação ao observador. Diversos trabalhos e metodologias diferentes já foram propostas para determinar a posição solar, sendo que a precisão dos resultados dependem do número de parâmetros utilizados e aproximações utilizadas.

Modelos de previsão da radiação solar incidente são foco de estudo em diversos campos de engenharia há décadas, e muitos trabalhos são referenciados até hoje, como o modelo de transmissividade para radiação direta de Hottel (1975). A estimativa de radiação proposta por Iqbal (1983) entra na categoria dos modelos mais complexos, mas, apesar de mais preciso, possui menos aplicabilidade, já que o cálculo envolve conhecimento de dados de difícil acesso como nível de ozônio e gases aerossóis na atmosfera local.

O trabalho de Blanco-Muriel et al. (2001) apresenta uma revisão bibliográfica detalhada de diversas metodologias para computação do vetor resultante da posição do Sol, com finalidade de aplicação para sistemas de energia solar. Enquanto Wong e Chow (2001) fazem uma revisão dos principais modelos de radiação solar direta e difusa, comparando os resultados com dados de medições experimentais, e realizando uma previsão de radiação global média para a cidade de Hong Kong, China.

Em Vengatesh; Rajan (2012) é investigado a energia gerada por um módulo fotovoltaico com base em modelo de radiação solar em condições de céu limpo. É desenvolvido no Matlab/Simulink® o modelo de radiação com base na geometria Sol-Terra, porém não é feita uma análise em função do observador. Aproximações são feitas para determinar o caminho

ótico da luz e a posição terrestre, enquanto que a radiação calculada é empregada em um modelo de célula PV de um diodo. A temperatura não é considerada, fazendo com que os resultados obtidos por simulação possuem pouca confiabilidade quando comparados com curvas experimentais.

Uma análise mais completa é feita por Azzouzi et al. (2013), a respeito da otimização da performance de células fotovoltaicas em função da radiação solar. É feito uma simulação do modelo elétrico equivalente de dois diodos para o painel PV, levando em conta a radiação incidente e a temperatura de operação. Contudo, não é especificado no trabalho como todos os parâmetros internos foram calculados. O cálculo da radiação solar utilizado é bem detalhado, mas peca, como outros trabalhos, por usar modelo com coeficientes ajustados para um local diferente ao dos autores.

2.3 Modelos e métodos de rastreamento de painéis fotovoltaicos

A escolha pelo uso de rastreadores mecânicos para painéis fotovoltaicos ainda é amplamente discutido. O ganho energético é frequentemente questionado em detrimento do consumo elétrico, desgaste mecânico e aumento da manutenção necessária. A performance de um sistema de rastreamento solar de módulos PV é apresentada por Koussa et al. (2012), em um cenário de clima árido e quente. Cinco configurações diferentes de rastreadores são analisadas para diferentes condições de nebulosidade, através de medições de radiação incidente com piranômetro em diferentes posições. Com os dados levantados, uma simulação de um circuito equivalente de célula PV de quatro parâmetros é realizada afim de analisar a energia produzida para cada método. Contudo, não é apresentada validação experimental do modelo fotovoltaico e nem a temperatura de operação é utilizada como parâmetro.

Os autores Huang et al. (2013) estudam a eficiência de um rastreador solar de um eixo comparando com um painel em posição fixa. Também é estudado o efeito do desalinhamento da montagem em relação ao azimute, porém, o consumo elétrico para o rastreamento não é apontado em nenhuma condição. Os resultados apresentados são experimentais e para diferentes condições de nebulosidade, e apontam um aumento de até 39% na geração de energia elétrica.

A otimização do consumo elétrico do rastreador mecânico de dois eixos é descrita por Rambhawan; Oree (2014), propondo uma nova estratégia de acionamento do motor para correção de posição. Para reduzir a necessidade de movimentação excessiva, os autores utilizam

um sistema de quatro sensores de luminosidade e estudam o intervalo ideal para o acionamento eletromecânico, de modo que a potência desprendida não supere o ganho líquido do painel PV. Resultados experimentais da topologia são apresentados, assim como uma breve análise do tempo de retorno de investimento da tecnologia.

É desenvolvido por Tudorache; Kreindler (2010) um sistema de rastreamento com um eixo feito por um motor CC, controlado de acordo com a diferença de sinal entre dois sensores de luminosidade. Os autores afirmam que o sistema possui baixo consumo de energia, mas não descrevem detalhes valores quantitativos ou analisam diferentes estratégias ou otimização de posicionamento.

Uma modelagem da potência de saída de painéis fotovoltaicos com rastreador solar é realizada por Coelho (2010), apresentando o modelos de radiação incidente e de célula PV. É apresentada a matemática do circuito equivalente de um diodo com cinco parâmetros, e a versão simplificada com três parâmetros. Não é descrito, todavia, como foram obtidos os valores desses parâmetros, e não foi considerada o efeito da temperatura em toda a análise. Simulações foram feitas para prever a energia produzida para diferentes níveis de radiação para cenários do painel em montagem fixa, rastreamento com um e dois eixos. Os resultados comparados com medições experimentais em módulos de dois fabricantes diferentes. É mostrado, também, uma análise de desempenho dos rastreadores utilizados e da precisão do modelo de previsão de energia produzida.

2.4 Considerações finais

Baseado nas referências apresentadas e nas demais bibliografias utilizadas por esta dissertação, foi desenvolvido um modelo de predição da produção energética por painéis fotovoltaicos sob diferentes técnicas de rastreamento. A precisão dos resultados foi um dos pontos amplamente abordados, uma vez que foi percebida a utilização, em outros trabalhos, de aproximações para prever a posição do Sol e a radiação incidente. O modelo de transmissividade atmosférica utilizado foi modificado de modo a adequar os coeficientes para o local. Também foi feita uma modelagem minuciosa do painel fotovoltaico a ser usado para validação experimental, e apresentado em detalhes a matemática do circuito elétrico equivalente de um diodo. De modo a poder simular a energia elétrica gerada sob qualquer condição, foi proposta uma modelagem na qual todos os parâmetros internos são dependentes da radiação incidente e da temperatura de operação. Com as informações da radiação e do modelo PV, uma

análise da melhor estratégia de rastreamento com um ou dois eixos é estudada e comparada com montagem de painéis fixos com angulação ótima.

CAPÍTULO 3

MODELO FOTOVOLTAICO

A precisão da estimativa de produção energética de uma planta fotovoltaica é dependente não somente do recurso solar disponível para o local, mas, do conhecimento das características dos módulos solares utilizados.

Pelo comportamento não-linear do material semicondutor usado em painéis PV e a impossibilidade de medição direta de seus parâmetros, a célula fotovoltaica apresenta certa dificuldade em modelar seu circuito equivalente. Dessa forma, para uma análise detalhada de qual técnica de posicionamento de PVs traduziria em maior ganho de energia, este capítulo estuda e realiza a modelagem dos parâmetros de células solares.

3.1 Física do efeito fotovoltaico

A fotocondutividade é o fenômeno no qual a condutividade elétrica de um material é alterada devido a sua exposição à radiação eletromagnética. Tal comportamento ocorre amplamente nos elementos e ligas semicondutoras, uma vez que a energia necessária para desprender os elétrons da camada de valência comumente se encontra na faixa visível do espectro eletromagnético.

Este fenômeno físico é o fundamento utilizado para a construção de módulos PV para conversão direta de energia solar em energia elétrica. A característica principal do material semicondutor reside em sua condutibilidade elétrica estar entre os limites de condutor e isolante. Dentre os materiais utilizados para produção de painéis fotovoltaicos, essa dissertação trata apenas de células de silício (c-Si), cristalino e policristalino, uma vez que os painéis de silício ocupam entre 85% e 90% do mercado (EPIA, 2014)(IEA-ETSAP; IRENA, 2013).

A banda proibida do Silício, ou seja, a energia necessária para que o elétron transite da banda de valência para a banda de condução, possui valor de 1,12 eV, como ilustra a Figura 3.1. Portanto, de acordo com a relação de Planck-Einstein, Equação 3.1, é possível determinar

para um fóton com comprimento de onda igual ou superior a 1,13 μm se ele já é capaz de produzir o efeito fotovoltaico no Silício. Portanto, radiação eletromagnética com frequência nas faixas do infravermelho, visível e ultra violeta são suficientes para gerarem corrente elétrica em um painel fotovoltaico mono ou poli cristalino de Silício, como mostra a Figura 3.2.

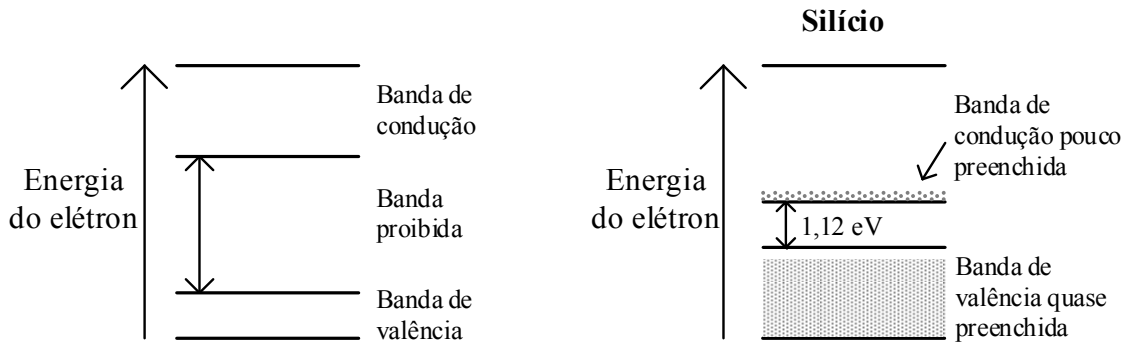


Figura 3.1 – Níveis de energia para o semicondutor e, em detalhe, para o silício.

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad (3.1)$$

onde h é a constante de Planck ($4,135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$), c é a velocidade da luz no vácuo ($2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$), e λ é o comprimento de onda do fóton, em metros.

O conhecimento do espectro de absorção de uma célula solar é fundamental para sua modelagem, uma vez que seus parâmetros sofrem diretamente influência do tipo e intensidade de radiação incidente. Mesmo se a faixa espectral não for a mais eficiente para produção de energia elétrica no silício, o infravermelho tem papel primário no efeito fotovoltaico, uma vez que é responsável pela maior parte de transferência de calor por radiação térmica.

A intensidade de radiação infravermelha afeta diretamente a temperatura de operação do módulo, o valor de seus parâmetros e, por consequência, a potência produzida. Apesar do conhecimento difundido do efeito da temperatura sob a eficiência de painéis fotovoltaicos, muitos trabalhos não levam devidamente em conta este aspecto na modelagem de parâmetros em células PV (COELHO, 2010)(NANJANAVAR; GANDHI; PATEL, 2013).

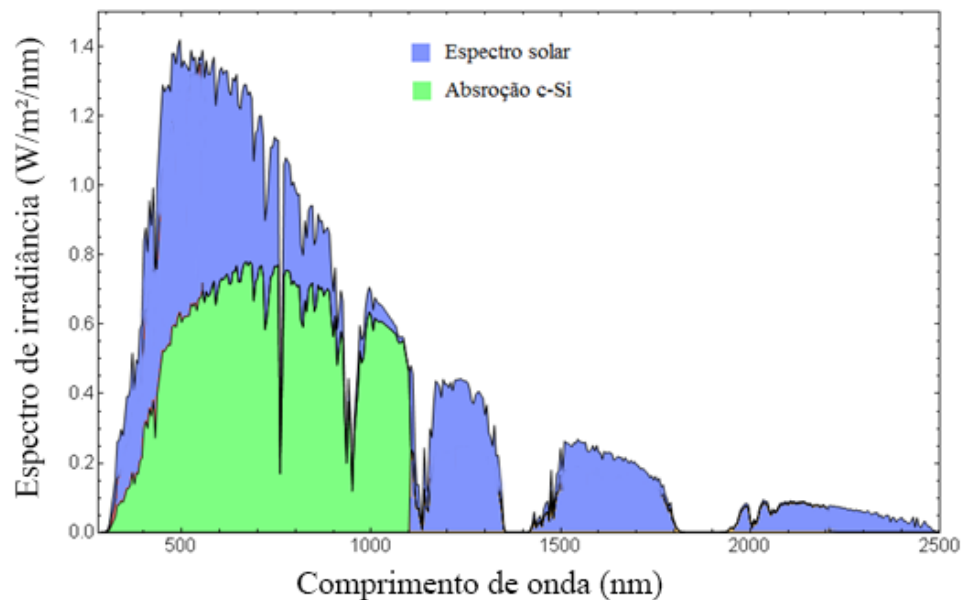


Figura 3.2 - Espectro solar na superfície terrestre e taxa de absorção do silício. (VIRIDIAN SOLAR, 2014)

3.2 Modelo equivalente com um diodo

O comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica pode ser representado matematicamente por diferentes circuitos equivalentes, mas o modelo com um diodo é o mais difundido para modelar células mono e poli cristalinas de silício por apresentar simplicidade e precisão ((LINEYKIN; AVERBUKH; KUPERMAN, 2014)). O funcionamento da célula PV, então, pode ser descrito como na Figura 3.3 e Tabela 3.1, tendo em vista que o circuito é considerado do tipo caixa-preta, já que não se tem acesso direto a nenhum destes componentes.

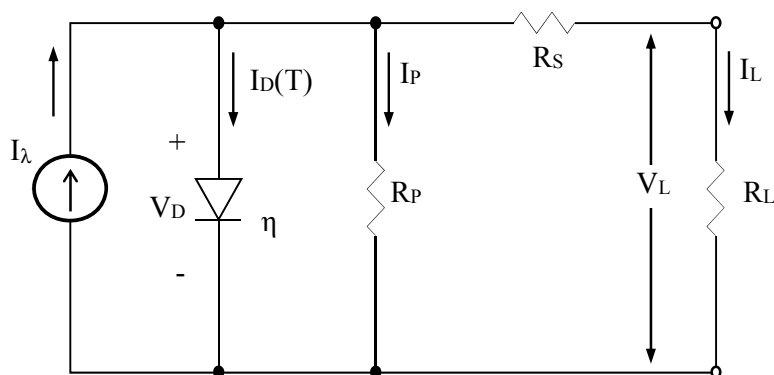


Figura 3.3 - Circuito equivalente de um diodo da célula fotovoltaica.

Tabela 3.1 - Identificação de parâmetros do modelo de um diodo.

Símbolo	Identificação
I_λ	Corrente foto gerada
V_D	Tensão na junção $p-n$
I_D	Corrente na junção $p-n$
η	Constante de idealidade do diodo
R_P	Resistência paralela
R_S	Resistência série
V_L e I_L	Tensão e corrente de saída da célula
R_L	Carga

Uma célula PV de Si constitui-se apenas de finas camadas do material semicondutor dopado, formando uma junção $p-n$ para permitir o efeito fotovoltaico. Assim, a intenção da modelagem deste dispositivo reside em se obter os parâmetros do circuito equivalente de modo a poder reproduzir o efeito elétrico do painel fotovoltaico. Como as únicas variáveis a que se tem acesso são a corrente e tensão de saída da célula solar, deve-se obter uma maneira de determinar o restante dos parâmetros através de V_L e I_L . Por análise das malhas de Kirchoff do circuito da Figura 3.3, a corrente na saída do PV pode ser descrita pela Equação 3.2.

$$I_L = I_\lambda - I_D - I_P \quad (3.2)$$

a qual pode ser reescrita pela Equação 3.3, levando em conta a equação de Schockley para o diodo.

$$I_L = I_\lambda - I_S(e^{V_D/\eta V_T} - 1) - \frac{V_P}{R_P} \quad (3.3)$$

onde I_S é a corrente de saturação reversa do diodo, e V_T é a tensão térmica do semicondutor, que é a relação entre o fluxo de corrente e o potencial eletrostático na junção $p-n$. A tensão térmica é dada pela Equação 3.4, e depende no valor absoluto da temperatura de operação da junção, nesse caso, da célula de Silício.

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3.4)$$

onde k é a constante de Boltzmann, igual a $1,3806 \times 10^{-23}$ J/K, q a magnitude da carga do elétron, $1,6022 \times 10^{-19}$ C, e T a temperatura em Kelvin.

3.2.1 Características de corrente vs tensão da junção PV

Baseando-se na Equação 3.2 e no comportamento $I \times V$ do painel fotovoltaico, é possível delimitar três pontos distintos de operação que são de suma importância para a compreensão e modelagem de células solares. São eles:

- Ponto de curto-circuito (SC);
- Ponto de máxima potência (ou nominal);
- Ponto de circuito aberto (OC).

Tabela 3.2A Tabela 3.2 mostra um resumo do modelo de um diodo para cada ponto de operação, enquanto a Figura 3.4 ilustra uma curva característica genérica de corrente vs. tensão PV.

Tabela 3.2 - Equações de carga e do diodo PV para os três diferentes pontos de operação.

Condição	Carga	Tensão na carga	Corrente na carga	Tensão no diodo PV	Corrente no diodo PV
Curto-circuito	$R_L = 0$	$V_L = 0$	$I_L = I_{SC}$	$V_{D,SC} = I_{SC} \cdot R_S$	$I_{D,SC} = I_S \left(e^{I_{SC} R_S / \eta V_T} - 1 \right)$
Nominal	R_L	$V_L = I_L R_L$	I_L	$V_D = I_L (R_S + R_L)$	$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$
Circuito Aberto	$R_L = \infty$	$V_L = V_{OC}$	$I_L = 0$	$V_{D,OC} = V_{OC}$	$I_{D,OC} = I_S \left(e^{V_{OC} / \eta V_T} - 1 \right)$

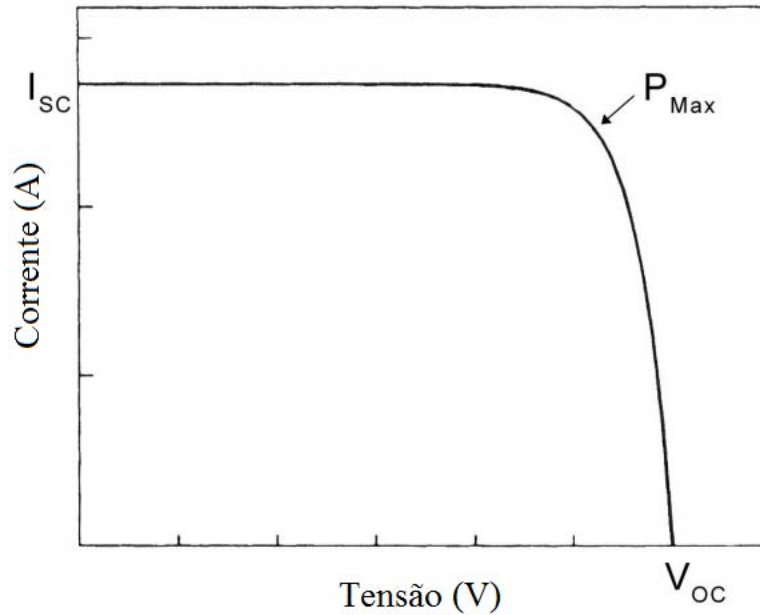


Figura 3.4 – Curva $I \times V$ característica de uma célula PV genérica.

3.3 Equacionamento dos parâmetros

Para modelar a célula PV é preciso determinar equações para cada parâmetro do circuito equivalente da Figura 3.3, como descrito no decorrer desta seção.

3.3.1 Corrente fotogerada

A corrente elétrica produzida por uma célula fotovoltaica é dependente da intensidade de radiação incidente assim como sua temperatura de operação. No primeiro caso, como descrito na seção 3.1, quanto maior for a radiação, maior será a taxa de fótons com energia suficiente para excitar elétrons da banda de valência à condução.

Com o aumento da temperatura da junção $p-n$, a energia cinética média dos elétrons do semicondutor aumenta e, por consequência, o valor da banda proibida diminui. O menor limite da banda proibida permite com que o material libere mais facilmente elétrons e torne-se condutor e produtor de corrente fotovoltaica.

A relação entre a corrente fotogerada, I_λ , com a radiação incidente e a temperatura pode ser descrita pela Equação 3.5.

$$I_\lambda(G, T) = I_\lambda^{STC} \frac{G}{G^{STC}} [1 + \mu_i(T - T^{STC})] \quad (3.5)$$

onde G a intensidade da radiação incidente, em W/m^2 , μ_i o coeficiente de temperatura para corrente da célula PV, e pode ser determinado através dos dados fornecidos pelo fabricante.

Os índices “*STC*” (*standard test conditions*) representam os valores das variáveis para condições padrão de teste de 1000 W/m^2 e $25 \text{ }^\circ\text{C}$, para radiação incidente e temperatura, respectivamente.

3.3.2 Tensão de circuito aberto

Para determinada condição de radiação incidente e temperatura, a máxima tensão que pode ser obtida de uma célula fotovoltaica é a de circuito aberto, V_{OC} , que corresponde ao valor da tensão sob o diodo interno quando toda a corrente foto gerada passar por ele.

Ao contrário da corrente gerada pela célula, a tensão V_{OC} diminui com o aumento da temperatura, fato que é o causador da queda da eficiência de painéis PV devido a sobreaquecimento. Isso se deve a tensão na junção $p-n$ depender inversamente da concentração intrínseca do semicondutor que, por sua vez, aumenta com a temperatura (REGGIANI et al., 2002).

Baseando-se no modelo de Van Dyk et al., (2002) para V_{OC} e adaptado para levar em conta o efeito da temperatura, a tensão de circuito aberta pode ser expressa de acordo com a Equação 3.6.

$$V_{OC}(G, T) = \frac{V_{OC}^{STC}}{1 + \mu_V \cdot \ln(G^{STC}/G)} \cdot \left(\frac{T^{STC}}{T}\right)^\psi \quad (3.6)$$

O coeficiente ψ refere-se a não-linearidade do efeito da temperatura sobre a tensão da célula PV e é expresso pela Equação 3.7, e μ_V o coeficiente de temperatura para tensão, que, assim como μ_i , pode ser obtido pelo *datasheet* do fabricante.

$$\psi = \frac{\ln(V_{OC,0}/V_{OC,1})}{\ln(T_1/T_0)} \quad (3.7)$$

A Equação 3.7 pode ser resolvida, também, com dados fornecidos pelo fabricante para as condições padrão de teste (STC) e condições normais de operação (NOC).

3.3.3 Corrente de saturação reversa

A corrente de saturação reversa, I_s , de um painel fotovoltaico possui a mesma origem teórica que a de um diodo, uma vez que se deve à recombinação de portadores na junção $p-n$. Na condição de circuito aberto a corrente de saída da célula PV é nula, e a tensão sobre os ramos da resistência paralela e o diodo são iguais a V_{OC} . Dessa forma, a Equação 3.3 pode ser reescrita conforme a Equação 3.8.

$$0 = I_{\lambda} - I_s \left(e^{\frac{V_{OC}}{\eta V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{OC}}{R_p} \quad (3.8)$$

Sendo que a variável I_s pode ser isolada, resultando na Equação 3.9.

$$I_s(G, T) = \frac{I_{\lambda(G, T)} - \left(\frac{V_{OC(G, T)}}{R_p} \right)}{e^{\left(\frac{q V_{OC(G, T)}}{\eta k T} \right)} - 1} \quad (3.9)$$

Fisicamente, a corrente de saturação reversa depende do quadrado da concentração de portadores no semicondutor, e esta, por sua vez, está diretamente ligada ao triplo da temperatura (MOLE et al., 1998)(VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009). Portanto, uma variação mínima da temperatura de operação do painel PV causa forte alteração no valor de I_s . Dessa forma, a Equação 3.10 apresenta uma correção para o valor da corrente de saturação reversa de acordo com a temperatura.

$$I_{s, PV}(G, T) = I_s(G, T) \left(\frac{T}{T^{STC}} \right)^3 e^{\left(\frac{q \cdot E_g}{\eta \cdot k} \right) \left(1 - \frac{T^{STC}}{T} \right)} \quad (3.10)$$

onde E_g é o valor da energia da banda proibida do semicondutor que, para o silício, vale 1,12 eV.

Assim, substituindo a Equação 3.8 em 3.9, obtém-se a corrente de saturação reversa da célula fotovoltaica sob qualquer condição de operação, descrito pela Equação 3.11:

$$I_{S,PV}(G, T) = \frac{I_{\lambda}(G, T) - (V_{OC}(G, T)/R_P)}{e^{(q \cdot V_{OC}(G, T)/\eta \cdot k \cdot T)} - 1} \left(\frac{T}{T^{STC}}\right)^3 e^{(q \cdot E_g/\eta \cdot k) \left(1 - \frac{T}{T^{STC}}\right)} \quad (3.11)$$

3.3.4 Fator de idealidade do diodo

A relação como um diodo segue o comportamento ideal é definido pela equação de Shockley denominando-se fator de idealidade do diodo, η . Essa discrepância se deve às recombinações entre portadores minoritários e majoritários não ocorrerem somente entre a banda de valência e a banda de condução, e serem influenciadas pelo nível de dopagem do semiconductor.

O valor de η pode ser determinado através de valores encontrados no *datasheet* do módulo PV condição STC. Em curto-circuito, a Equação 3.3 pode ser reescrita da forma apresentada na Equação 3.12.

$$I_{SC}^{STC} = I_{\lambda}^{STC} - I_S^{STC} \left[e^{\left(\frac{R_S \cdot I_{SC}^{STC}}{\eta \cdot V_T^{STC}} \right)} - 1 \right] - \frac{R_S \cdot I_{SC}^{STC}}{R_P} \quad (3.12)$$

Sabe-se que o valor da resistência paralela é muito maior que o da resistência série, $R_P \gg R_S$, e considerando o baixo valor da corrente de saturação reversa, é bem aceito na literatura que a Equação 3.12 pode ser reduzida a Equação 3.13.

$$I_{\lambda}^{STC} \approx I_{SC}^{STC} \quad (3.13)$$

Substituindo as Equações (3.9) e (3.13) na Equação (3.3), para a condição de máxima potência, é possível resolver o valor η com valores de tensão e corrente encontrados nos dados fornecido pelo fabricante, como descrito pela Equação 3.14 (COELHO; CONCER; MARTINS, 2009).

$$\eta = \frac{V_{MP} - V_{OC} + R_S I_{MP}}{V_T \cdot \ln \left[\frac{I_{SC} - V_{OC} - \left(\frac{V_{MP} + R_S I_{MP}}{R_P} \right)}{I_{SC} - V_{OC} / R_P} \right]} \quad 3.14$$

onde os índices “ MP ” referem-se aos valores de corrente e tensão da célula PV em seu ponto de máxima potência, η pode ser encontrado assumindo os valores de temperatura, corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto na condição STC.

3.3.5 Resistências paralelo e série

As perdas e fugas na geração de energia elétrica em uma célula fotovoltaica são representadas pela resistência paralela, R_P , e série, R_S , como já ilustradas na Figura 3.3. A primeira relaciona-se com a resistência intrínseca do canal de depleção da junção semicondutora, ou por correntes parasitas no material da célula PV devido a imperfeições de fabricação ou danificações. Já a resistência série é devido à própria condutividade do material e demais trilhas de conexão existentes nos painéis fotovoltaicos.

Com as equações das seções 3.2 até 3.3.4, é possível criar um modelo de célula fotovoltaica, sendo R_S e R_P os últimos parâmetros ainda desconhecidos. Um equacionamento direto para determinar esses valores não é possível devido as diversas não-linearidades do modelo elétrico da célula PV.

Diversos trabalhos propõem métodos iterativos, numéricos ou gráficos para resolver as variáveis do modelo de um diodo do painel PV. A modelagem das resistências série e paralela utilizadas nesta dissertação seguiu a proposta de (FARRET; LENZ; TRAPP, 2011), que se baseia em ensaios práticos com um painel fotovoltaico.

3.3.6 Correção de temperatura sobre R_S e R_P

Os trabalhos citados anteriormente consideram os valores das resistências série e paralelo como constantes para toda a faixa de operação das células PVs. O modelo proposto por (FARRET; LENZ; TRAPP, 2011) também não assume variações para R_S e R_P , apesar dos autores admitirem a influência da temperatura sobre essas variáveis.

Assim como os parâmetros descritos nas seções anteriores, as resistências série e paralelo são representações elétricas para descrever o comportamento físico do fenômeno fotovoltaico, sendo, portanto, características intrínsecas ao semicondutor. Dessa forma, a temperatura de operação da célula PV afeta, também, os valores de R_S e R_P .

A mobilidade intrínseca, μ_L , na camada de condução do semiconductor é limitada pelo espalhamento das lacunas existentes. O aumento da temperatura resulta em um maior desordenamento das lacunas, reduzindo a mobilidade e, portanto, a condutividade do material (MOLE et al., 1998). A Equação 3.13 apresenta a relação entre mobilidade e temperatura.

$$\mu_L = \mu_o \left(\frac{T}{T_o}\right)^{-\sigma} \quad 3.15$$

onde μ_o é o valor da mobilidade para uma temperatura de referência T_o , e σ o coeficiente de não-linearidade do material para temperatura.

Para obter um maior detalhamento na modelagem de painéis fotovoltaicos, esta dissertação utilizou um método próprio de ajuste paramétrico de R_s e R_p , de modo a inserir uma correção para o efeito da temperatura. Com os valores de resistências obtidos pela metodologia (FARRET; LENZ; TRAPP, 2011) como referência, foi desenvolvido um processo iterativo para corrigir o erro entre o modelo matemático descrito até aqui e valores experimentais, como ilustrado na Figura 3.5.

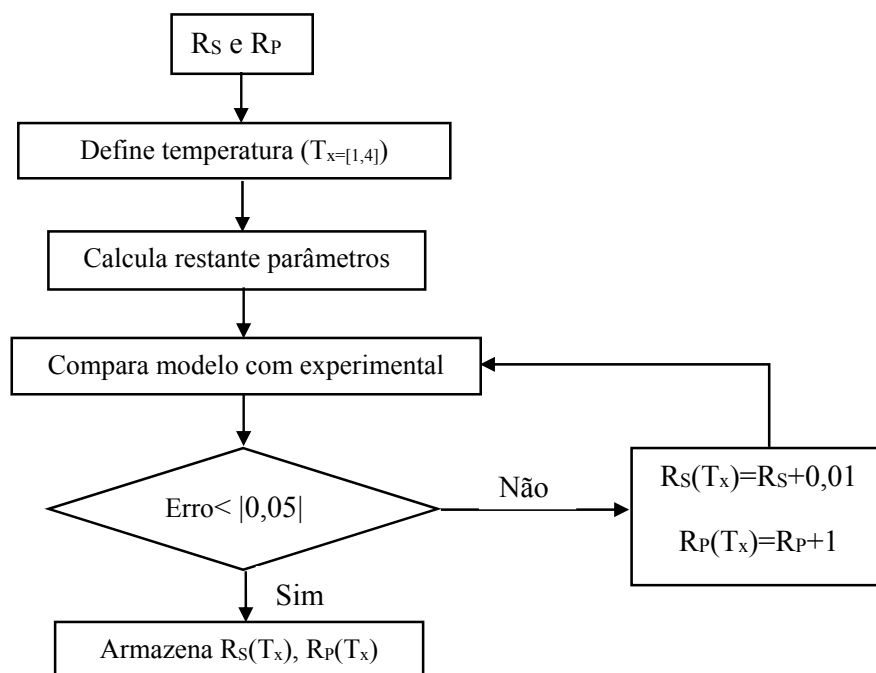


Figura 3.5 - Diagrama de blocos do processo iterativo para correção dos valores de R_s e R_p .

Uma vez determinados valores de R_S e R_P para quatro temperaturas diferentes - STC, NOC (*Normal Operating Conditions*) e dois valores medidos experimentalmente – foi realizado um ajuste nos coeficientes para incluir as resistências na não-linearidade do semicondutor sob variação de temperatura, de acordo com as Equações 3.16 e 3.17.

$$R_S(T) = a_1 e^{-b_1 \cdot T} + c_1 \quad 3.16$$

$$R_P(T) = a_2 e^{-b_2 \cdot T} + c_2 \quad 3.17$$

onde a , b e c são os coeficientes de ajuste paramétrico para R_S e R_P em função da temperatura.

3.3.7 Fator de preenchimento

A relação entre o ponto de máxima potência, em determinada condição, e os valores máximos de tensão e corrente, I_{SC} e V_{OC} , da célula fotovoltaica é chamado de fator de preenchimento (FF, *fill factor*). A Equação 3.18 expressa o valor do FF com correção do efeito das resistências internas (GREEN, 1992).

$$FF(G, T) = FF_0 \cdot \left\{ \left(1 - 1.1 \cdot R_S(T) \right) + \frac{R_S(T)^2}{5.4} \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{V_{OC}(G, T) + 0.7}{V_{OC}(G, T)} \cdot \frac{FF_0(G, T)}{R_P(T)} \left[\left(1 - 1.1 \cdot R_S(T) \right) + \frac{R_S(T)^2}{5.4} \right] \right\} \quad (3.18)$$

onde FF_0 é o valor do fator de preenchimento de referência, dado pela Equação 3.19.

$$FF_0 = \frac{V_{OC}(G, T) - \ln(V_{OC}(G, T) + 0.72)}{V_{OC}(G, T) + 1} \quad (3.19)$$

Assim, a máxima potência, em dada condição, da célula PV pode ser obtida através da Equação 3.20.

$$P_{MAX}(G, T) = FF(G, T) \cdot V_{OC}(G, T) \cdot I_{SC}(G, T) \quad (3.20)$$

3.3.8 Temperatura de operação

Um modelo simples para prever a temperatura de operação de um painel PV em função da temperatura ambiente e radiação incidente é descrito pela Equação 3.21, (SKOPLAKI; BOUDOUVIS; PALYVOS, 2008)

$$T_C = T_a + \left(\frac{G}{G^{NOC}} \right) (T^{NOC} - T_a^{NOC}) \quad (3.21)$$

sendo T_a a temperatura ambiente, T^{NOC} a temperatura de operação do painel em condição NOC e T_a^{NOC} a temperatura ambiente de referência para a mesma condição.

3.4 Modelo da célula fotovoltaica

Com a teoria e o equacionamento discutidos nas Seções 3.2 e 3.3, criou-se as ferramentas necessárias para modelar o comportamento corrente vs. tensão de células PV em função apenas da radiação incidente e da temperatura de operação.

Com os valores de R_S , R_P e η calculados de acordo com as Seções 3.3.4, 3.3.5 e 3.3.6, e substituindo as Equações 3.5, 3.7 e 3.11 na Equação 3.3, escreve-se a Equação 4.16 que representa o modelo matemático usado nesta dissertação.

$$I_{SC}(G, T) - I_{S,PV}(G, T) \left(e^{\frac{(V_L + R_S(T) \cdot I_L)}{\eta \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V_L + R_S(T) \cdot I_L}{R_P(T)} - I_L = 0 \quad 3.22$$

A Figura 3.6 apresenta um diagrama de blocos do processo de caracterização da curva $I \times V$ através da Equação 3.16.

3.5 Resumo do Capítulo

O efeito fotovoltaico foi estudado nesse capítulo, com a finalidade de compreender os principais fatores que influenciam no desempenho de um painel PV. O modelo elétrico equivalente de um diodo foi apresentado, junto com a descrição dos parâmetros e as equações que regem seu comportamento. A dependência da célula PV com a temperatura foi amplamente

detalhada, e uma metodologia para modelar os parâmetros internos do painel em função tanto da radiação incidente quanto da temperatura foi apresentada.

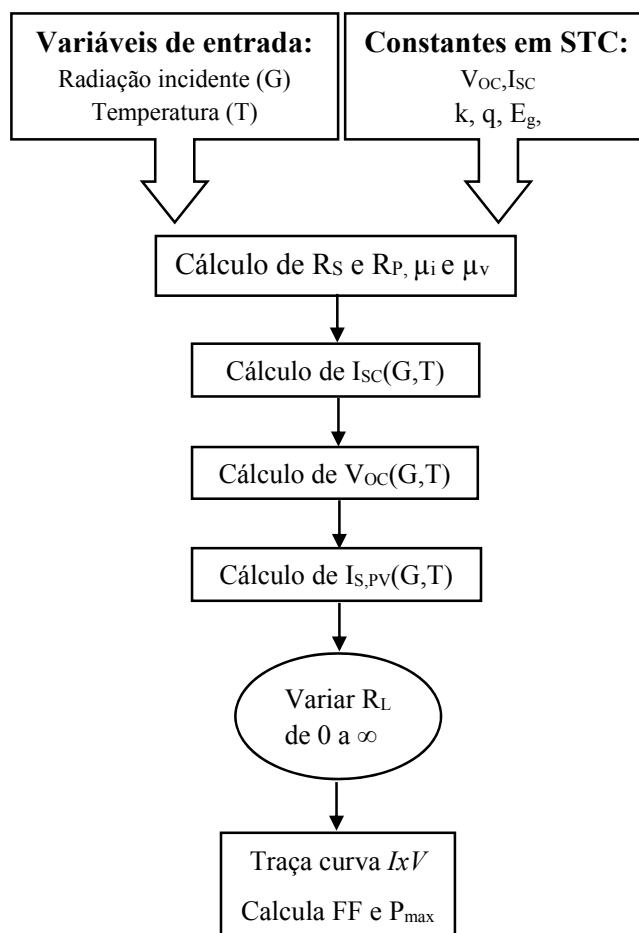


Figura 3.6 - Diagrama em blocos da ordem de cálculos para o modelo proposto da célula fotovoltaica.

Com o modelo descrito neste capítulo, torna-se possível determinar a característica corrente vs. tensão de um painel PV em qualquer condição de operação, assim como a máxima potência possível de ser produzida. Os resultados da modelagem proposta são apresentadas no Capítulo 5.

CAPÍTULO 4

MODELO DE RADIAÇÃO INCIDENTE EM SUPERFÍCIES

Um dos parâmetros fundamentais para análise da performance de um sistema fotovoltaico é a informação a respeito da irradiância do local da instalação. Bancos de dados meteorológicos e atlas solarimétricos são ferramentas úteis, porém, limitadas, uma vez que contabilizam a radiação na superfície horizontal e, muitas vezes, valores extrapolados de medições em outros locais.

O estudo confiável do desempenho de um rastreador solar mecânico requer o conhecimento da radiação incidente em uma superfície orientada arbitrariamente e a qualquer momento. Dessa forma, o conhecimento da posição solar em referência ao solo e a quantidade de energia solar disponível tornam-se fundamentais.

Este capítulo apresenta o desenvolvimento matemática para modelar a interação entre Sol e Terra, e as transformações de coordenadas para poder se determinar a posição solar em relação ao observador. Também é descrito o cálculo da radiação incidente, através de modelo de transmissividade da atmosfera. Finalmente, são descritas as técnicas de rastreamento mecânico estudadas nessa dissertação.

4.1 Energia solar disponível

A radiação emitida pelo Sol aproxima-se do espectro da emissão de um corpo negro com temperatura de 5.777 K, com potência média de $6.33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$. Desse montante, a radiação eletromagnética que incide na estratosfera terrestre é reduzida pelo quadrado da distância, e possui valor médio de 1367 W/m^2 , ilustrado a Figura 4.1.

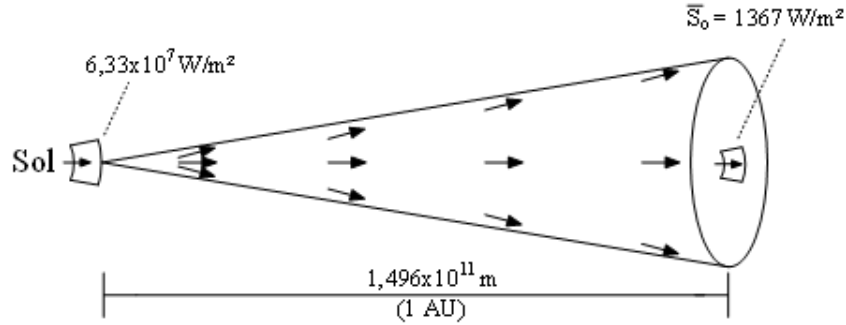


Figura 4.1 - Diferença entre radiação emitida pelo Sol e que atinge a Terra.

A constante solar, \overline{S}_0 , é definida como a radiação média incidente na Terra, mas seu valor é tomado com a distância Sol-Terra igual a 1 AU, ou seja, a distância média entre os corpos, que vale $1,496 \times 10^{11}$ m. Portanto, para melhor precisar a quantidade de energia incidente na Terra, a constante solar é corrigida para adequar à variação da distância Sol-Terra de acordo com a excentricidade da órbita elíptica terrestre, como na Equação 4.1, (WONG; CHOW, 2001).

$$S_o = \overline{S}_0 \cdot [1,00011 + 0,03422 \cdot \cos(\Gamma) + 0,00128 \cdot \sin(\Gamma) + 0,000719 \cdot \cos(2\Gamma) + 0,000077 \cdot \sin(2\Gamma)] \quad (4.1)$$

onde D é o dia do ano, variando de 1 a 365 a partir de 1º de janeiro, e Γ a transformação angular do número do dia, dado em radianos pela Equação 4.2.

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{D-1}{365} \right) \quad (4.2)$$

4.2 Radiação incidente na superfície terrestre

Da radiação solar que atinge a Terra, cerca de 30% incide na superfície terrestre em um dia de céu limpo, devido a absorção e espalhamento por diferentes camadas da atmosfera (MASTERS, 2004). Em dias com alto índice de nebulosidade, essa absorção chega a índices de 80 a 90%.

A radiação solar global, S_{global} , representada pela Equação 4.3, é a quantidade do espectro presente na superfície terrestre, e pode ser decomposta em três fontes de contribuição:

- i. **Direta:** componente mais determinante em um dia sem nuvens, é a radiação que incide no observador em direção colinear ao Sol;
- ii. **Difusa:** radiação proveniente de espalhamento nas moléculas presentes na atmosfera, portanto, incide sob todas as direções;
- iii. **Refletida:** com menor contribuição, é a radiação solar refletida por outras superfícies, mais presente em perímetros urbanos.

$$S_{global} = S_{direta} + S_{difusa} + S_{refletida} \quad (4.3)$$

As próximas subseções apresentam o detalhamento do modelo utilizado nessa dissertação para calcular a intensidade da radiação solar incidente em uma superfície.

4.2.1 Massa de ar e radiação direta

O comprimento do caminho ótico que deve ser percorrido pela radiação solar da atmosfera até um determinado ponto na superfície terrestre é definido como massa de ar, AM , expresso pela Equação 4.4. O índice possui valor zero para radiação incidente na estratosfera, $AM0$, é igual a um quando o Sol está na vertical ao solo, $AM1$, e aumenta conforme se aproxima do horizonte.

$$AM = \frac{L}{L_0} \quad (4.4)$$

onde L é a distância percorrida pela luz na atmosfera, e L_0 a distância da atmosfera normal ao ponto em questão, ou seja, a distância de zênite, como indica a Figura 4.2.

A transmissividade da atmosfera varia de acordo com a localidade, além da altura de camada de ar existente, dependendo dos índices de transmissividade por espalhamento de Rayleigh, vapor d'água, ozônio, e outros gases aerossóis (IQBAL, 1983). Uma modelagem precisa da radiação incidente no solo, portanto, é complexa e depende do conhecimento de variáveis com pouco acesso de medição.

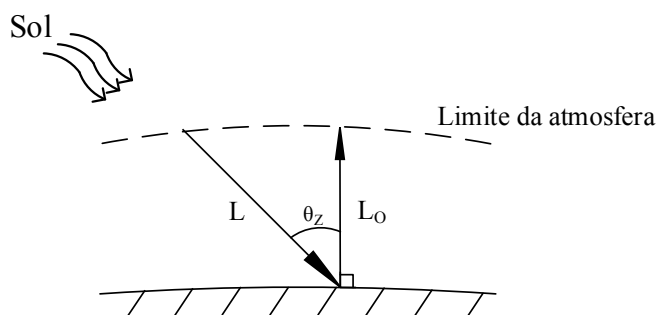


Figura 4.2 - Caracterização da massa de ar a ser percorrida pela luz solar.

Para contornar esse problema, muitos trabalhos empregam somente uma proporcionalidade direta da radiação incidente com o ângulo entre L e L_0 (VENGATESH; RAJAN, 2011). O modelo de massa de ar equivalente ao inverso do cosseno do ângulo zenital do Sol, θ_z , contudo, assume que a Terra é chata e despreza as vicissitudes da transmissividade atmosférica, prejudicando sua acurácia para posições do Sol ao anoitecer e amanhecer. Nessa dissertação, foi utilizado o modelo de (KASTEN; YOUNG, 1989) para a camada de ar, expresso pela Equação 4.5.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0,50572(96,07995 - \theta_z)^{-1,6364}} \quad (4.5)$$

A intensidade da radiação direta que incide no solo pode ser determinada, então, com uso das Equações 4.1 e 4.4, através da Equação 4.6.

$$S_{direta} = S_0 \cdot 0,7^{0,678 \cdot (AM)} \quad (4.6)$$

4.2.2 Radiação difusa

A componente difusa corresponde entre 10% e 15% da radiação solar global em um dia sem nuvens (MASTERS, 2004), quantia considerável para uma análise de produção de energia em painéis fotovoltaica e, portanto, deve ser levada em conta na modelagem de irradiância.

Apesar de o primeiro quilometro, acima do nível do mar, possuir apenas 11% da massa de ar, é nele que se encontra 38% do vapor de água. E por este ser altamente suscetível a variações de temperatura, a transmissividade atmosférica varia sazonalmente e de acordo com

o clima local. A intensidade de radiação difusa presente deve, portanto, depender dessa mudança anual na transmissividade.

Para o cálculo da radiação difusa nessa dissertação, foi utilizado como base o modelo proposto por (HOTTEL, 1976), e, então, modificado com a transmissividade sugerida por (WOODWARD; BARKER; ZYSKOWSKI, 2001), descrito pela Equação 4.7.

$$S_{difusa} = S_o \cdot \cos(\theta_z)(0,2710 - 0,2939 \cdot \tau) \quad (4.7)$$

sendo τ a transmissividade atmosférica para o local, expressa pela Equação 4.8.

$$\tau = A + B \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{D - D_f}{365}\right) \quad (4.8)$$

onde A é a transmissividade média para céu limpo, B o fator de variação de amplitude anual e D_f uma correção para o Hemisfério Sul ($D_f = 174$).

Os coeficientes A e B foram inicialmente tomados como os propostos por (WOODWARD; BARKER; ZYSKOWSKI, 2001), e após ajustados parametricamente com dados obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia.

4.2.3 Radiação refletida

Do total de radiação, direta e difusa, que chega ao solo, uma parte é refletida. A quantidade de radiação solar refletida depende das características do solo em questão, como refletância, rugosidade e área disponível. Um modelo simples e amplamente utilizado para o cálculo dessa variável se baseia no produto do índice de refletância do solo e a soma das radiações direta e difusa (MASTERS, 2004), como mostra a Equação 4.9.

$$S_{refletida} = \rho \cdot (S_{direta} + S_{difusa}) \quad (4.9)$$

onde ρ é o índice de refletância do solo, e é adotado desde 0,1 para solos de cascalho até 0,8 para superfície coberta por neve.

4.3 Posição do Sol

A determinação da posição do Sol na esfera celeste, em qualquer instante e local, apoia-se em dois pilares: a dinâmica da geometria entre Sol e Terra e a transformação de coordenadas para o observador.

4.3.1 Conversão temporal

O primeiro ponto a ser observado remete ao fato de o tempo marcado civilmente não corresponder, na grande maioria dos casos, ao ciclo solar. A passagem do tempo é medida pela rotação da Terra sobre seu próprio eixo, e o ângulo horário (ω) expressa a distância angular entre o Meridiano de um astro na esfera celeste, e o Meridiano do observador local, como mostra a Figura 4.3.

A passagem de horas do tempo solar (t_s) também é baseada no sistema de 24 horas, e a marca de 12:00 horas corresponde ao Sol estar posicionado no Meridiano local, ou seja, sobre o eixo Norte-Sul de um observador. O ângulo horário solar, descrito na Equação 4.10, vale zero no instante que atinge seu ponto mais alto no céu.

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (4.10)$$

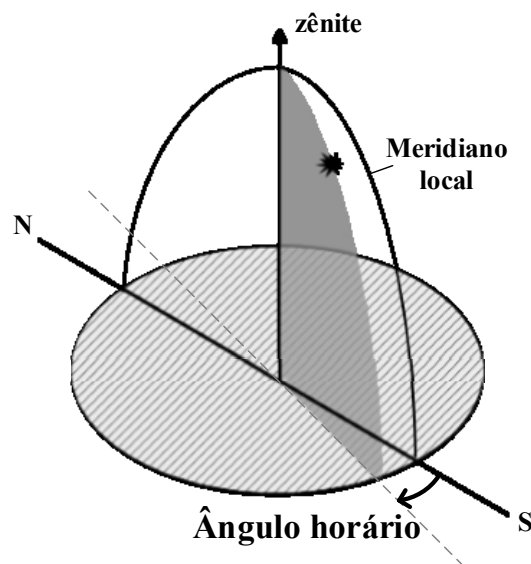


Figura 4.3 - Representação do ângulo horário de um corpo celeste.

Porém, civilmente, existem 24 fusos horários com 15° de longitude de largura, centrados em um Meridiano. Somente sobre esse ponto central de cada fuso o relógio local coincide com solar, nos demais locais é preciso uma conversão para determinar a posição do Sol de acordo com o tempo local (TL). A correção do tempo solar para o tempo local é dada, em horas, pela Equação 4.11.

$$TL = t_s - \frac{ET}{60} + CL + H_v \quad (4.11)$$

onde ET é a Equação do Tempo, CL a correção de longitude, e H_v a correção por horário de verão. Cada variável apresentada nesta seção é descrita em detalhes a seguir.

4.3.1.1 Equação do Tempo

A posição do Sol no céu não depende somente da rotação terrestre, mas também da excentricidade da órbita e da obliquidade do eixo terrestre, dois fenômenos cíclicos. A soma desses efeitos faz com que o Sol, em uma mesma data e hora separadas pelo período de 1 ano, tenha posições levemente diferentes. A Equação do Tempo determina essa discrepância tal como descrita pelas Equações 4.12 a 4-15:

$$ET = 720(c - ||c||) \quad (4.12)$$

$$c = \frac{a - \arctan\left(\frac{\tan(b)}{\cos(23,44)}\right)}{180} \quad (4.13)$$

$$b = a + 1,914 \cdot \text{sen}\left[\frac{360}{365,24}(D - 2)\right] \quad (4.14)$$

$$a = \frac{360}{365,24}(D + 10) \quad (4.15)$$

onde D é o dia do ano.

4.3.1.2 Correção de longitude

A conversão entre tempo solar e tempo local requer conhecimento do dia ano e das condições locais. Como a divisão dos fusos horários muitas vezes é política e econômica, e não geográfica, é preciso também aplicar uma correção de longitude entre o meridiano local e o do fuso horário do observador, como indica a Equação 4.16.

$$CL = \frac{(longitude\ local) - (longitude\ do\ fuso\ local)}{15} \quad (4.16)$$

4.3.1.3 Horário de verão

Ainda, se for o caso, deve-se corrigir a existência de Horário de verão no local do observador, com H_v igual a 1 (hora), ou 0 se não for aplicado.

4.3.2 Ângulo de declinação

Devido à inclinação do eixo polar da Terra em relação à sua órbita, existe um ângulo entre o plano equatorial e a linha que une os centros do Sol e da Terra. Este ângulo é denominado declinação (δ) e através dele que marca-se os inícios de estações.

O ângulo de declinação, em função do dia do ano, é dado pela Equação 4.17.

$$\delta = -\arcsen\{0,39779 \cdot \cos[0,98565(D + 10) + 1,914 \cdot \sen(0,98565(D - 2))]\} \quad (4.17)$$

4.3.3 Ângulos entre observador e Sol

A geometria da interação Terra-Sol toma como referência o centro dos dois corpos, de modo que o Sol é posicionado em função do ângulo horário e declinação, em um sistema de coordenadas com dois eixos no plano equatorial, e o terceiro sendo o eixo de rotação terrestre, como mostra a Figura 4.4.

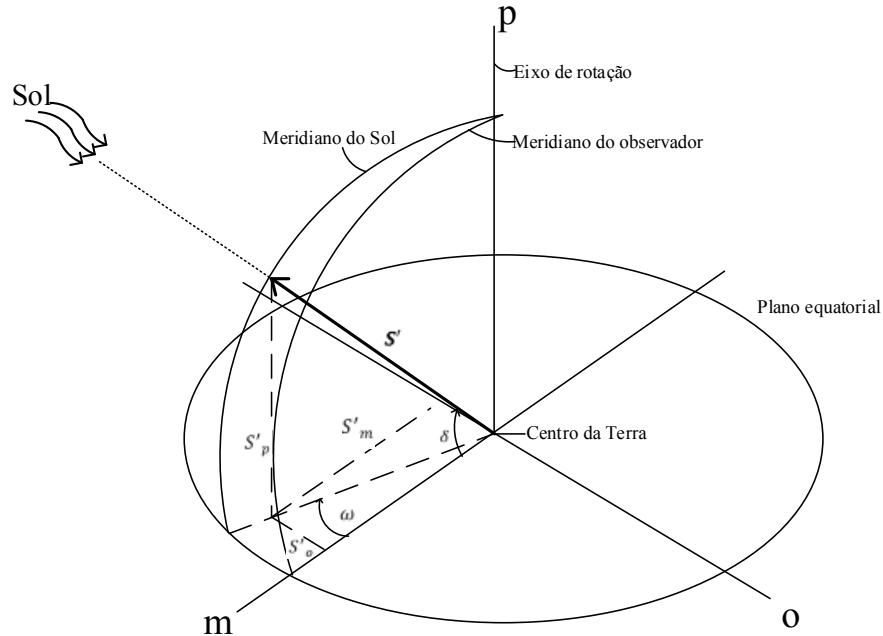


Figura 4.4 - Representação gráfica do sistema de coordenadas para posicionamento do Sol com origem no centro da Terra.

O vetor resultante S' , que marca a posição do Sol, pode ser escrito pelas Equações 4.18 até 4.21.

$$\mathbf{S}' = S'_m \cdot \mathbf{i}' + S'_o \cdot \mathbf{j}' + S'_p \cdot \mathbf{k}' \quad (4.18)$$

$$S'_m = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (4.19)$$

$$S'_o = \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega) \quad (4.20)$$

$$S'_p = \text{sen}(\delta) \quad (4.21)$$

onde \mathbf{i}' , \mathbf{j}' e \mathbf{k}' são vetores unitários nos eixos m , e e p , respectivamente.

O primeiro eixo une, no plano equatorial, o centro da Terra e o equador no meridiano do observador. O segundo eixo contém a linha Leste-Oeste no plano do equador enquanto o terceiro é o eixo de rotação.

Todavia, em aplicações de engenharia é mais interessante determinar a posição solar de acordo com um sistema de coordenadas com origem na localidade do observador, e não no centro da Terra. Então, usualmente é escolhido um sistema de três eixos sendo o primeiro o zênite, o segundo o eixo Leste-Oeste, e o terceiro o Norte-Sul, como ilustra a Figura 4.5.

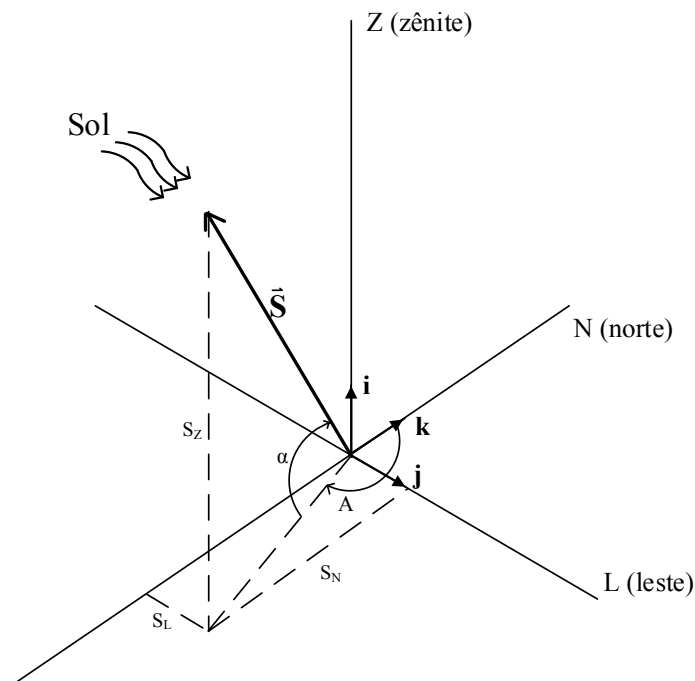


Figura 4.5 - Diagrama da posição do Sol em função do sistema de coordenadas com origem no observador.

Nesse sistema, a posição solar na esfera celeste é definida pelo seu ângulo de inclinação em relação ao horizonte, chamado de elevação (α) e pelo ângulo de azimute (A), onde o último é o ângulo existente entre o Norte e a projeção do Sol no plano do solo.

Os vetores unitários \mathbf{i} , \mathbf{j} e \mathbf{k} , correspondem aos eixos de zênite, Leste-Oeste e Norte-Sul, respectivamente, de modo a poder escrever o vetor resultante da posição do Sol, \mathbf{S} , como nas Equações 4.22 até 4.25.

$$\mathbf{S} = S_z \cdot \mathbf{i} + S_e \cdot \mathbf{j} + S_n \cdot \mathbf{n} \quad (4.22)$$

$$S_z = \text{sen}(\alpha) \quad (4.23)$$

$$S_e = \text{cos}(\alpha) \cdot \text{sen}(A) \quad (4.24)$$

$$S_n = \text{cos}(\alpha) \cdot \text{cos}(A) \quad (4.25)$$

A relação entre os sistemas $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$, e $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$ reside no ângulo da latitude (ϕ) do observador. A Figura 4.6 mostra uma vista de corte lateral os eixos (zênite, Leste, Norte) transformados para o sistema com origem no centro da Terra.

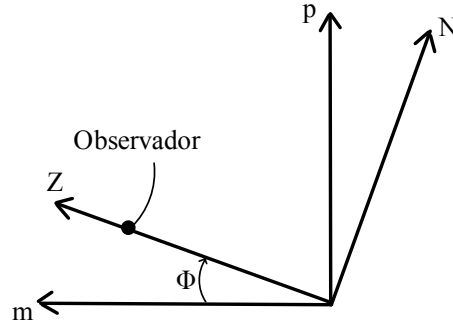


Figura 4.6 - Representação gráfica da angulação entre vetores unitários nos diferentes sistemas de coordenadas.

A transformada de coordenadas é expressa pela Equação 4.26.

$$\begin{bmatrix} S_z \\ S_e \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \text{sen}(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_m \\ S'_o \\ S'_p \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Resolvendo esse sistema matricial, obtém-se as Equações 4.27 até 4.29.

$$S_z = S'_m \cdot \cos(\phi) + S'_p \cdot \text{sen}(\phi) \quad (4.27)$$

$$S_e = S'_o \quad (4.28)$$

$$S_n = S'_p \cdot \cos(\phi) - S'_m \cdot \text{sen}(\phi) \quad (4.29)$$

Substituindo as Equações 4.23, 4.24 e 4.25 em 4.27, 4.28 e 4.29, e resolvendo em função da elevação e o azimute solar, é possível escrevê-las em função da declinação, ângulo horário e latitude local. Dessa forma, determina-se a posição do Sol, nas coordenadas do observador, apenas com o conhecimento de data, hora e coordenadas locais, como expresso nas Equações 4.30 e 4.31.

$$\alpha = \arcsen(\text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\phi)) \quad (4.30)$$

$$A = \arccos\left(\frac{\text{sen}(\delta) \cdot \cos(\phi) - \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \text{sen}(\phi)}{\cos(\alpha)}\right) \quad (4.31)$$

4.4 Incidência sob superfícies

A energia elétrica produzida por um painel fotovoltaico depende diretamente da intensidade da radiação solar sobre sua superfície, como discutido no Capítulo 3. Por sua vez, a porção da radiação disponível que incide em determinada superfície depende do ângulo de incidência (θ_i) entre seu vetor normal e os raios solares.

Portanto, tão importante quanto conhecer o posicionamento do Sol para coletar a energia proveniente dele, é preciso saber posicionar e/ou rastrear corretamente os módulos PVs. Utilizando o sistema de coordenadas (z, L, N) definido anteriormente, uma superfície qualquer pode ser disposta sobre os mesmos eixos em função de dois ângulos, o de inclinação em relação ao solo (β) e o azimute (γ), sendo este último tomado em relação à normal da superfície, como é mostrado na Figura 4.7.

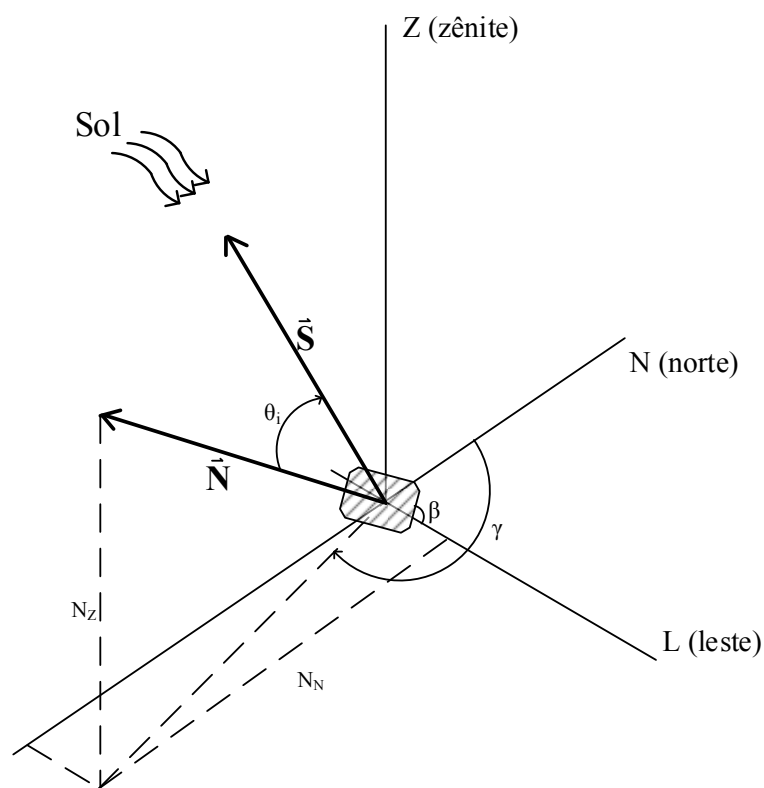


Figura 4.7 - Posicionamento de uma superfície no sistema de coordenadas do observador.

O vetor normal à superfície, \vec{N} , escrito em relação aos vetores unitários \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} tem a forma da Equação 4.32.

$$\mathbf{N} = N_z \cdot \mathbf{i} + N_e \cdot \mathbf{j} + N_n \cdot \mathbf{k} \quad (4.32)$$

onde N_z , N_e e N_n são os componentes nos eixos zênite, Leste e Norte, descritas pelas Equações 4.33 até 4.35.

$$N_z = \text{sen}(\beta) \quad (4.33)$$

$$N_e = \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\gamma) \quad (4.34)$$

$$N_n = \text{sen}(\beta) \cdot \text{cos}(\gamma) \quad (4.35)$$

Dessa forma, o ângulo de incidência da radiação solar sobre a superfície é determinado tomando o produto escalar dos vetores da posição do Sol, \mathbf{S} , e da normal da superfície, \mathbf{N} , como indica a Equação 4.36.

$$\cos(\theta_i) = \mathbf{S} \cdot \mathbf{N} \quad (4.36)$$

4.4.1 Radiação incidente no plano horizontal

Uma superfície paralela ao solo possui inclinação nula e sua normal equivalente ao eixo de zênite, de modo que o ângulo de incidência é equivalente ao de zênite solar, θ_z . A radiação difusa, nesse caso, é a descrita na Equação 4.7 e a radiação refletida é nula. A radiação direta é reduzida pelo cosseno do zênite solar, como apresenta a Equação 4.37.

$$S_{\text{direta,plano}} = S_{\text{direta}} \cdot \text{cos}(\theta_z) \quad (4.37)$$

A energia solar, J , que incide no plano horizontal no decorrer de um dia, desprezando efeito de nuvens ou sombreamento, é dada pela integral da radiação global no período de luz solar, expressa na Equação 4.38 em J/m².

$$J_{\text{plano}} = \int_{h_{\text{nascido-sol}}}^{h_{\text{pôr-sol}}} (S_{\text{direta}} \cdot \text{cos}(\theta_z) + S_{\text{difusa}}) dt \quad (4.38)$$

4.4.2 Radiação incidente em superfície inclinada

De maneira semelhante à radiação incidente no plano horizontal, a radiação direta que atinge uma superfície inclinada, com ângulo β , é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência, e é calculada pela Equação 4.39.

$$S_{direta,supenf} = S_{direta} \cdot \cos(\theta_i) \quad (4.39)$$

A radiação difusa incidente, por outro lado, é reduzida devido ao lado posterior da superfície estar exposto com o mesmo ângulo β , como mostra a Figura 4.8. A Equação 4.40 determina a intensidade de radiação difusa nesse caso.

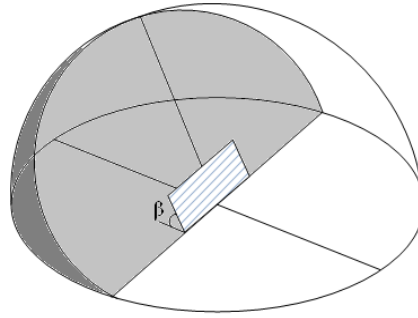


Figura 4.8 - Parte do hemisfério de uma superfície inclinada que não recebe radiação difusa.

$$S_{difusa,supenf} = S_{difusa} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \quad (4.40)$$

De forma análoga, a porção da radiação refletida pelo solo que incide na superfície depende do ângulo de inclinação β , como expressa a Equação 4.41.

$$S_{refletida,supenf} = S_{refletida} \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (4.41)$$

A Equação 4.42 determina a energia solar acumulada ao longo de um dia.

$$J_{supenf} = \int_{h_{nascer-do-sol}}^{h_{pôr-do-sol}} \left[S_{direta} \cdot \cos(\theta_i) + S_{difusa} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + S_{refletida} \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \right] dt \quad (4.42)$$

4.5 Modelo de rastreador solar

As duas principais técnicas utilizadas de rastreamento mecânico de painéis fotovoltaicos consistem em seguir a posição solar ao longo do dia com um eixo (1E) de liberdade ou dois (2E). Segundo a fabricante alemã de rastreadores mecânicos, Deger Energy, o custo de instalação e operação de um sistema dois eixos é 300% superior ao de um eixo. Essa diferença pode tornar-se ainda mais evidente se a compensação energética não for o suficiente, especialmente levando em conta custos de manutenção.

Três métodos para otimizar a coleta de energia solar da central fotovoltaica de 10 kW forma estudadas nessa dissertação, montagem fixa com ajuste manual período do ângulo de inclinação, rastreamento azimutal em um eixo e rastreamento em dois eixos.

A montagem fixa de painéis PV é o método mais simples e barato de ser implementado, não possui elementos eletromecânicos e a manutenção é reduzida, mas possui a menor taxa quanto à irradiação média anual. Nesse caso, a montagem é realizada com o vetor normal à superfície apontado ao Norte ($\gamma = 0^\circ$), e ângulo de inclinação com o solo fixo. Nessa dissertação, também buscou-se os valores ótimos de β ao longo do ano, para maximizar a energia produzida com o mínimo de ajustes.

O rastreamento em 1E do azimute solar, ilustrado na Figura 4.9.a, movimentando periodicamente o azimute do painel PV de modo a seguir o azimute solar, enquanto a inclinação permanece fixa. Esse método aproveita a variação diária de Leste à Oeste da posição do Sol, mas não otimiza o ângulo de incidência em relação a elevação (α).

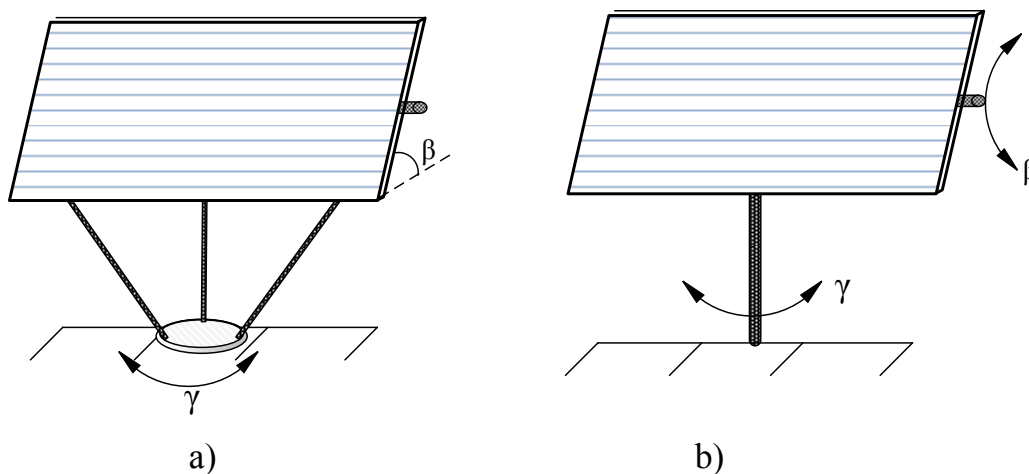


Figura 4.9 - Movimentação do rastreamento a) em um eixo azimutal e b) em dois eixos.

Buscar paralelamente a posição de azimute e elevação do Sol é a tática do rastreamento em 2E, Figura 4.9.b, corrigindo a posição da superfície PV de modo com que o ângulo de incidência seja 90° e maximize o aproveitamento da radiação solar disponível.

O período de correção da posição dos módulos fotovoltaicos depende da técnica e do controle a ser utilizada. Alguns fabricantes de rastreadores comerciais utilizam sensores de luminosidade ou de radiação para buscar constantemente a posição do Sol, outros utilizam controles com parâmetros astronômicos, semelhantes aos descritos nessa dissertação.

A correção excessiva, porém, é prejudicial devido ao desgaste mecânico e consumo elétrico, além de não garantir um aumento significativo na produção de energia. Foi alvo de estudo nessa dissertação diferentes períodos da correção de posição e o efeito da escolha prévia de posições otimizadas. A Figura 4.10 ilustra um breve resumo em forma de diagrama da metodologia usada para analisar a produção energética de um painel PV em diferentes condições de radiação, temperatura e posicionamento.

4.5.1 Proposta da tática de otimização

A trajetória do Sol na esfera celeste muda drasticamente ao longo do ano para locais com latitudes quanto mais afastadas da linha equatorial, tanto nos ângulos de elevação solar ao meio dia quando nos ângulos de azimute de nascer e pôr-do-sol. Além disso, uma das variações que é comumente desprezada é a velocidade angular do Sol ao longo do ano. Essa dissertação propõe uma solução para rastreamento aproveitando de modo inteligente o conhecimento prévio dessas características, reduzindo o número de ajustes diários e consumo elétrico.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam a variação diária da posição do azimute e elevação solar para os solstícios de inverno e verão, e equinócio de primavera. A taxa da variação horária do azimute solar tem pouca variação no período do inverno, e três distintas regiões no verão. A elevação solar não possui alteração tão gritante, porém, também é perceptível a maior duração de tempo do meio dia solar no inverno do que no verão.

Com essa análise, foi desenvolvida uma proposta de rastreamento em um eixo com três posições diárias, uma no período da manhã, ao meio-dia e à tarde. A correção mecânica da posição do painel é realizada em dois momentos, um anterior e um posterior ao meio-dia solar, e, ao fim do dia, o módulo movimenta-se para a posição inicial do dia seguinte.

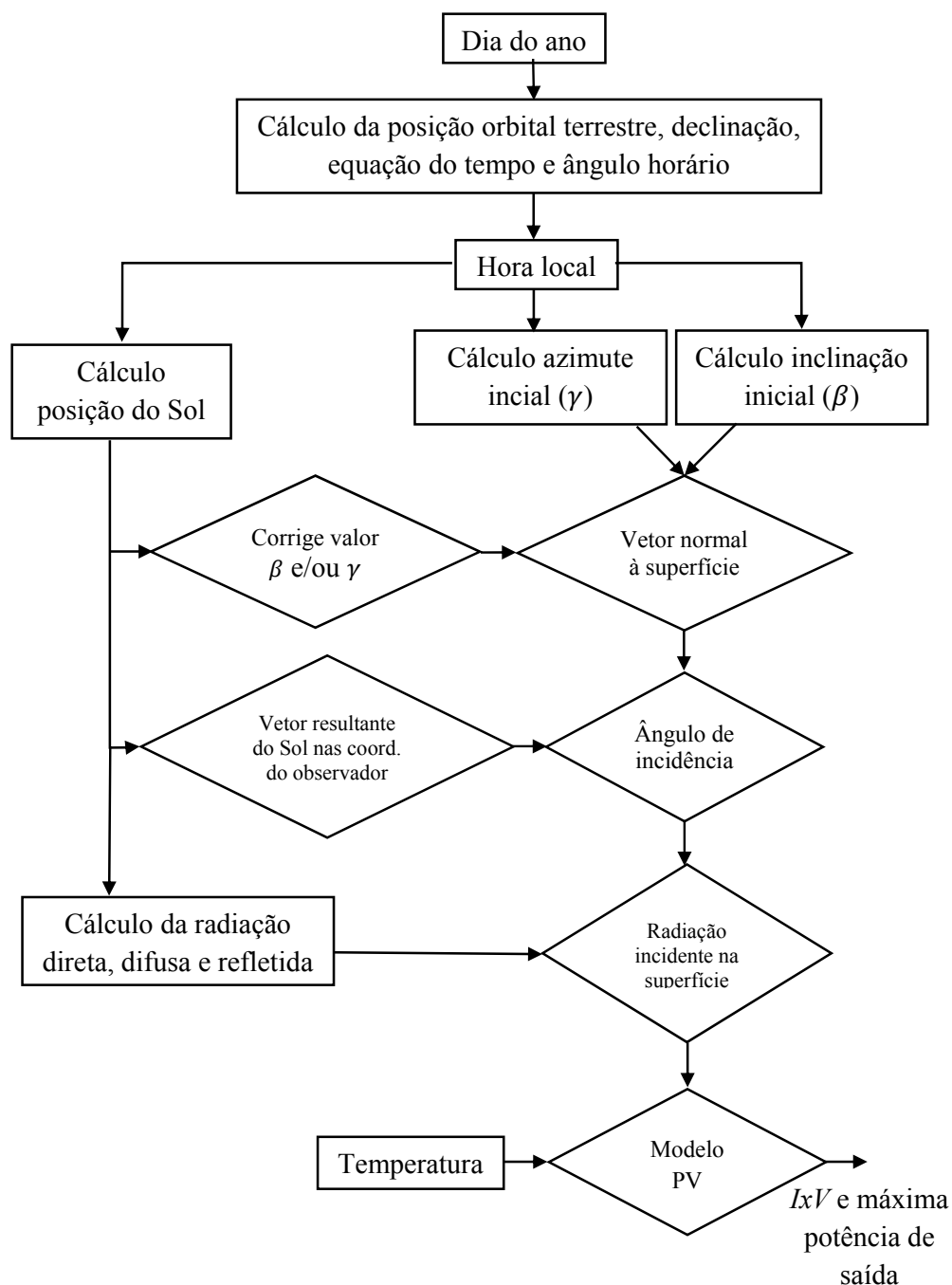


Figura 4.10 - Diagrama de blocos para modelo de análise de desempenho de PV com rastreamento.

A escolha dos instantes em que se executa a correção, e os ângulos de azimute a serem alcançados, é feita através da variação horária da razão entre azimute e zênite solar, como expressa a Equação 4.43.

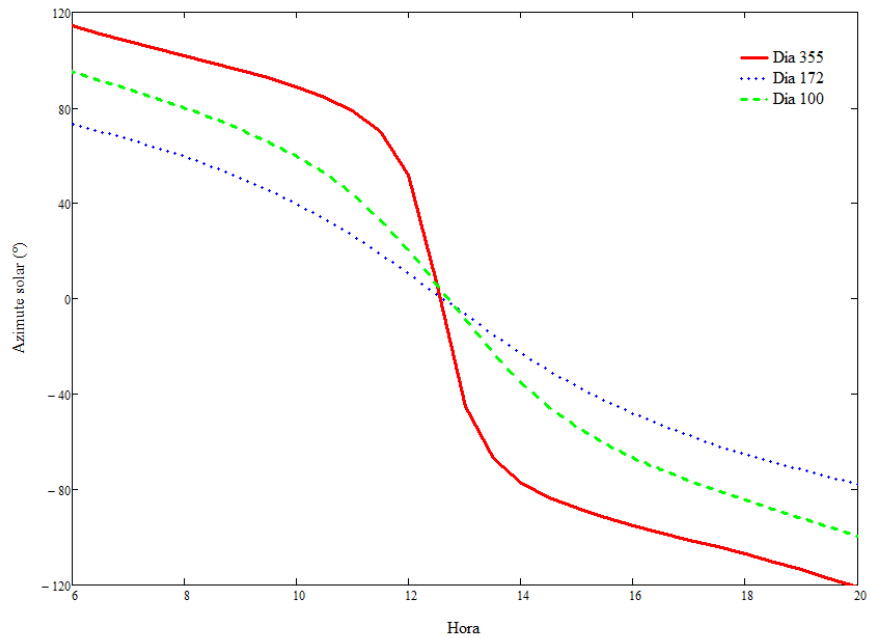


Figura 4.11 - Variação do azimute em função da hora para os solstícios de verão e inverno, e equinócio de primavera.

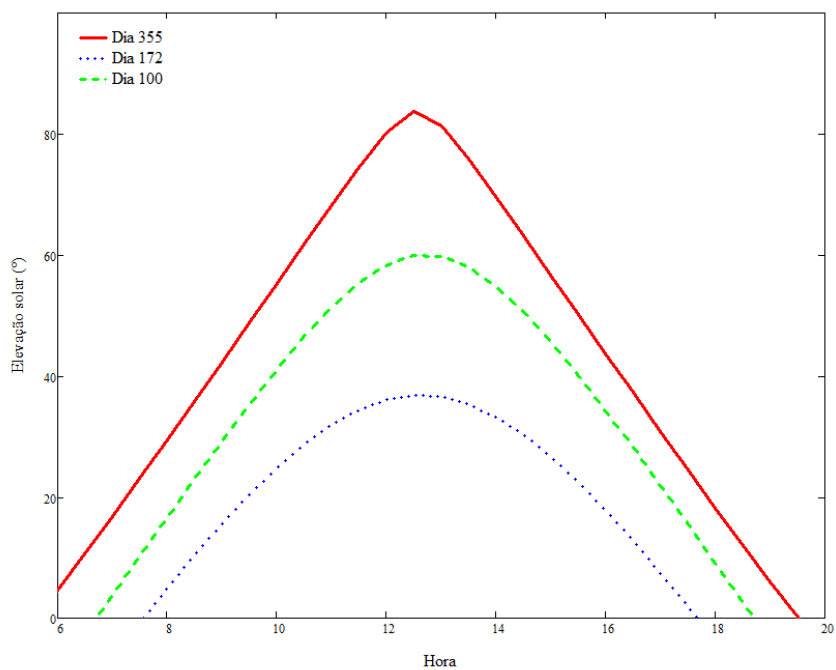


Figura 4.12 - Variação da elevação solar em função da hora para os solstícios de verão e inverno, e equinócio de primavera.

$$\epsilon = \frac{A}{\alpha} \tag{4.43}$$

As posições angulares matutinas e vespertinas, γ_1 e γ_2 , são descritas de acordo com o azimute do Sol, expresso pelas Equações 4.44 e 4.45.

$$\gamma_1 = A(h_1) \quad (4.44)$$

$$\gamma_2 = A(h_2) \quad (4.45)$$

onde h_1 e h_2 são os momentos, em horas, definidos pelas Equações 4.46 e 4.47.

$$h_1 = \frac{h_{\epsilon=0} - h_{\text{nascido-do-sol}}}{2} + h_{\text{nascido-do-sol}} \quad (4.46)$$

$$h_2 = -\frac{h_{\epsilon=0} + h_{\text{pôr-do-sol}}}{2} + h_{\text{pôr-do-sol}} + 12 \quad (4.47)$$

O azimute da posição intermediária é escolhido em função da hora que ϵ atinge valor nulo, como indica a Figura 4.13, para o dia de solstício de verão. Os instantes que os ajustes são realizados são em uma hora anterior e posterior ao meio dia solar.

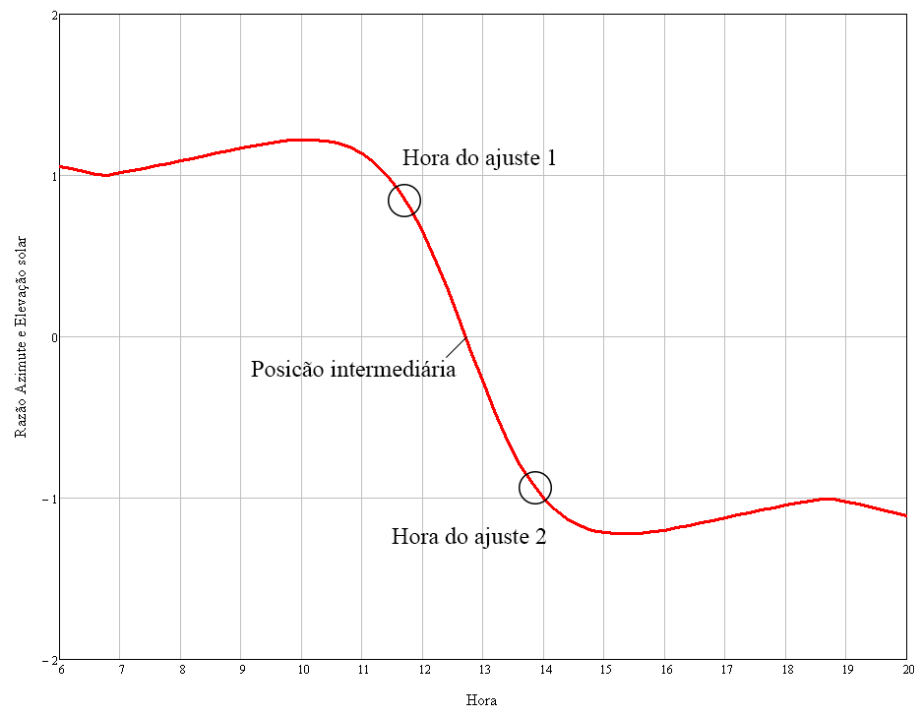


Figura 4.13 - Razão entre Azimute e Elevação solar ao longo do dia de solstício de verão.

Dessa forma, o meio-hemisfério da superfície fotovoltaica permanece direcionado ao Sol e se movimenta de acordo com a velocidade dele. Apesar de não aproveitar ao máximo a energia solar disponível, a redução do número de correções é um fator positivo dessa tática, reduzindo o estresse mecânico e complexidade de operação. Ainda, otimizando o ângulo de inclinação com o solo, essa tática permite aproveitar ao máximo a radiação solar matutina e vespertina. A Figura 4.14 traz um breve esquema da tática proposta, os resultados desse método, junto com as táticas tradicionais de rastreamento, são apresentadas no Capítulo 5.

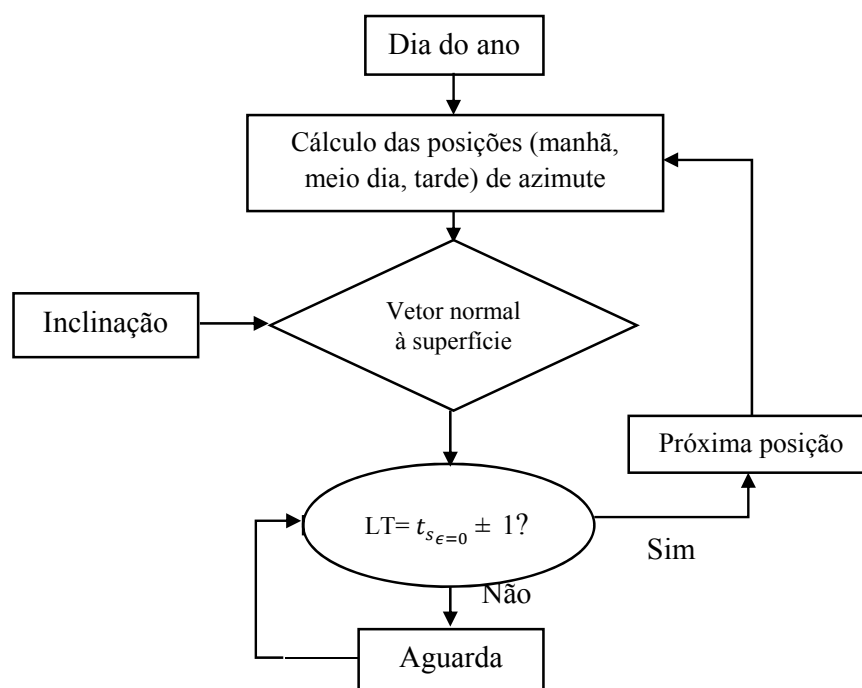


Figura 4.14 - Diagrama de blocos da proposta de rastreamento em três posições.

4.6 Resumo do Capítulo

Foram apresentadas nesse capítulo as principais equações envolvendo a dinâmica celeste entre Sol e Terra, de modo a ser possível precisar a irradiação solar em função do dia e hora local nas coordenadas do observador. Também foi descrito o modelo utilizado para calcular a radiação solar incidente, e a transmissividade atmosférica.

Uma transformação de coordenadas foi realizada para determinar o ângulo de incidência entre a radiação solar e uma superfície qualquer, orientada arbitrariamente. A soma dessas ferramentas permite prever a taxa da radiação solar disponível, em qualquer dia e hora, incidindo sobre um painel fotovoltaico com posição conhecida.

Por último, foram descritas as técnicas de rastreamento solar de painéis PV analisadas nessa dissertação.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As simulações computacionais utilizadas nesta dissertação, e apresentadas neste capítulo, foram realizadas no software Mathcad[®]. Cada etapa de simulação foi rigorosamente verificada com dados experimentais de modo a validar os resultados então obtidos. Tais comparações foram feitas de acordo com a natureza necessária de cada teste, seja com bancos de dados meteorológicos ou com resultados coletados experimentalmente.

A divisão deste capítulo segue a mesma sequência de cálculos previamente descritos onde, inicialmente, determinaram-se os posicionamentos angular e horário do Sol e sua trajetória para qualquer instante de tempo no decorrer do ano. Em seguida, foi feita a determinação da intensidade da irradiação solar para a localidade de Santa Maria – RS, e do ângulo de incidência entre o Sol e uma superfície plana em diferentes posições. Por último, são mostrados os resultados da modelagem do painel fotovoltaico utilizado e a energia elétrica produzida pelo mesmo em diferentes situações de posicionamento ou rastreamento.

5.1 Posicionamento solar na esfera celeste

O conhecimento da posição do Sol em relação a um ponto de referência no solo é um dos pilares fundamentais para se poder compreender e analisar o recurso energético solar disponível a cada instante e, por consequência, estudar o desempenho de uma planta fotovoltaica. A utilização de bancos de dados ou calculadores solares não foi considerada uma solução viável para os cálculos que seriam necessários neste trabalho, já que tais ferramentas, muitas vezes, utilizam aproximações nas equações da dinâmica celeste. Além de haver divergências entre os resultados produzidos por diversos bancos de dados pesquisados, podem resultar numa imprecisão de 5° no cálculo da elevação solar (α_s) ou do azimute solar (φ_s) com um erro de até 15% na projeção da máxima potência produzida pelo painel fotovoltaico.

A precisão do modelo de posicionamento solar feito nesta dissertação foi comparado com dados do Almanaque Astronômico (AA - Astronomical Almanac), publicação conjunta entre órgãos governamentais estadunidense e britânico, coordenados pelo Observatório Naval dos Estados Unidos (USNO – United States Naval Observatory). A Tabela 5.1 apresenta os valores de inclinação e azimute solares previstos teoricamente e obtidos pelo Almanaque Astronômico nas quatro condições de extremidade da dinâmica Sol-Terra (solstícios e equinócios) de 2014 em horários escolhidos aleatoriamente.

Tabela 5.1 -Posição angular do Sol simulados e de dados do AA/USNO.

VALORES PARA SANTA MARIA – RS, GMT -3h

DIA E HORA DO ANO		SIMULAÇÃO (graus)	DADOS AA (graus)	ERRO (graus)
EQUINÓCIO DE OUTONO, ÀS 9h35min	α_s	36.4775	36.5	-0.0225
	φ_s	65.3224	65.3	0.0224
SOLSTÍCIO DE INVERNO, ÀS 15h10min	α_s	25.3589	25.4	-0.0411
	φ_s	320.9976	321.0	-0.0024
EQUINÓCIO DE PRIMAVERA, ÀS 12h25min	α_s	60.3555	60.4	-0.0445
	φ_s	1.3158	1.3	0.0158
SOLSTÍCIO DE VERÃO, ÀS 18h55min	α_s	7.0055	7.1	-0.0945
	φ_s	246.9661	247.0	-0.0339

A trajetória do Sol na esfera celeste para a localidade de Santa Maria – RS foi simulada para o período de um ano em intervalos de 2 minutos. A relação entre elevação e azimute solar para o solstício de verão de 2014 é mostrada na Figura 5.1 junto com o instante de tempo de cada posição em relação ao horário civil (LT). A validação do modelo é mostrada na Figura 5.2, onde os ângulos simulados para o mesmo dia citado são comparados com os dados do Almanaque Astronômico.

¹ Foi descontada a diferença do Horário de Verão

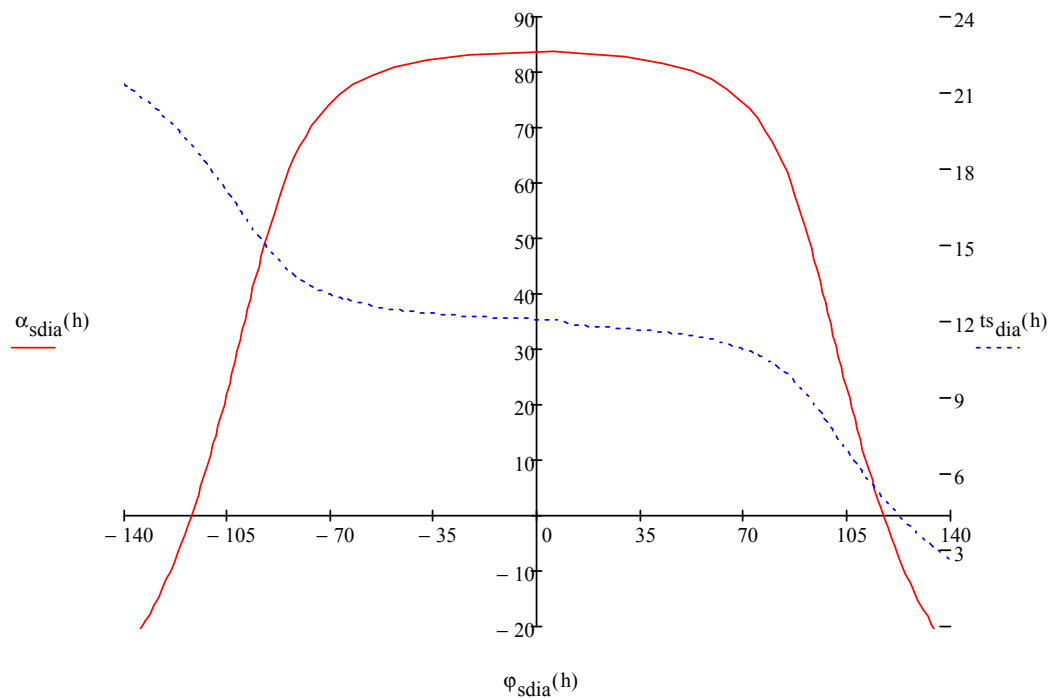


Figura 5.1 - Trajetória solar para o dia 355 do ano, em relação ao azimute (eixo x) e elevação (eixo y), em graus, e a hora do dia no eixo secundário.

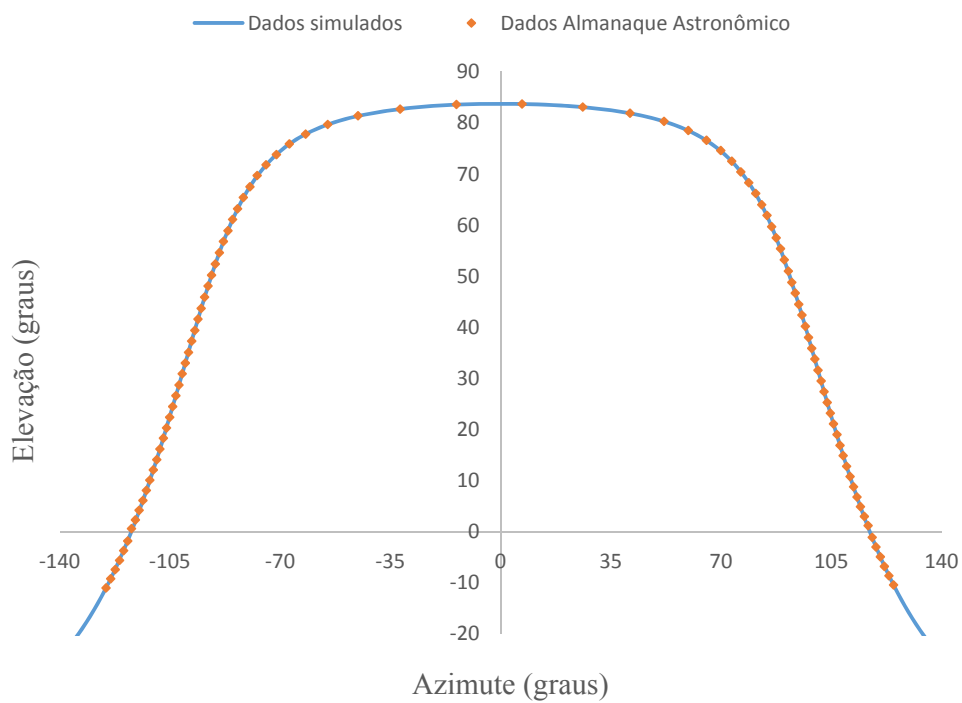


Figura 5.2 – Comparação entre ângulos simulados e obtidos do Almanaque Astronômico.

A análise da curva Elevação vs. Azimute, como a da Figura 5.1, permite obter informações a respeito do período de incidência solar no dia, exatidão da hora de pôr- e nascer-do-sol e a velocidade angular do Sol vista na esfera celeste. Tais informações são empregadas na busca da melhor estratégia para utilização de um rastreador solar.

De forma equivalente, a visualização do percurso solar ao longo de todo ano foi simulada, e é apresentada na Figura 5.3, onde é possível analisar os ângulos máximo e mínimo de elevação, ao meio dia solar, nos solstícios de verão e inverno, respectivamente, para a localidade de Santa Maria – RS.

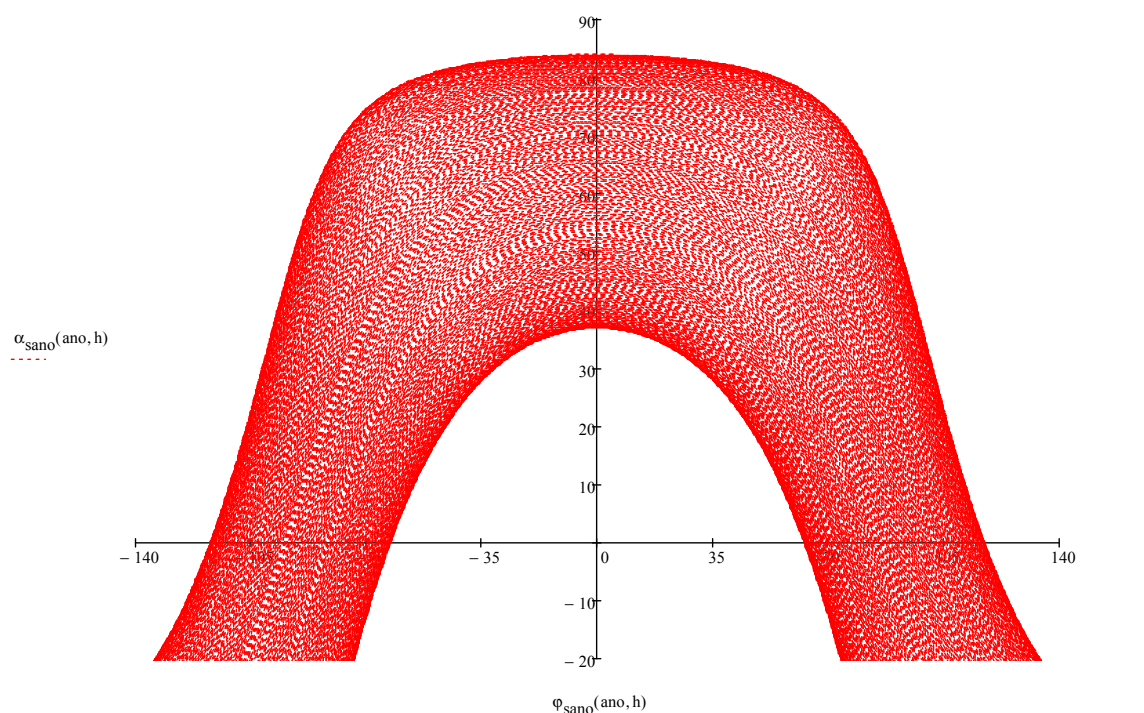


Figura 5.3 - Posicionamento solar ao longo do ano, em relação ao azimute (eixo x) e elevação (y), em graus.

5.1.1 Coordenadas vetoriais da posição solar

A transformação das coordenadas de posição angular do Sol, descritas no Capítulo 3 é a base para a análise da energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos sob diferentes técnicas de rastreamento. Para cada dia do ano, foram calculados a elevação e azimute do Sol em intervalos de 2 minutos, e, então, convertidos para um sistema vetorial unitário em 3-dimensões, representando os eixos Norte-Sul, Leste-Oeste e o Zênite.

Uma representação gráfica da trajetória do Sol nesses eixos é ilustrada na Figura 5.4 em períodos de 1 hora, das 7h às 18h, para o mesmo dia, conforme ilustrado na Figura 5.1. O vetor resultante da posição do Sol nessas coordenadas é um dos elementos para a determinação do ângulo de incidência da radiação no painel fotovoltaico.

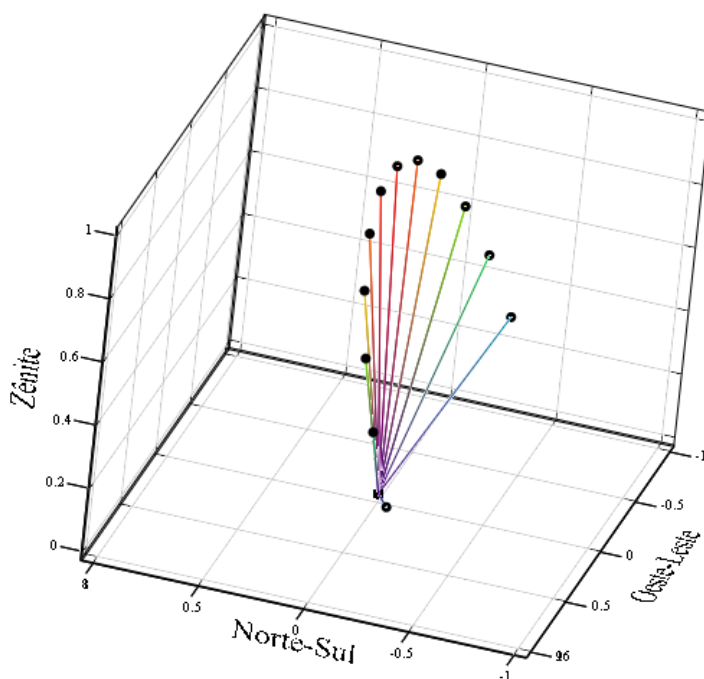


Figura 5.4 - Posições do sol, no solstício de verão, nas coordenadas do observador.

5.2 Modelo de radiação incidente

O modelo para céu limpo estipula o máximo possível da radiação solar que incide diretamente em uma superfície. Como o sombreamento causado por nuvens é um fator aleatório e como nebulosidade e chuvas são fatores climáticos, a irradiação sob essas situações não foram consideradas neste trabalho, de modo que os resultados apresentados expressam os máximos valores disponíveis para cada dia e hora do ano.

Todos os valores de radiação solar calculados pelo modelo proposto no Capítulo 3 foram comparados com valores experimentais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que possui uma estação meteorológica automática na Base Aérea de Santa Maria. Esta estação é equipada com um piranômetro que registra medições minuto a minuto e disponibiliza a integral

destes valores a cada hora. Para validar os resultados de radiação simulados foi preciso desconsiderar os dias com alto índice de nebulosidade e, para tanto, recorreu-se a registros históricos meteorológicos, além dos próprios gráficos gerados pelas estações automáticas do INMET. A Tabela 5.2 expressa os valores de radiação incidentes em uma superfície horizontal ao meio dia solar, para quatro dias (dia 4, 99, 170 e 296) com baixa incidência de nuvens em 2014.

Tabela 5.2 - Comparação entre valores de radiação incidente, para o meio dia solar, entre dados meteorológicos e o modelo de radiação utilizado.

Dia (2014)	Dados INMET (W/m ²)	Simulado (W/m ²)	Erro
4 de janeiro	1.078,61	1.046,20	3%
9 de abril	760,00	782,30	2.85%
19 de junho	515,83	528,10	2.38%
23 de outubro	968,33	987,00	1.89%

Os valores registrados pela estação meteorológica do INMET representam uma média para o período entre 12h e 13h para cada dia. São, portanto, suscetíveis ao sombreamento de eventuais nuvens, além da imprecisão do próprio aparelho de medição.

A máxima incidência de radiação ao longo do ano simulado pelo modelo descrito é mostrada na Figura 5.5 para valores de radiação direta e global. É perceptível a tradicional curvatura de incidência solar com mínimo no solstício de inverno (dia 172) e máximo no solstício de verão (dia 355).

A quantidade de energia proveniente da radiação solar global ao decorrer dos dias foi simulada e é ilustrada na Figura 5.6. Para esse cálculo, foi necessário previamente a determinação das horas de nascer e pôr-do-sol, a variação da transmissividade da atmosfera durante o ano e a variação da camada de massa de ar no decorrer de cada dia, como já descrito no Capítulo 3.

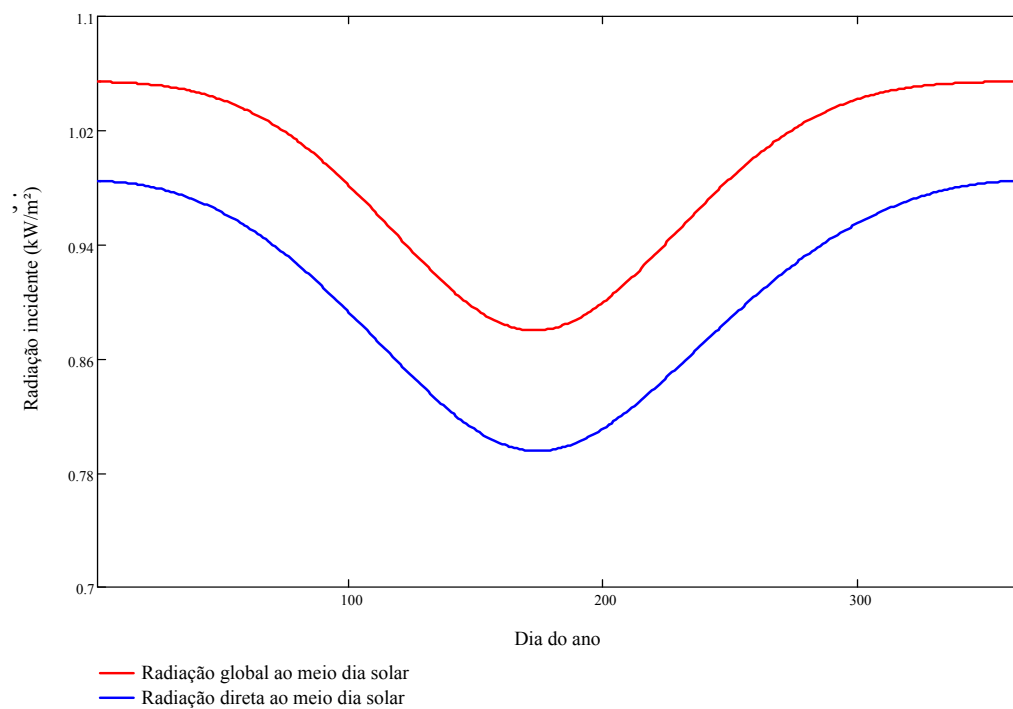


Figura 5.5 - Radiação solar global e direta simuladas para o meio dia solar ao longo do ano.

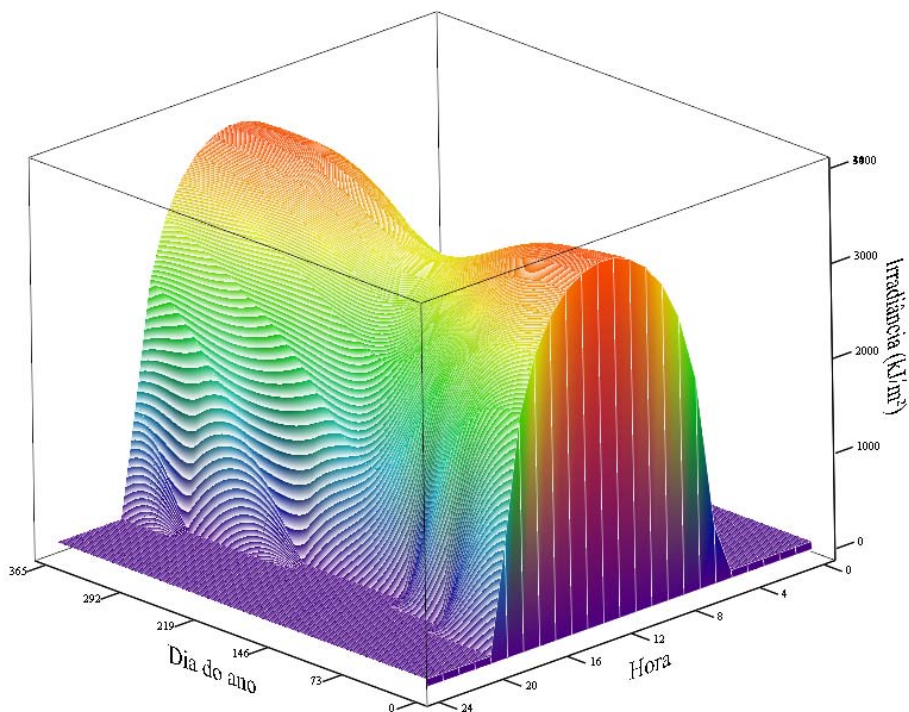


Figura 5.6 - Energia solar global disponível ao longo do ano, para Santa Maria – RS.

A Figura 5.7 apresenta uma validação do modelo teórico utilizado com uma média histórica de cinco anos de dados meteorológicos. Para isso, foram coletados dados de irradiação no banco de dados do INMET para dias com baixo índice de nebulosidade entre os anos de 2010 e 2014. O período de cinco anos foi escolhido para garantir uma média confiável e minimizar o número de dias descartados por baixa irradiância.

Com esses dados, foram usados os valores de radiação medidos nos períodos de pico solar entre 12h e 13h para os dias selecionados. A comparação desses dados foi feita com os resultados de simulação para a radiação global incidente sob uma superfície horizontal utilizando os ângulos de pico de elevação solar para cada dia. Apesar da falha na sequência de dados causada pelos dias descartados por falta de irradiação relevante, é notável que o modelo utilizado na simulação apresente precisão suficiente para validar os resultados de radiação solar.

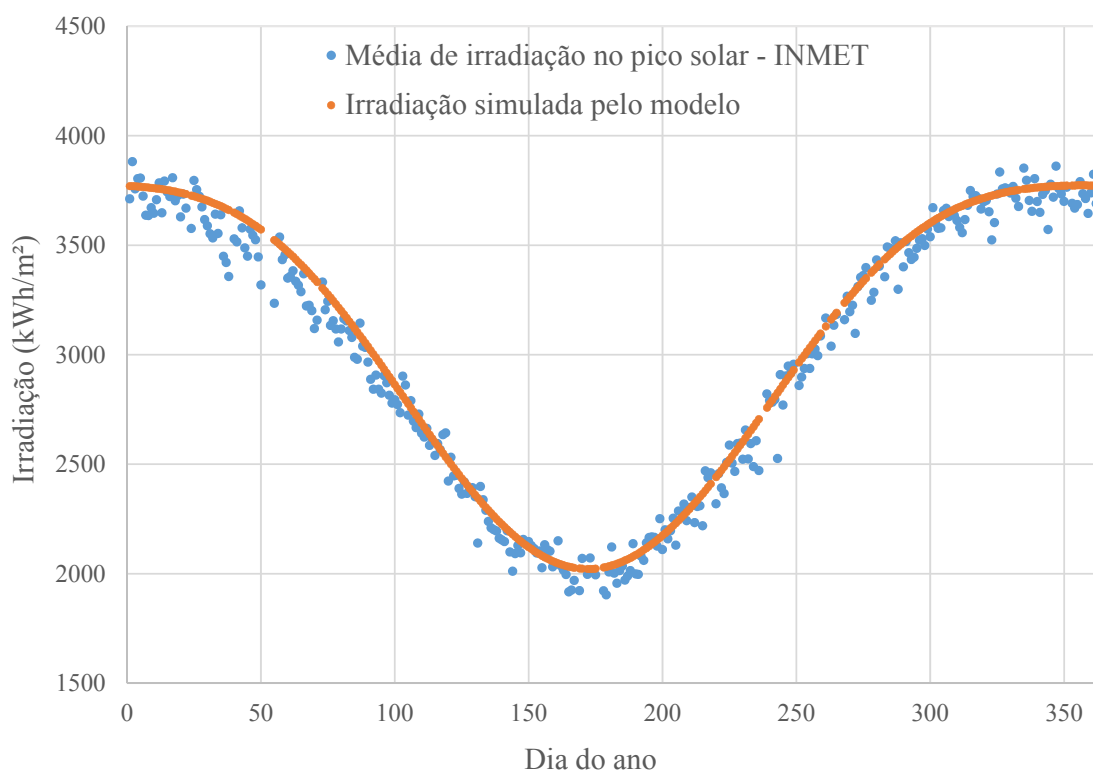


Figura 5.7 - Comparação entre valores de irradiação simulados para uma superfície horizontal e dados meteorológicos em um período de 5 anos.

A Figura 5.8 apresenta uma validação do modelo simulado para os dados de irradiação do INMET no decorrer do dia inteiro de 22 de janeiro de 2015, e não somente para o meio dia solar.

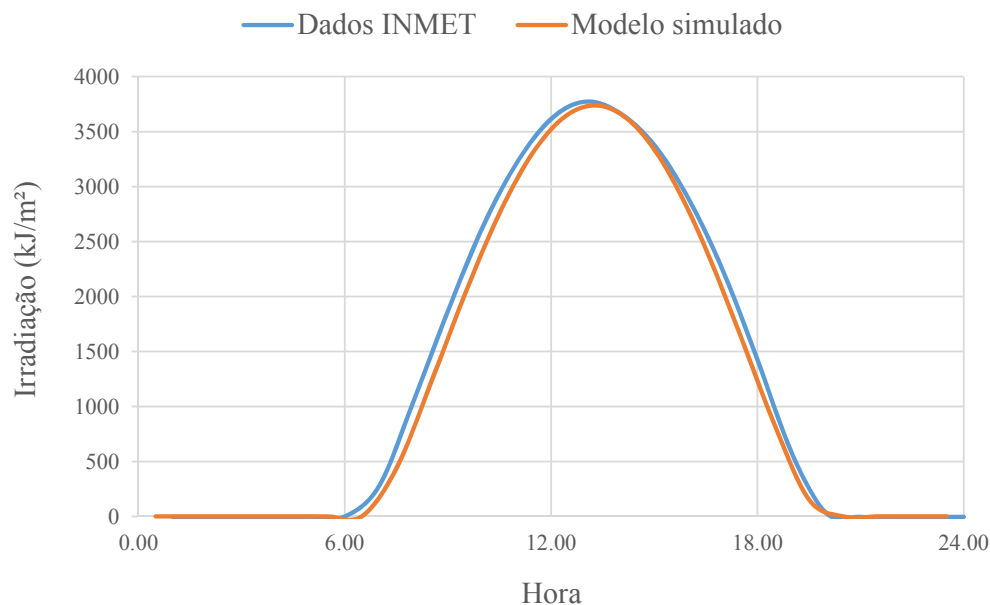


Figura 5.8 - Comparação entre irradiação medida por estação do INMET e valores simulados, para uma superfície plana.

5.3 Incidência em superfícies

A quantidade de radiação solar que incide sob uma superfície é dependente do ângulo formado entre o vetor resultante da posição solar para um determinado instante e o vetor resultante da normal desta superfície. Após a transformação de coordenadas para alocar a referência do Sol nos eixos Norte-Sul, Leste-Oeste e Zênite, o cálculo do ângulo de incidência pode ser feito de forma direta, uma vez que a superfície em análise já está posicionada na mesma referência. Uma visualização desse arranjo vetorial é feita na Figura 5.9

As técnicas de rastreamento solar descritas no Capítulo 3 diferem entre si por seguir ou ângulo de elevação do Sol, ou o ângulo de azimute, ou ambos. Para superfícies fixas ou com rastreamento em um eixo, a otimização do posicionamento de sua inclinação e azimute resulta em um maior aproveitamento energético. Como esse aproveitamento depende do cosseno do ângulo de incidência, a busca de ângulos baixos para a maior parte do dia é um dos parâmetros desejados.

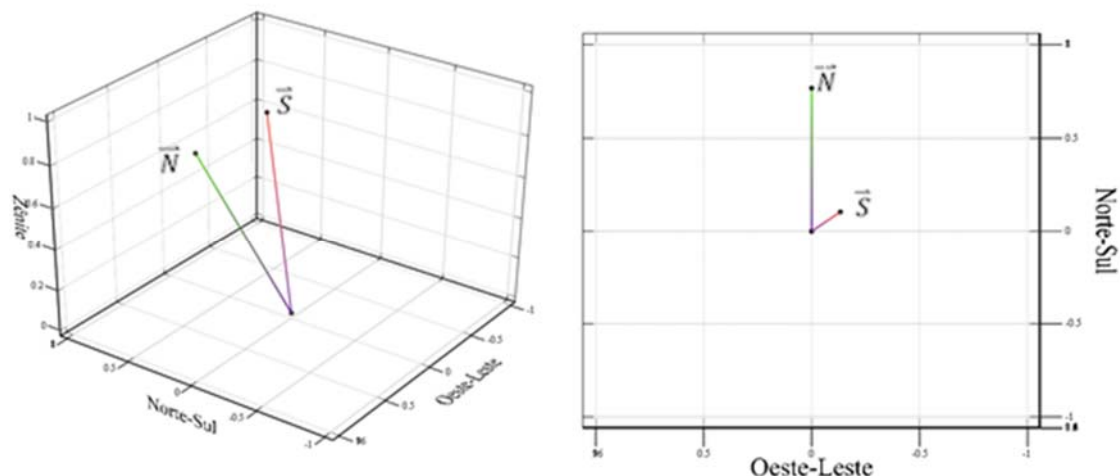


Figura 5.9 - Vista em perspectiva dos vetores resultantes para a posição solar e a normal de uma superfície inclinada, e b) vista superior da mesma.

onde \vec{S} representa o vetor resultante da posição do Sol, ao solstício de verão às 12h, e \vec{N} o vetor resultante da normal à uma superfície com inclinação de 40° e azimute 0° .

Com finalidade de análise teórica, a Figura 5.10 mostra a variação do ângulo de incidência para uma superfície fixa com rastreamento azimutal solar e rastreamento do zênite solar para o dia 355° do ano sob dois cenários de posicionamento. No cenário 1, as superfícies recebem inclinação de 30° e azimute 0° , exceto no caso de rastreamento angular. No segundo cenário, a inclinação é de 50° e o rastreamento de zênite solar recebe azimute de 90° .

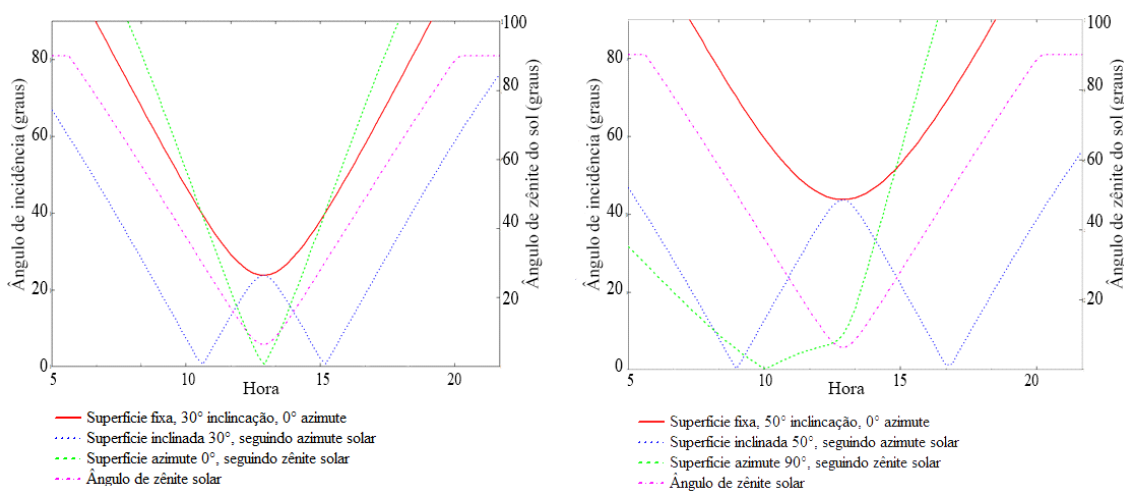


Figura 5.10 - Variação do ângulo de incidência para superfícies sob diferentes posicionamentos e estratégias de rastreamento.

A análise visual da Figura 5.11 já indica uma diferença significativa da energia incidente sob as diferentes superfícies. A Tabela 5.3 traz os valores simulados para cada situação. É notável que um posicionamento inicial equivocado, como no primeiro cenário, a superfície com rastreamento de zênite solar receba menos energia do que a superfície que permaneceu fixa.

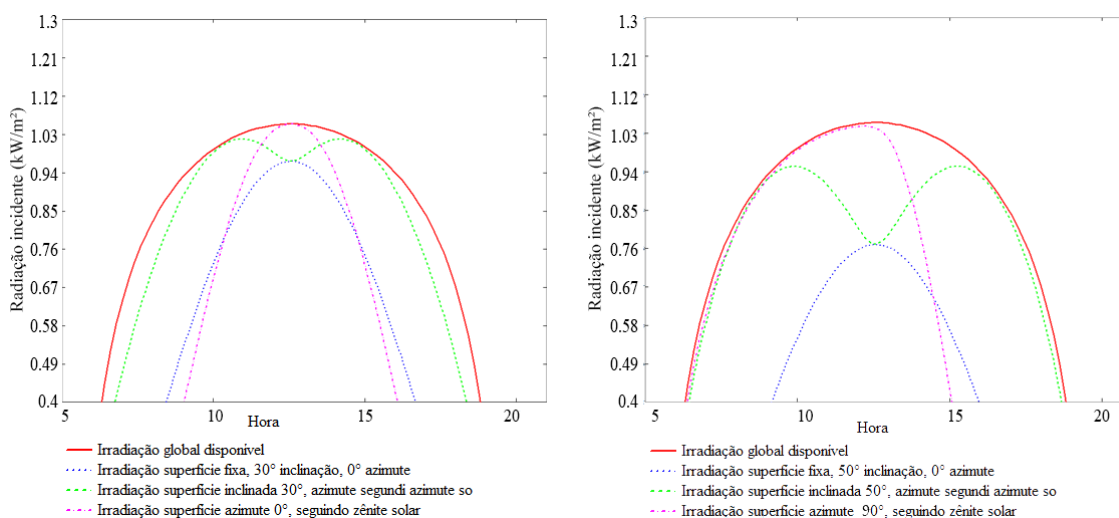


Figura 5.11- Radiação incidente ao longo do dia simulada para os diferentes cenários de posicionamento de superfície.

Tabela 5.3 - Energia solar acumulada em cada superfície nos dois cenários.

	Irradiação (kJ/m²)	
	Cenário 1	Cenário 2
Superfície fixa	6,99	5,05
Superfície seguindo azimute solar	10,49	10,39
Superfície seguindo zênite solar	6,02	6,78

5.4 Ângulo ótimo para superfícies fixas

O posicionamento de painéis fotovoltaicos com instalação fixa é tradicionalmente realizado com inclinação equivalente ou próxima ao valor da latitude da localidade. Cálculos existentes para otimizar esse ângulo buscam a irradiância média anual ou privilegiam uma das estações do ano. Uma das hipóteses estudadas para posicionamento de painéis nesta dissertação

foi o ajuste da inclinação do PV em períodos esparsos de acordo com a variação anual da elevação solar. Para essa análise na localidade tomada como exemplo, a Figura 5.12 mostra a simulação da energia solar irradiada em uma superfície plana ao longo do ano para ângulos de inclinação entre 0° e 90° .

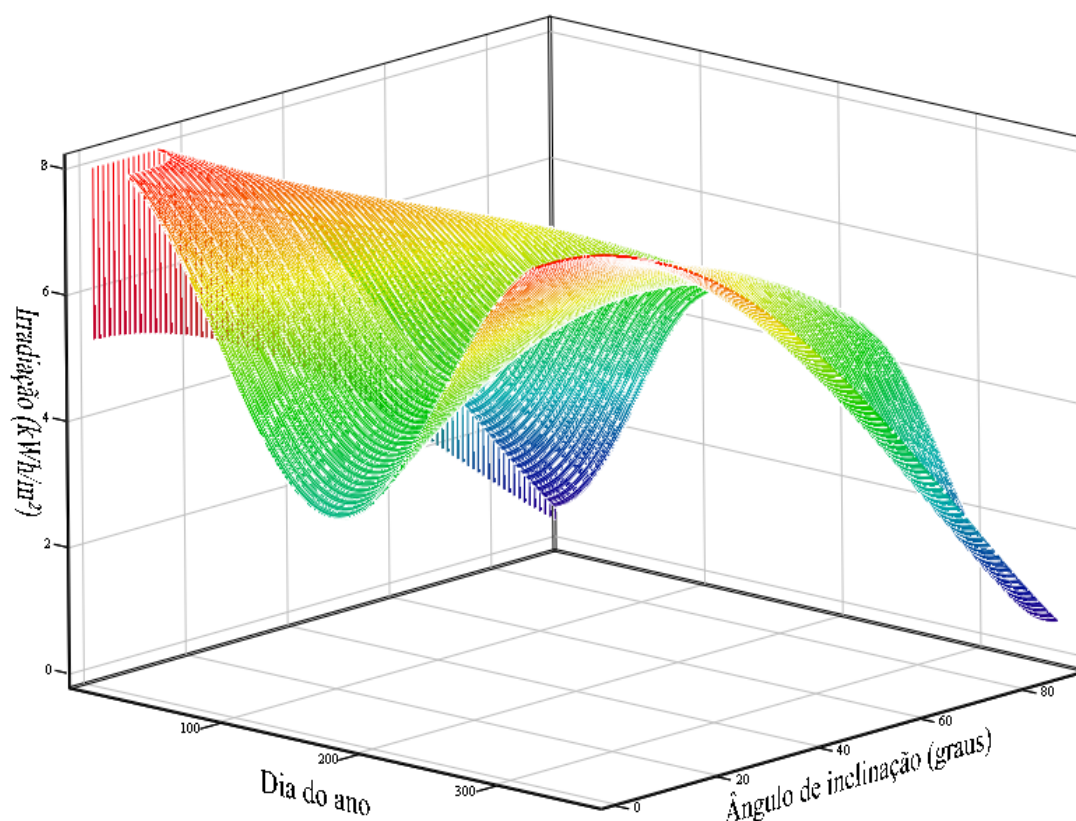


Figura 5.12 - Relação entre irradiação em uma superfície plana e seu ângulo de inclinação, ao longo do ano.

5.5 Modelagem célula fotovoltaica

De modo a poder avaliar com o máximo de fundamentos teóricos qual dos métodos de posicionamento de painéis fotovoltaicos possui maior aproveitamento energético, foi realizada uma modelagem de um painel da fabricante Siemens, modelo ProCharger® 4JF seguindo os passos indicados no Capítulo 4. Esse painel, com uma potência nominal de 75 W sob condições padrões de teste¹, foi submetido aos ensaios de circuito aberto, curto-circuito, e polarização do diodo estipulados na configuração com 36 células conectadas em série. Os parâmetros do

modelo equivalente de um diodo da célula PV foram determinados com a utilização de um conversor CC/CC como carga eletrônica, e testes sob iluminação e no escuro, como mostra a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Parâmetros internos modelados para o painel fotovoltaico Siemens Pro4JF.

<i>Parâmetros interno da célula PV para a condição de referência de 40 °C @ 800 W/m²</i>	
Fator idealidade do diodo	0,6505
Resistência parasita	60 Ω
Resistência série	0,1997 Ω
Corrente saturação diodo	$0,9 \times 10^{-14}$ A
Coefficiente de temperatura da corrente	0,01176
Coefficiente de temperatura da tensão	0,1

Com as equações que descrevem o comportamento elétrico fotovoltaico tais como descritas no Capítulo 4, foi desenvolvido o modelo do painel fotovoltaico da Siemens no software Mathcad[®]. Com o modelo calculado em termos de NOC, o modelo é ajustado em função da temperatura e radiação conforme foi descrito no Capítulo 3, e a Tabela 5.5 traz os valores dos principais parâmetros internos da célula PV modelada para diferentes condições de operação.

Inicialmente, os parâmetros descritos na tabela Tabela 5.4 foram simulados para diferentes valores de radiação incidente e temperatura, como mostrado nas Figura 5.13 e 5.14, para serem validados com valores fornecidos pelo fabricante (Apêndice A).

5.5.1 Validação dos modelos de radiação incidente e PV

A verificação dos parâmetros encontrados na Tabela 5.4 condiz com o comportamento do painel Siemens e foi obtida através de ensaios sob diferentes condições de radiação e temperatura, como descritas na Tabela 5.6. Para cada condição, foi medida a curva corrente vs. tensão do PV assim como a sua temperatura de operação.

¹ 1000 W/m², 25°C

Tabela 5.5 - Principais parâmetros do modelo de um diodo do painel Siemens, em diferentes situações de operação.

<i>Condição</i>		<i>Parâmetros</i>				
T (°C)	G (W/m ²)	I _l (A)	V _{oc} (V)	I _s (A)	R _s (Ω)	R _p (Ω)
25	1000	4,8	21,7	5,368x10 ⁻¹⁵	0,157	58,864
35	400	1,97	19,98	9,497x10 ⁻¹⁴	0,186	59,368
45	600	3,02	18,90	4,737x10 ⁻¹³	0,214	61,201
55	800	4,12	18,75	4,573x10 ⁻¹³	0,242	67,895
55	1000	5,15	18,88	1,894x10 ⁻¹²	0,242	67,895
75	900	4,95	17,76	6,721x10 ⁻¹¹	0,299	181
75	1100	5,51	17,93	5,516x10 ⁻¹¹	0,299	181

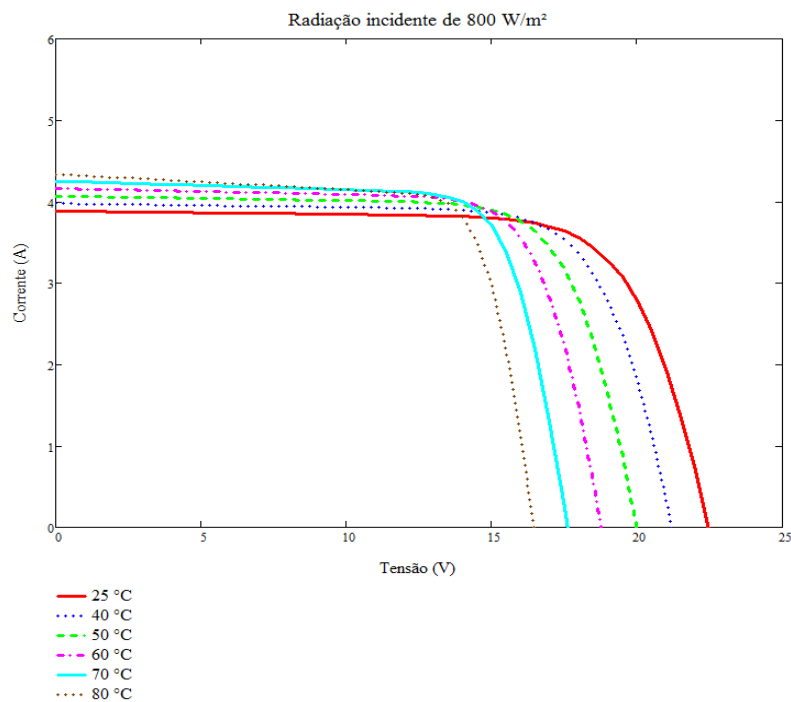


Figura 5.13 - Modelo simulado do painel fotovoltaico Siemens para incidência de radiação constante e diferentes temperaturas.

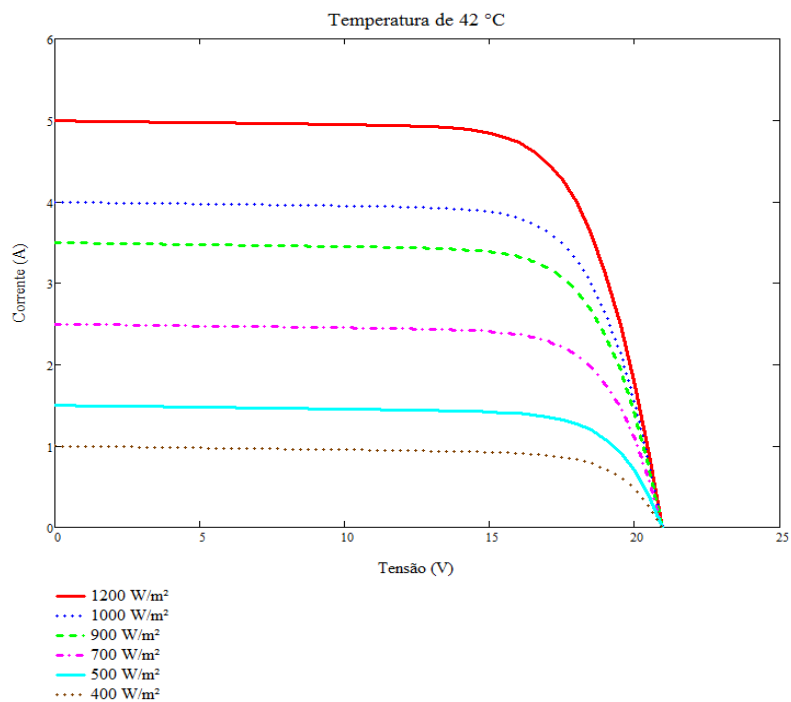


Figura 5.14- Modelo simulado do painel fotovoltaico Siemens para temperatura constante e diferentes níveis de radiação incidente.

Tabela 5.6 - Condições de testes práticos realizados com o PV Siemens Pro 4JF.

Teste	Dia e hora	Temperatura do PV (°C)	Inclinação (graus)	Azimute (graus)
1	18/01/2015, às 14h50min	75	0	0
2	19/01/2015, às 13h20min	69	0	0
3	22/01/2015, às 15h	40	30	355

Os parâmetros de entrada do modelo da célula fotovoltaica para esta dissertação são a radiação incidente e a temperatura de operação. Portanto, para cada situação de teste realizada, foi determinada a irradiância sob a superfície do painel e, então, simulada a curva $I \times V$ resultante. Os resultados simulados de radiação e de corrente foto geradas encontram-se na Tabela 5.7, e a comparação entre as curvas corrente vs. tensão experimentais e simuladas são mostradas nas Figura 5.15, 5.16 e 5.17.

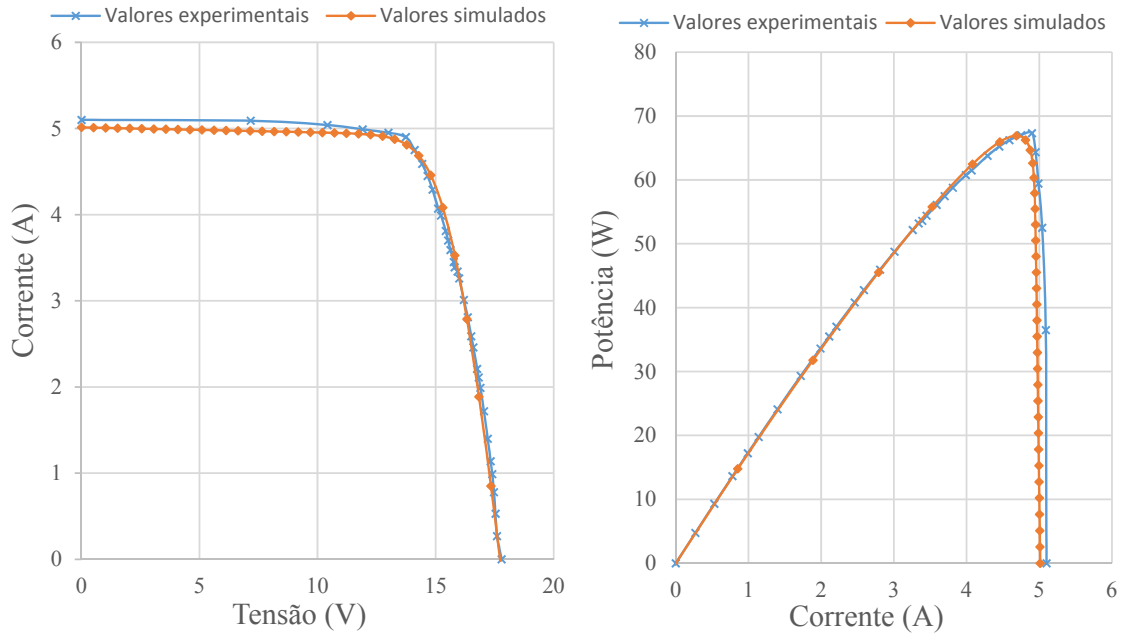


Figura 5.15 - Comparação entre os resultados experimentais e simulados para a condição de teste 1.

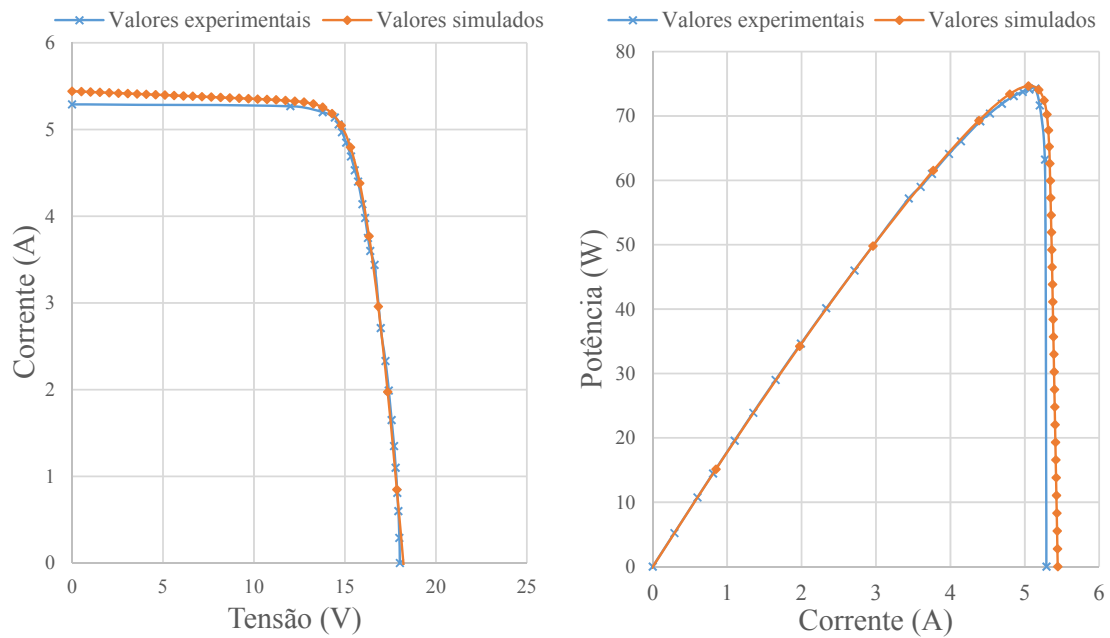


Figura 5.16 - Comparação entre os resultados experimentais e simulados para a condição de teste 2.

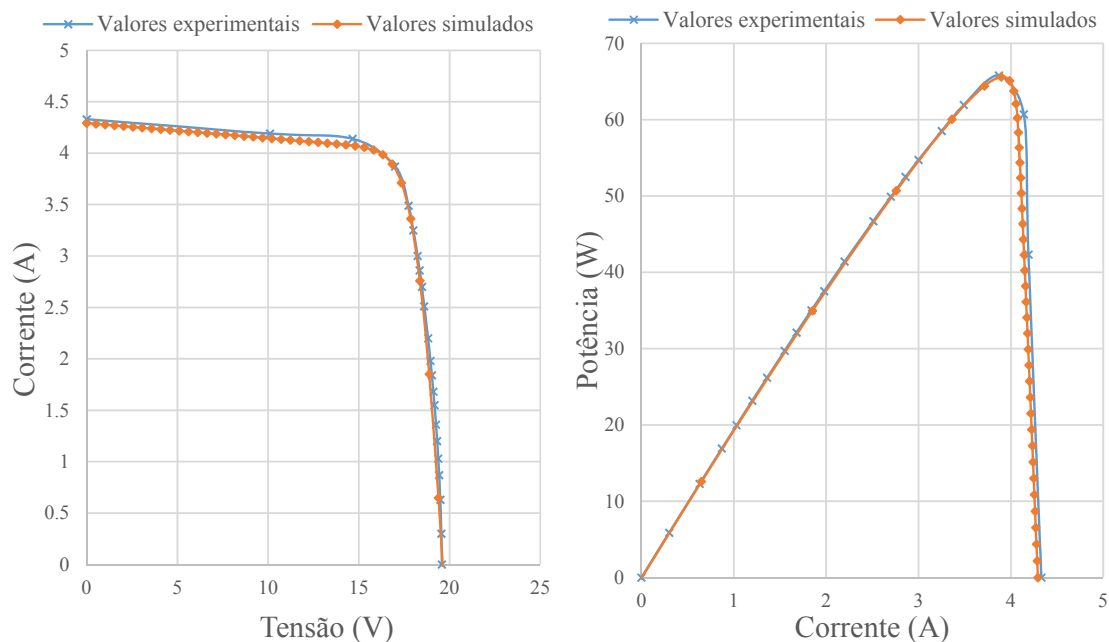


Figura 5.17 - Comparação entre os resultados experimentais e simulados para a condição de teste 3.

Tabela 5.7 - Resultados simulados de radiação incidente e corrente fotogerada para as diferentes condições de teste.

Teste	Radiação incidente (W/m ²)	Corrente de curto-circuito (A)
1	933,7	5,031
2	1028,1	5,467
3	865,0	4,305

5.5.2 Validação do modelo de energia produzida e rastreamento mecânico

Para verificar a confiabilidade dos resultados da energia produzida pelo modelo fotovoltaico sob diferentes condições de posicionamento, foram realizados ensaios práticos com três módulos idênticos Siemens ProCharger[®] 4JF. Foram construídas estruturas de suporte com ajuste manual do ângulo de inclinação e de azimute, uma carga resistiva de 2,2 Ω foi colocada na saída de cada painel PV e a corrente foi aferida com uso do sensor ACS 712. Os módulos foram posicionados conforme explica a Tabela 5.8 e a aquisição das leituras de

corrente foi feita a cada três minutos, através de um *data logger* implementado no microprocessador Tiva™ C TM4C123G, da *Texas Instruments*.

Tabela 5.8 - Condições de teste realizadas com módulos PV.

Módulo	Posicionamento	Inclinação	Azimute	Intervalo de correção
1	Fixo	35°	0	-
2	Rastreo em 1E – 3 posições otimizadas	35°	Otimizado	2 correções
3	Rastreo em 2E	Solar	Solar	De hora em hora

O ensaio foi realizado nas dependências do campus universitário da UFSM, das 8h30min às 18h30min, no dia 1º de fevereiro de 2015. Foi calculado previamente, para essa data, os ângulos ótimos de azimute e horário de correção para o método de rastreo em um eixo proposto nessa dissertação, expressos na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Posições otimizadas para o rastreo em um eixo, para o dia 32 do ano.

Posição	Azimute	Intervalo de tempo
1	95,65°	Até às 11h48min
2	7,44°	Das 11h48min às 13h48min
3	269,90°	A partir das 13h48min

As Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 apresentam a comparação entre a potência de saída dos módulos medida experimentalmente e simulada, para o painel em posição fixa, rastreo em um eixo otimizado e rastreo em dois eixos, respectivamente.

A análise das Figuras 5.18 até 5.20 mostra a forte influência na potência produzida pelos painéis devido a passagem de nuvens. Os resultados do modelo proposto indicam confiabilidade para prever a energia fotovoltaica produzida em diferentes condições de rastreo, apesar da discrepância entre valores práticos e simulados. O erro encontrado, especialmente no período de meio-dia solar, pode ser explicado por um posicionamento incorreto dos módulos devido ao ajuste manual, e diferenças entre a temperatura simulada e real.

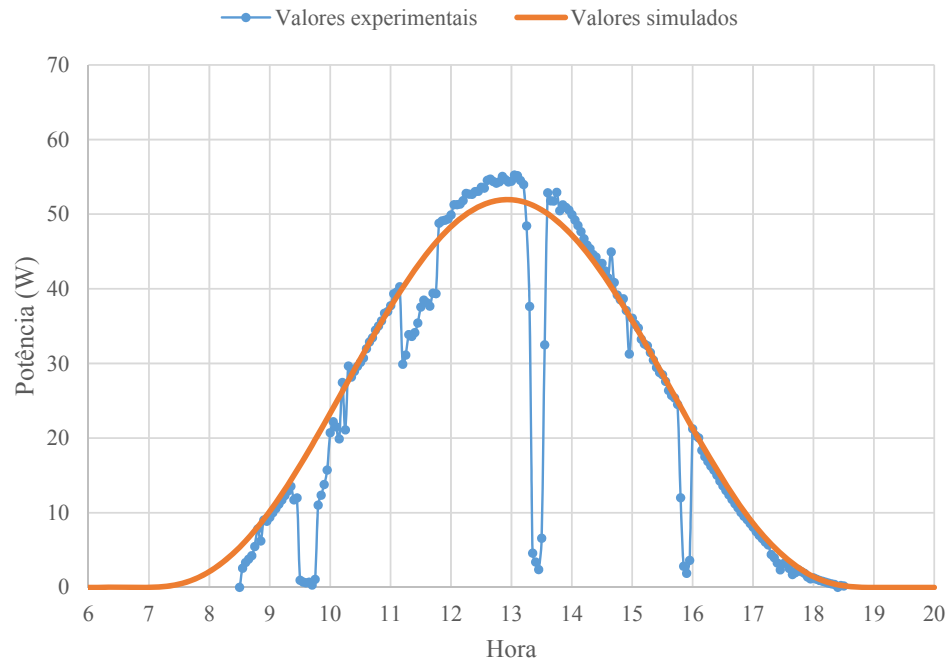


Figura 5.18 - Comparação entre potência medida e simulada para painel em posição fixa.

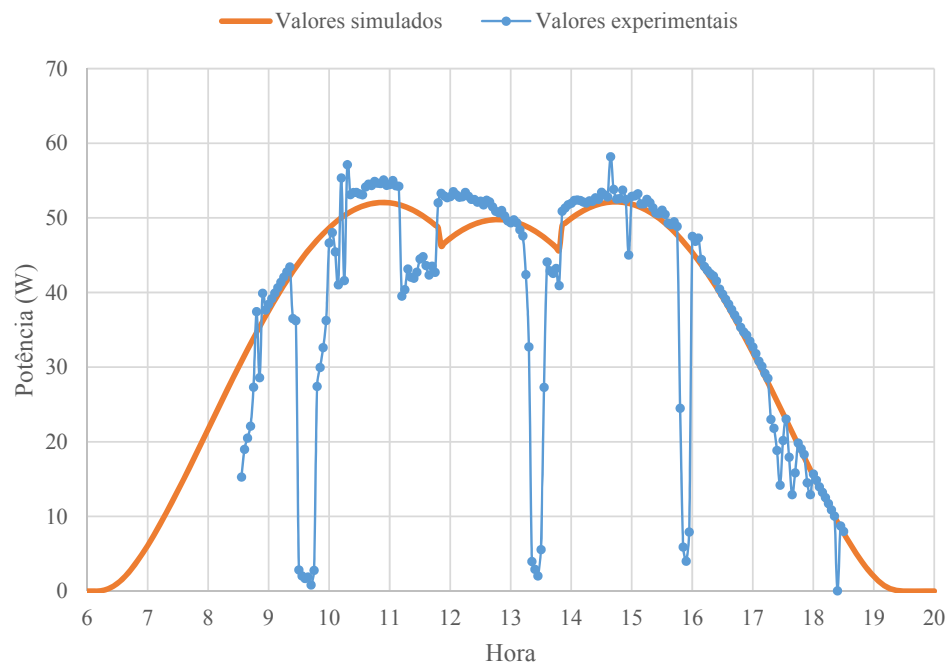


Figura 5.19 - Comparação entre potência medida e simulada para painel em rastreamento otimizado de um eixo.

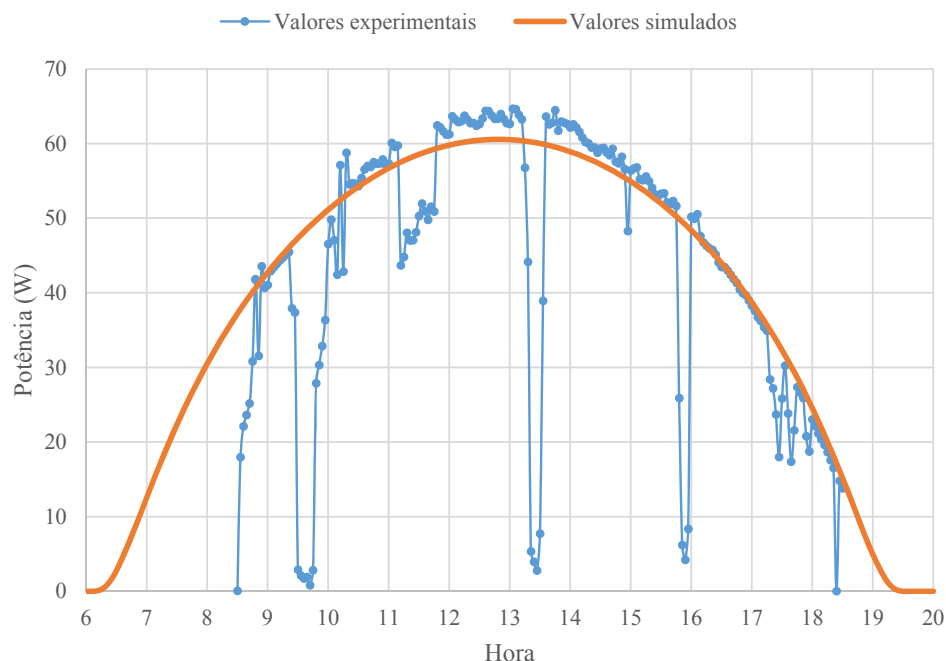


Figura 5.20 - Comparação entre potência medida e simulada para painel em rastreamento em dois eixos.

5.6 Análise do ganho energético

Com os resultados apresentados até esta seção, tornou-se possível prever com confiabilidade aceitável a posição solar e a radiação global incidente sobre uma superfície arbitrariamente orientada, em qualquer instante. Com essa informação, a modelagem do painel fotovoltaico permite o cálculo da potência de saída sob qualquer condição de radiação e temperatura.

Mostrou-se no Capítulo 3, que a temperatura de operação da célula fotovoltaica é um parâmetro chave na eficiência da conversão de energia. Dessa forma, para realizar uma análise anual do desempenho de uma central fotovoltaica foram obtidos dados do INMET a respeito da temperatura média e amplitude diária para Santa Maria, ao longo do ano. Assim, os cálculos apresentados a seguir levam em conta uma média anual da temperatura ambiente para cada intervalo de hora. Como o painel fotovoltaico modelado na seção 5.5 possui potência nominal de 75 W, os resultados apresentados nesta subseção consideram uma central com 140 módulos, resultando em 10,5 kW. Essa extrapolação foi feita para uma comparação com o projeto de

pesquisa ao qual é destinado essa dissertação, que irá implantar uma central fotovoltaica com 10 kW. Ainda, ressalta-se novamente que os resultados de simulação a seguir são para condições climáticas ideais, sem levar em conta nebulosidade ou eventuais sombreamentos, prevendo a máxima potência possível a ser produzida pela célula solar.

5.6.1 Montagem fixa sob diferentes ângulos

Por ser a opção com menor custo de investimento inicial e manutenção, a geração de energia fotovoltaica em montagem fixa com ângulo de inclinação é tomada como referência de comparação para as demais análises. Um ângulo de inclinação igual a da latitude do local é comumente adotado, e firmado como a posição que garante a melhor média de produção energética. Porém, a análise da Figura 5.12 indica que mesmo em uma instalação fotovoltaica sem movimentação eletromecânica existe margem para maximizar a energia produzida. Em uma central de porte pequeno ou médio, torna-se viável o ajuste manual do ângulo das estruturas que suportam os painéis, uma vez que essas estruturas sejam projetadas e construídas de modo a permitir essa correção com facilidade.

A Tabela 5.10 mostra, em kWh, a geração fotovoltaica para uma central de geração com montagem fixa para diferentes ângulos de inclinação.

Tabela 5.10 - Energia mensal produzida simulada para montagem fixa em diferentes condições de ângulo de inclinação.

	Energia acumulada no mês (kWh)						Ajuste do ângulo	
	Ângulo de inclinação						Mensal	Tri-mestral
	15°	20°	25°	30	35°	40°		
Jan	2510	2442	2356	2252	2131	1994	2582	2573
Fev	2202	2181	2143	2088	2018	1932	2207	2204
Mar	2229	2258	2270	2264	2240	2201	2269	2264
Abr	1830	1898	1952	1992	2016	2024	2024	2054
Mai	1562	1652	1731	1796	1848	1886	1916	1816
Jun	1349	1442	1524	1594	1653	1699	1757	1699
Jul	1479	1572	1654	1724	1780	1823	1868	1863
Ago	1767	1846	1912	1964	2000	2022	2027	2024
Set	2047	2092	2121	2134	2131	2112	2135	2048
Out	2380	2455	2431	2314	2328	2250	2381	2437
Nov	2421	2368	2297	2209	2104	1983	2469	2465
Dez	2523	2441	2342	2224	2090	1941	2617	2604
Total	24299	24648	24732	24554	24339	23867	26253	26050

A análise da Tabela 5.12 mostra que, para a localidade de Santa Maria, RS, uma inclinação de 25° em relação ao solo resulta numa maior geração de energia ao longo do ano. O ajuste ao início de cada mês com um ângulo otimizado para o período oferece um aumento de 6,15% de produção de kWh. Ajustando o ângulo em um intervalo de três meses, o ganho é de 5,33%, quantia considerável levando em conta a simplicidade do método e independência de processo automatizado.

Em um sistema de geração distribuída, seja residencial, comercial ou industrial, o processo de ajuste manual como mostrado nesta dissertação poderia ser feito sem necessidade de técnico especializado. Se o projeto da estrutura for com o propósito de fácil manuseio, os ângulos ótimos para cada estação ou mês podem ser previamente estabelecidos.

5.6.2 Rastreador com um eixo

A movimentação das superfícies de painéis fotovoltaicos ao longo do dia de Leste à Oeste mantendo uma inclinação com o solo fixa foi simulada para os mesmos parâmetros descritos anteriormente.

A Tabela 5.11 apresenta a produção de energia mensal da central fotovoltaica utilizando rastreador azimutal para diferentes ângulos de inclinação com o solo. A Tabela 5.12 mostra os resultados para o mesmo sistema de rastreador, porém otimizado com o melhor ângulo de inclinação com o solo e para correção angular em períodos diferentes: a cada 4 minutos (variação de 1° na posição do Sol), de hora em hora, a cada 2 horas, e três correções ao dia longo do dia.

Sistemas comerciais com rastreadores mecânicos, como os da fabricante alemã Deger Energy, que utilizam sensores de luminosidade para rastrear o Sol estão continuamente ativos e em busca de uma nova posição, método chamado “*hunting*”. O ponto negativo dessa tática é o grande aumento de consumo elétrico e desgaste mecânico, especialmente em estruturas que comportam número elevado de módulos.

5.6.3 Rastreador com dois eixos

Usando a mesma metodologia da seção 5.6.2, foi simulada a geração de energia da central fotovoltaica utilizando rastreadores com dois eixos, seguindo o azimute e a elevação do

Sol. A Tabela 5.13 apresenta os resultados para um rastreamento em tempo real, a cada 4 minutos, de hora em hora, a cada 2 horas, e em três posições diárias.

Tabela 5.11 - Energia mensal produzida simulada para rastreador azimutal em diferentes condições de ângulo de inclinação.

	Energia acumulada no mês (kWh)						
	Ângulo de inclinação com o solo						
	15°	20°	25°	30°	35°	40°	50°
Jan	3055	3163	3247	3306	3340	3348	3330
Fev	2588	2692	2774	2836	2876	2894	2890
Mar	2522	2646	2750	2834	2896	2935	2953
Abr	2006	2132	2242	2335	2411	2468	2506
Mai	1677	1805	1921	2021	2107	2176	2230
Jun	1436	1557	1667	1764	1848	1918	1973
Jul	1579	1706	1820	1921	2007	2078	2133
Ago	1918	2047	2161	2259	2340	2403	2448
Set	2282	2404	2508	2593	2658	2703	2727
Out	2752	2869	2963	3036	3085	3111	3112
Nov	2912	3017	3099	3158	3192	3202	3188
Dez	3105	3212	3294	3351	3382	3381	3367
Total	27832	29249	30446	31413	32141	32617	32856

Tabela 5.12 - Energia mensal produzida para rastreador azimutal com 50° de inclinação com o solo e em diferentes períodos de correção de posição.

	Energia acumulada no mês (kWh)			
	Período de correção			
	4 minutos	1 hora	2 horas	3 posições
Jan	3330	3279	3256	3227
Fev	2890	2857	2839	2792
Mar	2953	2941	2924	2871
Abr	2506	2520	2507	2469
Mai	2230	2262	2251	2222
Jun	1973	2011	2001	1978
Jul	2133	2169	2158	2132
Ago	2448	2470	2457	2422
Set	2727	2725	2709	2669
Out	3112	3084	3065	3024
Nov	3188	3141	3125	3089
Dez	3367	3311	3293	3266
Total	32856	32769	32585	32159

A análise da Tabela 5.13 mostra que a energia produzida por um sistema de rastreamento em 2 eixos pode ter ganho de até 40,5% em relação a uma montagem fixa com ângulo de 25° para condições ideais de insolação em Santa Maria. Nota-se, também, que não há diferença significativa entre realizar um rastreamento a cada variação angular do Sol ou de hora em hora, o que diminuiria consideravelmente o consumo e o desgaste eletromecânico.

Tabela 5.13 - Energia mensal produzida para rastreador em dois eixos e em diferentes períodos de correção de posição.

	Tempo real	Energia acumulada no mês (kWh)			
		Período de correção			
		4 minutos	1 hora	2 horas	3 posições
Jan	3607	3600	3591	3567	3378
Fev	3076	3070	3065	3042	2887
Mar	3082	3076	3072	3048	2920
Abr	2596	2591	2589	2569	2489
Mai	2326	2322	2320	2303	2248
Jun	2075	2071	2070	2055	2010
Jul	2233	2229	2228	2212	2159
Ago	2538	2533	2531	2512	2439
Set	2831	2825	2822	2800	2702
Out	3285	3279	3270	3247	3115
Nov	3435	3428	3415	3392	3238
Dez	3663	3656	3644	3620	3441
Total	34747	34681	34616	34367	33025

Ainda, realizando o rastreamento nas três posições otimizadas propostas por essa dissertação, o ganho de energia em relação à montagem fixa é de 33,5%. Essa técnica necessita de apenas três movimentos ao longo de um dia, e resulta em uma diminuição de apenas 4,8% em relação ao rastreio de 4 em 4 minutos.

A Figura 5.21 mostra a produção energética mensal para as técnicas tradicionais utilizadas (montagem fixa, rastreio um eixo a cada 4 minutos, rastreio dois eixos a cada 4 minutos) e as soluções aqui propostas para otimizar a eficiência da central fotovoltaica (fixo com ajuste trimestral).

5.7 Análise da tática proposta

O rastreo em um eixo otimizado proposto nesta dissertação determina, para cada dia, três ângulos ótimos de azimute da superfície fotovoltaica, e os respectivos horários a serem realizados os ajustes eletromecânicos. O ângulo de inclinação com o solo também foi otimizado através de simulação, variando o método de rastreo 1E para diferentes ângulos de inclinação. Os resultados apresentados a seguir correspondem a escolha ótima do ângulo com o solo, igual a 50° ($\beta = 50^\circ$).

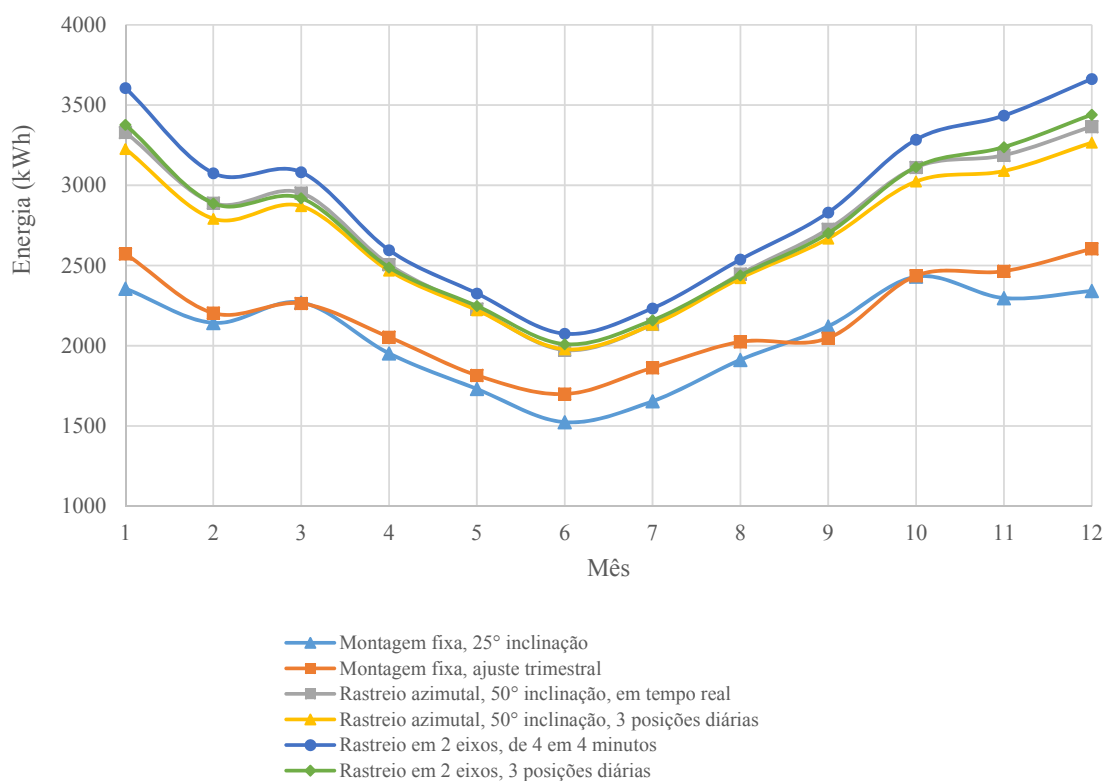


Figura 5.21 - Comparação da geração energética mensal entre diferentes topologias de montagens fixas e rastreamento.

As Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 mostram a radiação incidente, em kW/m^2 , numa superfície com rastreo em 2E e com rastreo em 1E otimizado em três posições, para os dias de solstício de verão e inverno, e equinócio de primavera. Como o ângulo usado pode ser considerado alto para a latitude de Santa Maria, é visível que no período de verão o rastreador tem baixo desempenho no período de meio dia solar. Contudo, a tática compensa em uma média anual através de um bom aproveitamento durante as manhãs e tardes, e no meio-dia de outono e primavera.

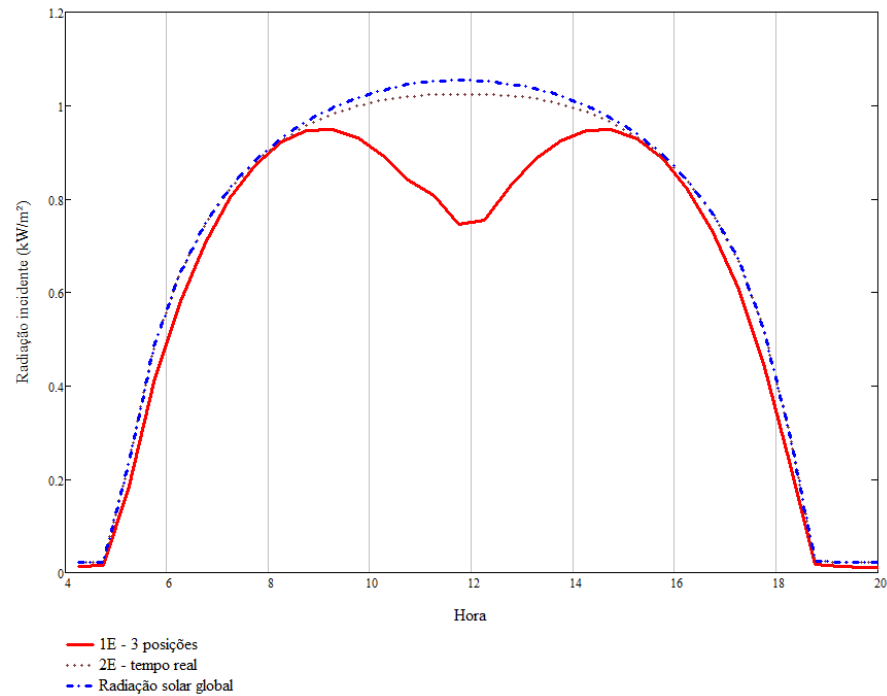


Figura 5.22 – Simulação de radiação incidente em superfície com rastreamento em um eixo otimizado e dois eixos, para o solstício de verão.

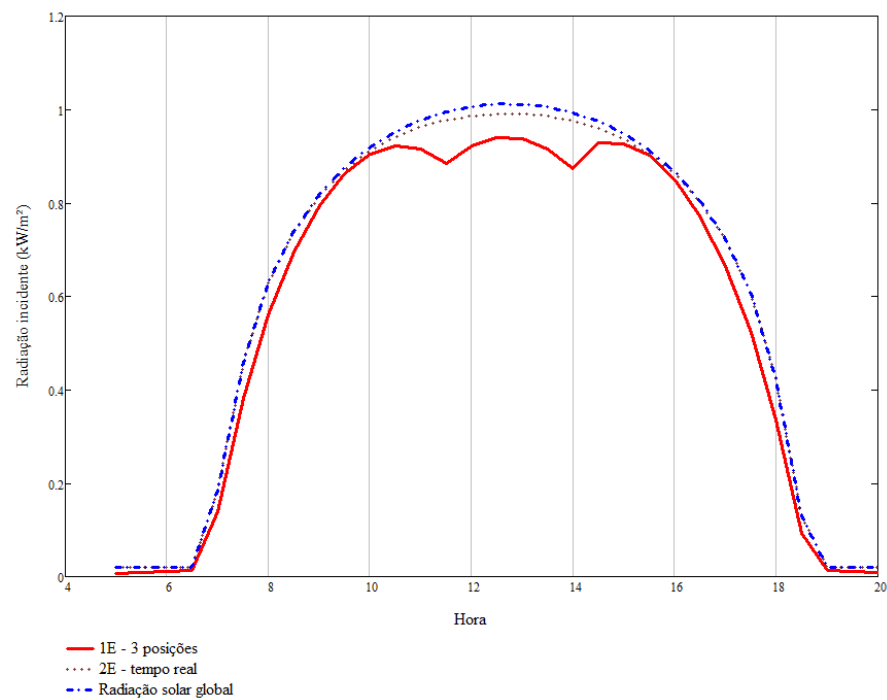


Figura 5.23 - Simulação de radiação incidente em superfície com rastreamento em um eixo otimizado e dois eixos, para o equinócio de outono.

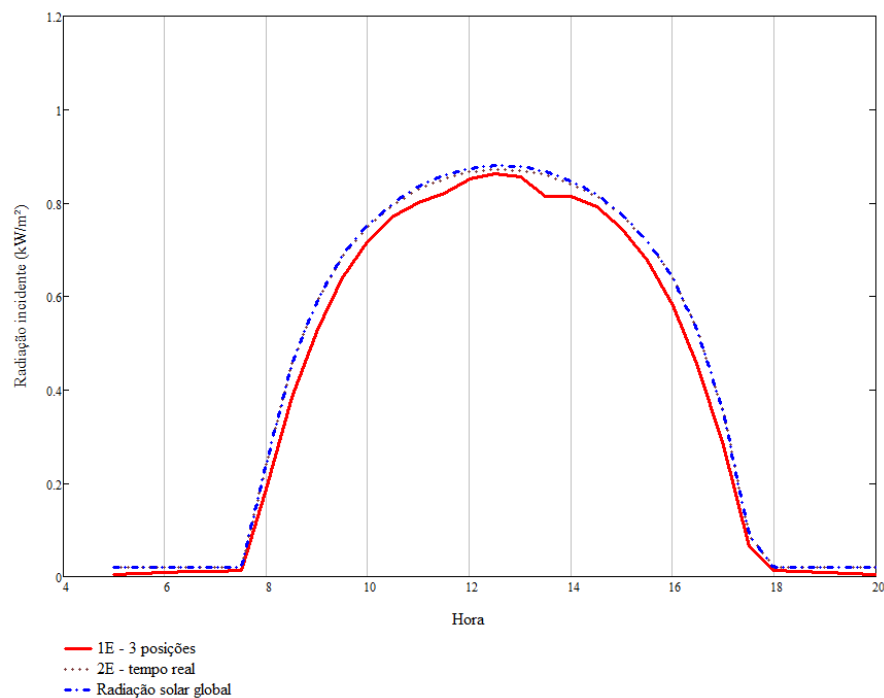


Figura 5.24 - Simulação de radiação incidente em superfície com rastreo em um eixo otimizado e dois eixos, para o solstício de inverno.

5.7.1 Consumo e perdas

O rastreador solar de baixo consumo proposto por (AHMAD; SHAFIE; AB KADIR, 2013) utilizou um motor de baixa potência para corrigir a posição em dois eixos de um módulo fotovoltaico de 38 W. A técnica utilizada consistia em movimentar o módulo a cada variação de 10° da elevação solar, e a cada 1° do azimute. Os ensaios experimentais apontados pelos autores indicam os seguintes valores de consumo para o motor de 3,19 V:

- **Movimento azimutal:** 0,15 A de partida, 0,05 A em regime, 1,1 s para mover 1° ;
- **Aumento da inclinação:** 0,6 A de partida, 0,34 A em regime, 19 s para mover 10° ;
- **Diminuição da inclinação:** partida desprezada, 0,19 A em regime, 14 s para mover 10° .

Com valores indicados acima, é possível calcular o consumo elétrico do motor para cada dia, conhecendo a trajetória solar. A Tabela 5.14 traz o número de correções empregadas pelo controle proposto por (AHMAD; SHAFIE; AB KADIR, 2013) e também na tática de rastreo com 1E otimizado e o consumo elétrico do motor e os, para o período de 1 a 31 de janeiro.

Tabela 5.14 - Comparação entre consumo de táticas de rastreo.

Rastreo nos 31 dias de janeiro		
Técnica de rastreo	Número de movimentos eletromecânicos	Consumo elétrico (W.h)
2-eixos (AHMAD; SHAFIE; AB KADIR, 2013)	7601	3,77
1-eixo, 3 posições otimizadas	124	0,37

Apesar de a quantidade de movimento angular total executada pelas duas técnicas de rastreo não serem tão discrepantes, o diferencial encontra-se no número de execuções de correção. O movimento excessivo do rastreador resulta não só no maior desgaste mecânico, mas também no maior consumo devido a corrente de partida, fato esse que deve ser ampliado severamente em um rastreador comercial que utiliza motores de média potência.

5.8 Resumo do capítulo

Este capítulo apresentou os resultados obtidos por simulação e suas validações experimentais. Foi analisada etapa por etapa a metodologia proposta para análise de geração fotovoltaica, desde a correta previsão do posicionamento solar, nível de radiação incidente sobre superfícies e modelagem do painel fotovoltaico.

Com a comparação do modelo de radiação incidente com dados meteorológicos foi possível determinar com confiabilidade a energia solar disponível em uma superfície de módulo PV em qualquer posição relativa ao solo. Aliado a isso, os resultados da modelagem proposta mostraram a eficácia em prever a curva corrente vs. tensão do painel utilizado, assim como sua potência máxima em função da radiação incidente e temperatura de operação.

Os resultados de simulação de uma central de 10,5 kWp foram apresentados, utilizando como referência os módulos da fabricante Siemens, cujos parâmetros foram calculados. Foram apresentados os resultados para a produção de energia dessa planta, em condições climáticas ideais evidenciando que o rastreamento de painéis com dois eixos possui maior ganho energético, porém, obtendo resultados satisfatórios com a otimização de um rastreador de um eixo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Nesse capítulo são apresentadas as principais conclusões dessa dissertação. São discutidos os resultados da modelagem do painel fotovoltaico e a importância dos parâmetros encontrados em função da temperatura. As técnicas de rastreamento foram aplicadas conjuntamente com a projeção de radiação incidente.

A modelagem do painel fotovoltaico pela metodologia apresentada, em função da temperatura e radiação incidente, permitiu a previsão da potência produzida pelo módulo Siemens ProCharger® 4JF em qualquer condição de operação. As Figuras 5.15 até 5.17 indicam alta precisão entre resultados de simulação da curva característica do painel PV em relação a ensaios experimentais. A metodologia desenvolvida para determinação da posição do Sol e irradiação no solo, sem nebulosidade, foi utilizada para realizar uma análise da energia solar disponível por dia, e as Figuras 5.18 até 5.20 mostram a confiabilidade nos resultados para previsão da produção de energia fotovoltaica com uso de rastreadores mecânicos.

Foi apresentado, pela Tabela 5.10, a produção mensal de energia prevista para uma central fotovoltaica com montagem fixa, indicando que o ângulo de inclinação com o solo de 25° apresentou melhor desempenho para a cidade de Santa Maria. O ajuste mensal do ângulo de inclinação, com valores otimizados obtidos pela Figura 5.12, apresentou um ganho de 6,15% em relação a montagem com β igual a 25°. Um ajuste sazonal a cada três meses, também com valores angulares otimizados, resultou em um ganho de 5,33%. Dessa forma, para centrais fotovoltaicas de pequeno porte, justifica-se o uso de estruturas com possibilidade de regulagem manual do ângulo de inclinação do painel PV em relação ao solo.

O uso de rastreadores mecânicos foi analisado através da energia produzida por uma central PV de 10,5 kW em Santa Maria. Os resultados apresentados pela Tabela 5.11 indicam que um rastreador mecânico de um eixo, com variação azimutal, apresenta melhor desempenho com um ângulo β igual a 50°. Nessa condição, ocorre um aproveitamento pobre da energia solar

no período de meio dia solar no verão, porém, a escolha desse ângulo é compensada com maior produção energética nos períodos das manhãs e tardes durante todo o ano, e bom desempenho nas demais estações, como mostram as Figuras 5.22 até 5.24.

A Tabela 5.12 aponta que o ganho energético de um rastreador de um eixo com ajuste a cada quatro minutos é apenas 2,65% maior do que com ajuste de hora em hora. Essa pequena diferença, somada ao alto consumo de rastreadores comerciais, indicam que uma estratégia de rastreamento com menor número de ajustes fornece uma opção viável de produção energética. Resultados análogos são mostrados na Tabela 5.13, para um rastreador controlado em dois eixos, onde a estratégia com ajustes em intervalos de duas horas teve uma produção de energia fotovoltaica com diferença menor do que 1% em relação a com ajustes a cada quatro minutos.

Foi proposta uma estratégia de rastreamento solar em um eixo fundamentada em três posições diárias, calculadas de modo otimizado para cada dia do ano, de modo a maximizar o ganho da energia fotovoltaica produzida, mantendo a simplicidade e menor custo da técnica com movimentador em um eixo. O aumento de energia produzida anual dessa estratégia proposta, em relação a uma montagem fixa com 25° de inclinação, foi de 33,5%.

O consumo elétrico de rastreadores de dois eixos, como o da fabricante Deger Energy, que corresponde a 10% do ganho de energia, é fator determinante na escolha dessa topologia. A produção energética da estratégia proposta de três posições diárias otimizadas foi 6,73% menor do que o ganho com rastreador em dois eixos e ajuste a cada quatro minutos, valor menos significativo do que o gasto para movimentação em dois eixos. Além disso, o número de correções eletromecânicas é significativamente menor, indicado pela Tabela 5.14, o que resulta, também, em menor desgaste mecânico do que rastreadores de dois eixos.

Considerando, portanto, o menor custo associado, complexidade e o bom desempenho quanto a energia fotovoltaica produzida, a estratégia de rastreamento proposta em um eixo com três posições otimizadas é considerada a ideal para uso visando a maximização energética da central a ser construída no projeto de pesquisa desenvolvido entre CEESP-CEEE.

6.1 Contribuições do Trabalho

i. A primeira contribuição dessa dissertação é o desenvolvimento de uma metodologia que permite uma análise minuciosa da produção de energia de painéis fotovoltaicos em condições de rastreamento e em montagem fixa. Como a potência de saída de um módulo PV é extremamente sensível à radiação incidente e a temperatura de operação, esses parâmetros foram levados em conta em todas as etapas. Apesar de os resultados terem sido apresentados para o local de Santa

Maria, e com o painel fotovoltaico da fabricante Siemens, o modelo proposto pode ser adequado a qualquer localidade e os parâmetros podem ser facilmente ajustados para um módulo comercial diferente.

ii. Foi estabelecida, em detalhes, a máxima energia solar disponível para o local onde será executada a central fotovoltaica. O ângulo ótimo para produção anual de energia elétrica em uma montagem fixa para painéis PV, para o local de Santa Maria, foi determinado como sendo 25° de inclinação em relação ao solo, contradizendo a tradicional escolha do ângulo igual à latitude local. Uma proposta simples de instalação com ajuste manual trimestral do ângulo de inclinação foi apresentada, com previsão de acréscimo de 5,33% na produção de energia anual.

iii. Também foi apresentada uma proposta de rastreamento com 1 eixo com 3 posições diárias otimizadas, calculadas previamente de acordo com a trajetória solar no local. Essa tática de rastreamento reduz o número de ajuste de posição, preservando a estrutura e diminuindo o desgaste eletromecânico e consumo elétrico. Em condições climáticas ideais, esse método possibilita um acréscimo de 33,5% na geração anual fotovoltaica em relação a montagem fixa.

6.2 Propostas de trabalhos futuros

A metodologia e simulações desenvolvidas levaram em conta condições ideais de céu limpo, devido à dificuldade e arbitrariedade de modelar condições climáticas adversas. Os resultados apresentados, portanto, indicam os máximos de geração possíveis. Pretende-se, no futuro, incluir modelos de nebulosidade para poder avaliar o desempenho dos módulos fotovoltaicos e das táticas de rastreamento em condições reais. E, também, aperfeiçoar o método de previsão da temperatura de operação do painel PV em condições.

Apesar de possuir um consumo elétrico e desgaste maior, o rastreamento em dois eixos permite mais versatilidade quanto ao aproveitamento da radiação difusa. Uma técnica com uso aliado entre sensores de luminosidade e cálculos astronômicos pode fornecer maior flexibilidade para o controle de posição dos painéis.

Finalmente, será feita uma implementação da tática de rastreamento otimizada em modo autônomo, a ser realizada durante o desenvolvimento da central fotovoltaica de 10 kW pelo CEESP/UFSM, possibilitando uma melhor análise de sua performance.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCETTA, G.; FERRARINI, L. **Energy production estimation of a photovoltaic system with temperature-dependent coefficients.** IEEE ICSET. 2012
- ADAMO, F. et al. Characterization and Testing of a Tool for Photovoltaic Panel Modeling. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, n. 5, p. 1613–1622, May, 2011.
- AHMAD, S.; SHAFIE, S.; AB KADIR, M. Z. A. **Power Feasibility of a Low Power Consumption Solar Tracker.** Procedia Environmental Sciences, v. 17, p. 494–502, 2013.
- ALEXANDRU, C. **The design and optimization of a photovoltaic tracking mechanism.** International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, p. 436–441, mar. 2009.
- AL-NASER, Q. A. H.; AL-BARGHOOTHI, N. M. A.; AL-ALI, N. A. S. **The Effect of Temperature Variations on Solar Cell Efficiency.** International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications, p. 108–112, 2012.
- AZZOUZI, M. et al. **Performances optimization from solar radiation to photovoltaic cell.** 3rd International Conference on Systems and Control, 2013
- BENDA, V.; MACHACEK, Z. **A note on parameters of photovoltaic cells in dependence on irradiance and temperature.** n. November, p. 7–10, 2010.
- BLANCO-MURIEL, M.; ALARCON-PADILLA, D. C.; LOPEZ-, T. **Computing the solar vector.** Solar Energy, v. 70, n. 5, p. 431–441, 2001.
- BORGES, V. P. et al. **Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas , Bahia.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 1, p. 74–80, 2010.
- CHAN, D. S. H. et al. **A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters.** Solid-State Eletronics, v. 29, n. 3, p. 329–337, 1986.
- CHEN, Y.-M.; LEE, C.-H.; WU, H.-C. **Calculation of the Optimum Installation Angle for Fixed Solar-Cell Panels Based on the Genetic Algorithm and the Simulated-Annealing Method.** IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 20, n. 2, p. 467–473, jun. 2005.
- CHIN, C. S.; BABU, A.; MCBRIDE, W. **Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink.** Renewable Energy, v. 36, n. 11, p. 3075–3090, nov. 2011.
- CHRISTENSEN, C. B.; BARKER, G. M. **Effects of Tilt and Azimuth on Annual Incident Solar Radiation for United States Locations clearness index.** Proceeding of Solar Forum. Anais...Washington: Solar Energy, 2001

CHRISTOPHER, I. W. **Low cost automatic solar energy trapping system**. p. 227–232, jan. 2011.

CLIFFORD, M. J.; EASTWOOD, D. **Design of a novel passive solar tracker**. Solar Energy, v. 77, n. 3, p. 269–280, set. 2004.

COELHO, A. F. J. C. N. **New Trends in Photovoltaic Systems**. Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

COELHO, R. F.; CONGER, F.; MARTINS, D. C. **A proposed photovoltaic module and array mathematical modeling destined to simulation**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, n. I, p. 1624–1629, 2009.

EUGÊNIA, M. et al. **Adjustment of the Clear Sky Coefficients for the Transmission of Solar Radiation under the Ambient Conditions in Fortaleza**. WORLD CLIMATE AND ENERGY EVENT. Rio de Janeiro, 2002

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. **Global Market Outlook for Photovoltaics**. 2014

FARIVAR, G. A. **New Approach for Solar Module Temperature Estimation Using the Simple Diode Model**. v. 26, n. 4, p. 1118–1126, dez. 2011.

FERNANDES, F. T. et al. **Improved analytical solution to obtain the MPP of PV modules**. IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

GOPINATHAN, K. K. **Solar radiation on inclined surfaces**. Solar Energy, v. 45, n. 1, p. 19–25, jan. 1990.

GOPINATHAN, K. K. **Solar radiation on variously oriented sloping surfaces**. Solar Energy, v. 47, n. 3, p. 173–179, jan. 1991.

GREEN, M. A. **Solar Cells – Operating Principles, Technology and System Application**. UNSW, Kensington, 1992.

HOTTEL, H. C. **A SIMPLE MODEL FOR ESTIMATING THE TRANSMITTANCE OF DIRECT SOLAR RADIATION THROUGH CLEAR ATMOSPHERES**. Solar Energy, v. 18, p. 129–134, 1976.

HUANG, B.-J. et al. **Improving Solar PV System Efficiency Using One-Axis 3-Position Sun Tracking**. Energy Procedia, v. 33, p. 280–287, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Solar Photovoltaics Technology Brief**. 2013

IQBAL, M. **AN INTRODUCTION**

JAKHRANI, A. Q. et al. **A simple method for the estimation of global solar radiation from sunshine hours and other meteorological parameters**. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET) Sri Lanka, 2010

- JENSEN, M. et al. Model and Simulation of a 75kW PV Solar Array. **IEEE**, v. 0260, 2010.
- JINAYIM, T. et al. **Highly Efficient Low Power Consumption Tracking Solar Cells for White LED-Based Lighting System**. International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering, v. 1, n. 4, p. 670–675, 2007.
- KHAN, M. M.; AHMAD, M. J. **Estimation of global solar radiation using clear sky radiation in Yemen**. Journal of Engineering Science and Technology Review, v. 5, n. 2, p. 12–19, 2012.
- KOUSSA, M. et al. **Sun Tracker Systems Effects on Flat Plate Photovoltaic PV Systems Performance for Different Sky States: A Case of an Arid and Hot Climate**. Energy Procedia, v. 18, p. 839–850, 2012.
- LENZ, J. M., TRAPP, J. G., FARRET, F. A. **New methodology to determinate photovoltaic parameters of solar panels**. Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), p 275-279, 2011.
- LINEYKIN, S.; AVERBUKH, M.; KUPERMAN, A. **Issues in Modeling Amorphous Silicon Photovoltaic Modules by Single-Diode Equivalent Circuit**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 61, n. 12, p. 6785–6793, dez. 2014.
- MACHACEK, Z.; BENDA, V.; CERNA, L. **Electrical parameters of c-Si and CIS photovoltaic cells in dependence on temperature and irradiance**. 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2011
- MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**, John Wiley & Sons, 2004
- MOLE, P. J., RORISON, J. M., del ALAMO, J. A., LANCEFIELD, D. **Electron Mobility, Diffusion and Lifetime in c-Si**. INSPEC, Institution of Electric Engineers. London, 1999.
- NANJANNAVAR, V.; GANDHI, P.; PATEL, N. **LabVIEW based PV cell characterization and MPPT under varying temperature and irradiance conditions**. Nirma University International Conference on Engineering, 2013
- OZCELIK, S.; PRAKASH, H.; CHALLOO, R. **Two-Axis Solar Tracker Analysis and Control for Maximum Power Generation**. Procedia Computer Science, v. 6, p. 457–462, 2011.
- PETROV, L. A. **Solar Tracking Strategies**. University of Dundee, 2011.
- PLESZ, B., SÁGI, P., Timár-Horváth, V. **Enhancement Of Solar Panels' Power Generation By The Usage Of Solar Tracking**. Proceedings of ECOpole, v 3, n1, p 15-22, 2009.
- PROJECT, M. Q. **Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker**. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2010.

RAHMAN, R. **Performance Enhancement of PV Solar System by**. 6th International Conference on Electrical and Computer Engineering, 2010

RAHMAN, S. A.; VANDERHEIDE, T.; VARMA, R. K. **Generalised model of a photovoltaic panel**. IET Renewable Power Generation, v. 8, n. 3, p. 217–229, 2014.

RAMBHOWAN, Y.; OREE, V. **Improving the dual-axis solar tracking system efficiency via drive power consumption optimization**. Applied Solar Energy, v. 50, n. 2, p. 74–80, 2 ago. 2014.

REGGIANI, S. et al. **Electron and Hole Mobility in Silicon at Large Operating Temperatures — Part I: Bulk Mobility**. 490 IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, v. 49, n. 3, p. 490–499, 2002.

RIBEIRO, S. C.; PRADO, P. P. L. DO; GOLÇALVES, J. B. **Projeto e Desenvolvimento de um Rastreador Solar para Painéis Fotovoltaicos**. Simpósio de Excelência em Gestão e tecnologia, 2012

RIVINGTON, M. et al. **Evaluation of three model estimations of solar radiation at 24 UK stations**. Agricultural and Forest Meteorology, v. 132, n. 3-4, p. 228–243, out. 2005.

ŞAHIN, M.; KAPLAN, R. **Intensity and temperature dependence of photocurrent of a-Si:H Schottky diodes**. Current Applied Physics, v. 6, n. 1, p. 114–118, 2006.

SANUSI, Y. K. et al. **Comparative Study of Methods of Determine Amorphous Silicon Solar Cell Parameters**. International Journal of Engineering and Innovative Technology, v. 2, n. 12, p. 90–92, 2013.

SARAF, G. R.; HAMAD, F. A. W. **Optimum tilt angle for a flat plate solar collector**. Energy Conversion and Management, v. 28, n. 2, p. 185–191, jan. 1988.

SATHIYASEKAR, K.; NADU, T. **Modified Structure and Reflector Based Solar Photovoltaic System for Optimization of Solar Energy**. IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies, 2014

SKOPLAKI, E.; BOUDOUVIS, A. G.; PALYVOS, J. A. **A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 92, p. 1393–1402, 2008.

TAYYAN, A. A. E. L. **A simple method to extract the parameters of the single-diode model of a PV system**. Turkish Journal of Physics, v. 37, p. 121–131, 2013.

TREVELIN, F. C. **Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos**. Universidade de São Paulo, 2014.

TUDORACHE, T.; KREINDLER, L. **Design of a Solar Tracker System for PV Power Plants**. Acta Polytechnica Hungarica, v. 7, n. 1, p. 23–39, 2010.

UR RAHMAN, R. et al. **Performance enhancement of PV solar system by diffused reflection.** 2009 1st International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology, 2009.

VAN DYK, E. et al. **Long-term monitoring of photovoltaic devices.** Renewable Energy, v. 25, n. 2, p. 183–197, fev. 2002.

VENGATESH, R. P.; RAJAN, S. E. **Investigation of cloudless solar radiation with PV module employing Matlab–Simulink.** Solar Energy, v. 85, n. 9, p. 1727–1734, set. 2011.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. **Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009.

WANG, S. et al. **Design of 16m2 sundial solar tracking machine** 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011.

WONG, L. T.; CHOW, W. K. **Solar radiation model.** Applied Energy, v. 69, n. 3, p. 191–224, jul. 2001.

WOODWARD, S. J. R.; BARKER, D. J.; ZYSKOWSKI, R. F. **A practical model for predicting soil water deficit in New Zealand pastures.** New Zealand Journal of Agricultural Research, v. 44, n. 1, p. 91–109, 2001.

YAZIDI, A. et al. **Low cost two-axis solar tracker precision positioning.** IEEE, 2006

ZHOU, W.; YANG, H.; FANG, Z. **A novel model for photovoltaic array performance prediction.** Applied Energy, v. 84, n. 12, p. 1187–1198, dez. 2007.

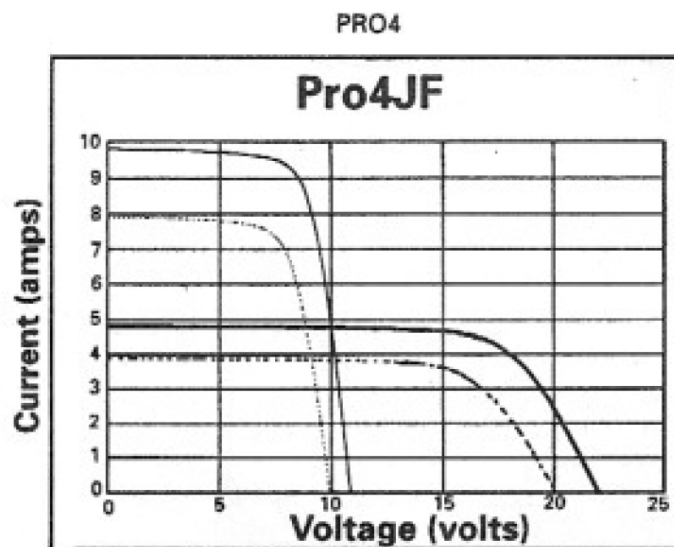
APÊNDICES

APÊNDICE A

O painel utilizado nos ensaios experimentais dessa dissertação foi o módulo ProCharger® 4JF da Siemens, com potência nominal de 75 W em 25°C e 1000 W/m². O painel PV foi utilizado na configuração “12V”, com 36 células c-Si em série. Abaixo seguem imagens retiradas diretamente do *datasheet* fornecido pelo fabricante.

SPECIFICATIONS

Electrical Characteristics:		
Model	ProCharger 4JF	
Configuration/Changeable	12V	6V
Max Power, Watts (Pmax)	75	75
Open Circuit Voltage (Voc)	21.7	10.85
Short Circuit Current (Isc)	4.8	9.6
Voltage at Load	17.0	8.5
Current at Load	4.4	8.8



ANEXOS

ANEXO A



Figura A.1: Estruturas construídas para ensaio de painéis fotovoltaicos em diferentes posicionamentos.