

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

BRUNO EXNER

**ANÁLISE COMPARATIVA DA
GERAÇÃO DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA EM SISTEMAS COM
MECANISMO SEGUIDOR DO SOL E
COM INSTALAÇÃO FIXA**

Porto Alegre
2018

BRUNO EXNER

**ANÁLISE COMPARATIVA DA
GERAÇÃO DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA EM SISTEMAS COM
MECANISMO SEGUIDOR DO SOL E
COM INSTALAÇÃO FIXA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-CCA)
apresentado à COMGRAD-CCA da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul como parte dos re-
quisitos para a obtenção do título de *Bacharel em*
Engenharia de Controle e Automação .

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ivan Müller

Porto Alegre
2018

BRUNO EXNER

**ANÁLISE COMPARATIVA DA
GERAÇÃO DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA EM SISTEMAS COM
MECANISMO SEGUIDOR DO SOL E
COM INSTALAÇÃO FIXA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC do curso *Engenharia de Controle e Automação* e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul –
Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Me. Chrystian Lenon Remes, UFRGS

Mestre pela Universidade do Estado de Santa Catarina – Joinville, Brasil

Prof. Dr. Pedro Rafael Bolognese Fernandes, UFRGS

Doutor pela Technische Universität Dortmund – Dortmund, Alemanha

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Coordenador de curso

Engenharia de Controle e Automação

Porto Alegre, dezembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial pela dedicação, incentivo e exemplo para eu continuar estudando e fazendo o melhor possível, além do apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos e irmãos Bruno Kovara, Thiago Gardin, Pedro Fetter, Felipe Lorenzi, Ramon Clivatti, Larissa Scussiato, Fábio Bazacas, Evandro Flesch e Fernando Brito, pela parceria, viagens, churrascos e conversas ao longo do curso.

Aos amigos Thiago Companhoni, Miguel Tonin, Rafael Pergher, João Assmann e Eduardo Godoy pelas tarefas desenvolvidas durante o curso, a parceria e o apoio na revisão deste trabalho.

Aos amigos de infância João Raymundo, Matheus Esteves, Matheus Diefenthaeler, e Guilherme Matte pela parceria e incentivo ao longo de todos esses anos.

Ao meu orientador, Ivan Müller, por ter acreditado no trabalho e pelo suporte ao longo da realização do mesmo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, e a todos os servidores e professores, em especial aos professores do curso de Engenharia de Controle e Automação, pela troca de conhecimentos.

Aos meus colegas da Equipe de Fórmula SAE RS Racing UFRGS, que me proporcionaram um aprendizado incalculável sobre o significado de trabalho em equipe e da enorme capacidade de um pequeno grupo em realizar um sonho.

À empresa AGCO e aos colegas que ali trabalham, em especial dos times de laboratório e simulação pelo apoio e auxílio para o desenvolvimento deste trabalho, além de proporcionarem excelente oportunidade para formação profissional.

Ao mentor Jeovano de Lima que orientou tanto no desenvolvimento das habilidades profissionais quanto nas atividades acadêmicas.

Agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram, sendo através de um incentivo ou uma crítica, estando longe ou perto.

*“The first step is to establish that something is possible;
than probability will occur.”*
Elon Reeve Musk

RESUMO

Em função do atual cenário de incentivos e demanda por fontes de energia alternativas, o presente trabalho faz uma análise comparativa da geração de energia de sistemas fotovoltaicos. Os dois sistemas avaliados são instalações com mecanismo seguidor do movimento aparente do Sol e instalações estáticas. A comparação é feita avaliando os resultados da simulação de modelos de painéis fotovoltaicos, implementados em diagramas de blocos no *software* SIMULINK®. Os valores de irradiância solar utilizados provêm de um banco de dados de uma estação meteorológica em São Martinho da Serra, no Estado do Rio Grande do Sul. Os ângulos de movimentação do mecanismo seguidor simulado foram calculados por um algoritmo de posicionamento solar, disponível em uma ferramenta *online*. Obteve-se uma estimativa de ganho médio anual de 23,7 % de energia gerada pelo sistema com seguidor em relação ao sistema fixo, sem considerar as influências da variação de temperatura e da vida útil dos componentes.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos, Simulink, Geração de energia, Posicionamento Solar.

ABSTRACT

Given the current scenario of incentives and demand for renewable energy, this work aim to provide a comparative analysis between the power generation of two photovoltaic systems. One of the systems evaluated uses a sun tracking mechanism and the other is a fixed-tilt structure. The comparison is made by evaluating the results of the photovoltaic models simulation, which are implemented via block diagrams in SIMULINK®. The solar irradiance values used stem from a database of a meteorological station in São Martinho da Serra, in Rio Grande do Sul State. The movement angles of the simulated tracker mechanism were calculated by a solar positioning algorithm, available online. An estimate of the average annual gain of 23.7 % of power generated by the tracking system compared to the fixed-tilt system was obtained, without considering the effects caused by the temperature variation and the service life of the components.

Keywords: Photovoltaic Systems, Simulink, Power Generation, Position of the Sun.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 FUNDAMENTOS SOBRE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	17
2.1 Energia Solar	17
2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica	18
2.2 Sistemas de Geração Fotovoltaicos	18
2.2.1 Modelagem de Dispositivos Fotovoltaicos	20
2.3 Geometria Sol-Terra	22
2.4 Métodos para Seguir o Movimento Aparente do Sol	23
2.4.1 Seguidores Passivos	23
2.4.2 Seguidores Ativos	23
2.5 Estado da Arte	24
3 MÉTODOS E MATERIAIS	25
3.1 Banco de Dados Solarimétricos - SONDA	25
3.2 Algoritmo de Posicionamento Solar - SunEarthTools	27
3.3 Irradiância Solar em Superfícies Inclinadas	29
3.3.1 Irradiância Solar Direta em uma Superfície Inclinada	29
3.3.2 Irradiância Solar Difusa em uma Superfície Inclinada	29
3.3.3 Aplicação dos Efeitos de Superfícies Inclinadas para o Sistema Proposto	30
3.4 Software para Simulação – MATLAB/SIMULINK®	30
3.4.1 Parâmetros utilizados na Simulação	32
4 RESULTADOS	33
4.1 Validação do Modelo no SIMULINK®	33
4.2 Simulação da Geração de Energia em um dia	35
4.3 Simulação da Geração de Energia em cinco anos	37
5 CONCLUSÃO	38
5.1 Trabalhos Futuros	38
BIBLIOGRAFIA	39

APÊNDICE A	ROTINA DADOS DE POSICIONAMENTO	41
APÊNDICE B	DIAGRAMAS DE BLOCOS DAS EQUAÇÕES	42

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Mapa de irradiância solar global	17
Figura 2:	Construção típica de uma célula fotovoltaica com base cristalina	18
Figura 3:	Painel solar com 72 células: Aparência (esquerda); esquema de ligação (direita)	19
Figura 4:	Circuitos equivalentes do modelo de uma célula fotovoltaica	20
Figura 5:	Ilustrações dos ângulos de Geometria Solar	23
Figura 6:	Localizações das estações SONDA no território nacional	25
Figura 7:	a) Estrutura e b) Sensores da estação SONDA em São Martinho da Serra - RS	26
Figura 8:	Trajetória azimutal do Sol na data 01/01/2015 em São Martinho da Serra	27
Figura 9:	Planilha com a trajetória solar de 2015 em São Martinho da Serra obtida com o SPA	28
Figura 10:	Planilha formatada com a trajetória do Sol no ano 2015 em São Martinho da Serra	28
Figura 11:	Ilustrações da irradiância solar difusa sobre uma superfície horizontal e uma superfície inclinada	30
Figura 12:	Diagrama de blocos da corrente I_{ph} implementado no SIMULINK®	31
Figura 13:	Diagrama de blocos de um conjunto fotovoltaico integrando os subsistemas do modelo	31
Figura 14:	Diagrama de blocos para simulação dos efeitos de variação de irradiância e temperatura em um dispositivo fotovoltaico	33
Figura 15:	Efeitos de variação de irradiância nas curvas de a) corrente e b) potência de um dispositivo fotovoltaico	34
Figura 16:	Efeitos da variação de temperatura nas curvas de a) corrente e b) potência de um dispositivo fotovoltaico	34
Figura 17:	Diagrama de blocos para comparação de geração de um painel com sistema seguidor e um painel com instalação fixa no dia 04/01/2015	35
Figura 18:	Simulação das potências geradas por painéis de 36 células com sistema seguidor e com instalação fixa no dia 04/01/2015	36
Figura 19:	Diferença das potências geradas na simulação com um painel de 36 células com sistema seguidor e com instalação fixa no dia 04/01/2015	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Parâmetros utilizados para validação do modelo	32
Tabela 2:	Resultados das simulações de geração de energia em cinco anos . . .	37

LISTA DE ABREVIATURAS

ARM	Arquitetura de processadores <i>Advanced RISC Machine</i>
BSRN	<i>Baseline Surface Radiation Network</i>
CSDM	<i>Complete Single-Diode Model</i>
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DDM	<i>Double-Diode Model</i>
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i>
HS	<i>Harmony Search</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISDM	<i>Ideal Single-Diode Model</i>
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
P-N	Junção produzida na ligação de semicondutores do tipo P com tipo N
PV	<i>Photovoltaic</i>
SDM	<i>Single-Diode Model</i>
SONDA	Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais
STC	<i>Standard Test Condition</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de elevação solar
A	Fator de idealidade
β	Ângulo de inclinação da superfície
δ	Ângulo de declinação solar
ΔT	Diferença da temperatura da célula e da temperatura de referência
G	Irradiância solar incidente na célula fotovoltaica
G_{STC}	Irradiância solar nominal de referência da STC
$G_{d,\beta}$	Componente de irradiância solar direta que incide em uma superfície inclinada
$G_{d,h}$	Componente de irradiância solar direta que incide em uma superfície horizontal
γ	Ângulo azimutal da superfície
γ_Z	Ângulo azimutal do Sol
H_S	Horário local
I	Corrente de saída da célula fotovoltaica
I_0	Corrente através do diodo
$I_{0,ref}$	Corrente através do diodo na STC
I_d	Irradiância solar difusa sobre uma superfície horizontal
I_{mp}	Corrente de saída no ponto de potência máxima do painel fotovoltaico na STC
I_{ph}	Corrente gerada pelo efeito fotovoltaica
$I_{SC,STC}$	Corrente nominal em curto-circuito na STC
I_S	Irradiância solar difusa sobre uma superfície inclinada
k	Constante de Boltzmann
K_i	Coeficiente da corrente de curto-circuito em função da temperatura
N_{PP}	Número de painéis conectados em paralelo
N_S	Número de células conectadas em série
N_{SS}	Número de painéis conectados em série
ω	Ângulo horário do Sol

P_{mp}	Potência máxima do painel fotovoltaico na STC
ϕ	Latitude geográfica local
q	Carga elementar do elétron
R_P	Resistência paralela da célula fotovoltaica
R_S	Resistência série da célula fotovoltaica
T	Temperatura da junção P-N
T_{ref}	Temperatura de referência da STC
θ	Ângulo de incidência dos raios solares na superfície
θ_Z	Ângulo zenital ou zênite
V	Tensão nos terminais da célula fotovoltaica
V_d	Tensão elétrica nos terminais do diodo
V_{mp}	Tensão no ponto de potência máxima do painel fotovoltaico na STC
$V_{OC,STC}$	Tensão nominal de circuito aberto na STC

1 INTRODUÇÃO

A energia empregada pelo ser humano é proveniente de diferentes fontes, as quais podem ser classificadas em duas categorias. A primeira é composta pelos recursos com reservas limitadas, sendo classificadas como não-renováveis, grupo que inclui os combustíveis fósseis e minerais como petróleo, carvão, gás natural, e urânio. A segunda categoria é formada pelas fontes com capacidades consideradas virtualmente ilimitadas enquanto a Terra e o Sol existirem, sendo classificadas como renováveis. Esse grupo, por sua vez, é composto pelos ventos, Sol, rios, ondas e marés do oceano, e várias formas de bioenergia (biomassa) (VILLALVA, 2012).

Durante as últimas décadas, devido aos alertas de limitação das reservas de combustíveis fósseis e ao aumento da poluição atmosférica, a produção de energia a partir de fontes renováveis vem se destacando como solução apropriada para a demanda da humanidade. Uma vez que, em sistemas de geração solares, o efeito fotovoltaico converte diretamente a radiação solar em energia elétrica, essa é uma das melhores escolhas para os países submetidos a alta intensidade deste tipo de radiação (BENITO, 2011).

No Balanço Energético Nacional de 2018 (EPE, 2018), fontes renováveis correspondem a 80,4 % da matriz energética elétrica brasileira. Existe uma grande dependência em fontes hidráulicas, correspondendo a 28 % de toda energia gerada. Isso faz com que a matriz seja dependente de condições climáticas e chuvas em pontos isolados do país, criando-se a necessidade de diversificar a matriz energética elétrica brasileira, diminuindo a dependência das chuvas. Uma alternativa é a energia solar fotovoltaica, que vem recebendo atenção através de sistemas de geração em pequena escala distribuídos pelo país. De toda geração distribuída no ano de 2017 (359,1 GWh), 165,9 GWh foram gerados através de fontes solares.

Em 2012 se tornou possível que consumidores domésticos e industriais gerassem sua própria energia elétrica através de fontes renováveis. Isso se tornou possível depois da Resolução Normativa nº 482 da (ANEEL, 2012). Além de permitir essa geração, foi criado um sistema que permite que o consumidor injete energia no sistema na forma de um empréstimo a ser compensado em créditos de consumo. Esses créditos são utilizados para reduzir, até mesmo zerar, a fatura da energia elétrica. Isso oferece flexibilidade para o consumidor, permitindo que forneça energia ao sistema de distribuição em horários diferentes de seu consumo.

A geração de energia solar fotovoltaica é a transformação direta da luz dos raios solares em energia elétrica, utilizando-se células solares. Devido à limitação de capacidade de potência de uma célula independente, esses componentes são interligados em conjuntos série e paralelo, formando dispositivos chamados de módulos fotovoltaicos. Os módulos são capazes de fornecer quantidades de energia compatíveis com cargas de aplicações práticas em residências e indústrias (KALOGIROU, 2009).

Apesar da redução contínua do custo de investimento em sistemas de geração fotovoltaicos, através de políticas de incentivo ao uso dessa tecnologia e aperfeiçoamento da eficiência desses dispositivos, os preços de aquisição e instalação ainda são considerados relativamente altos por grande parte dos consumidores (PINHO; GALDINO, 2014). Sabe-se que, com o aumento da irradiância solar incidente nas células, pode-se obter correntes elétricas elevadas em células de pequena área. Dessa forma, utilizando-se sistemas com mecanismo seguidor do movimento aparente do Sol, ou também sistemas de concentração de irradiância, é possível aumentar a exposição de módulos fotovoltaicos aos raios solares ao longo dos dias. Com isso, aumenta-se a quantidade de energia gerada pelos dispositivos e se diminui o tempo de *payback* do investimento.

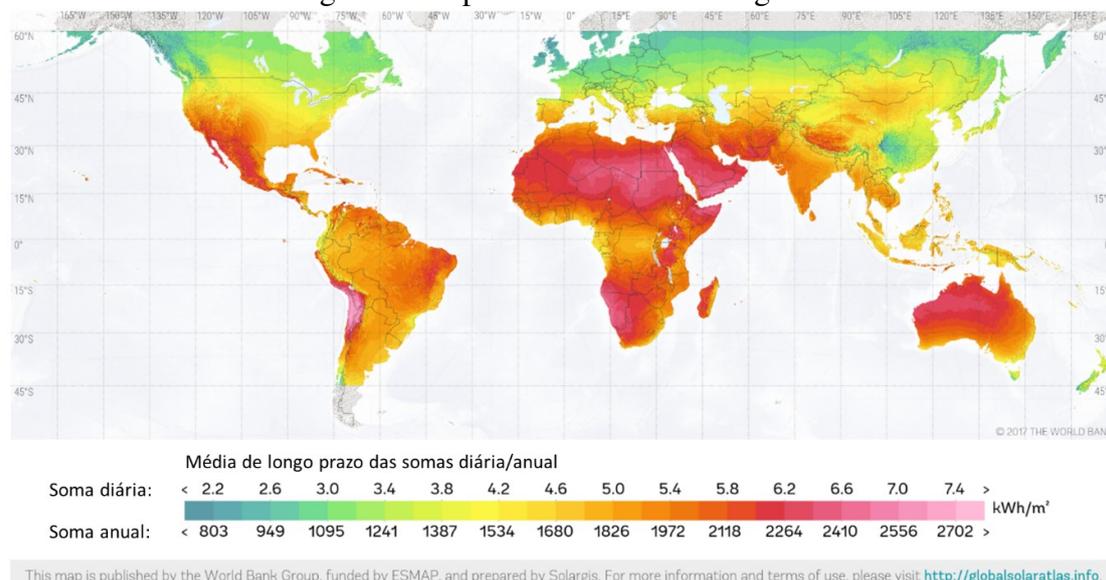
Tendo em vista a importância do uso de sistemas de geração fotovoltaicos, o presente trabalho busca realizar a análise comparativa da geração de dispositivos desta tecnologia, considerando instalações com mecanismo seguidor do movimento aparente do Sol e com posicionamento estático. A comparação é feita através dos resultados da simulação de modelos de painéis fotovoltaicos, implementados em diagramas de blocos no *software* SIMULINK[®], sendo os parâmetros de entrada provenientes de um banco de dados solarimétricos de uma estação em São Martinho da Serra, no Estado do Rio Grande do Sul. Os cálculos dos ângulos do mecanismo seguidor na simulação são realizados por um algoritmo de posicionamento solar, disponível em uma ferramenta *online* em (SUN-ARTHTOOLS, s.d.).

2 FUNDAMENTOS SOBRE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

2.1 Energia Solar

A energia solar é proveniente de uma fonte livre de carbono disponível em todo planeta. Alguns países na região do “cinturão solar” são expostos a longas horas de irradiação do Sol, favorecendo, nesses locais, a aplicação das tecnologias solares (CHAICHAN; KAZEM, 2018). A Figura 1 apresenta a distribuição de irradiância solar sobre a superfície terrestre, onde é possível observar as regiões e países com maiores ofertas de irradiância, grupo ao qual o Brasil pertence.

Figura 1: Mapa de irradiância solar global



Fonte: Adaptado de (SOLARGIS, s.d.)

O aproveitamento dessa energia, disponível em larga escala, resulta na melhoria das condições socioeconômicas da população, tanto de áreas remotas quanto de grandes centros urbanos. O Sol é considerado uma fonte alternativa de energia renovável, que não contamina o meio ambiente como fontes convencionais de combustível (carvão, óleo e gás), podendo-se utilizar sua energia para aquecimento ou até mesmo cozinhar alimentos (VIEBAHN; LECHON; TRIEB, 2011).

Segundo (GERLACH et al., 2009) é possível converter a energia solar em energia elétrica de duas formas: energia solar concentrada (*Concentrated Solar Power, CSP*) e com células fotovoltaicas. O método de CSP utiliza raios solares concentrados para acio-

nar turbinas a vapor, sendo uma das vantagens de seus sistemas a capacidade de armazenar energia na forma de vapor/pressão, podendo-se utilizar, quando necessário, horas após a interrupção de irradiação solar. O método de energia solar fotovoltaica transforma a luz solar diretamente em eletricidade.

2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

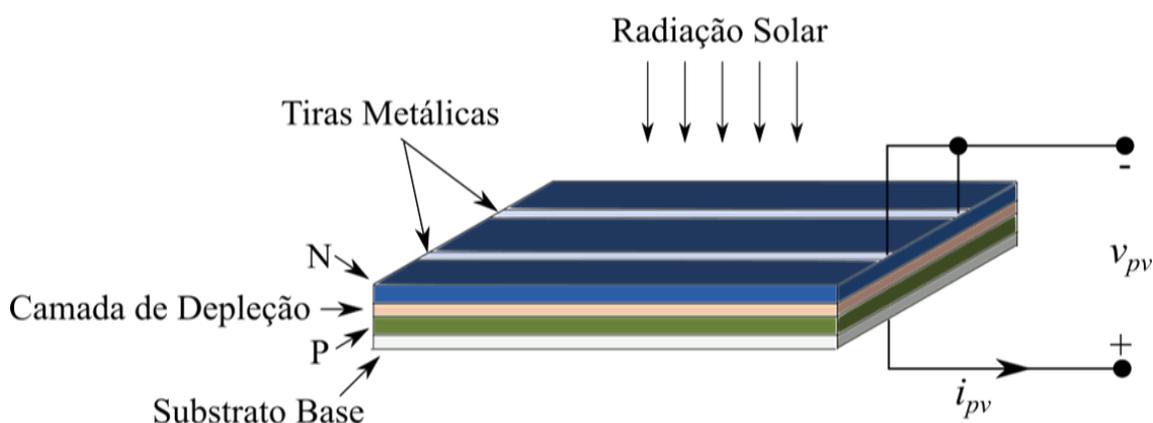
Segundo (XIAO, 2017), o efeito fotovoltaico (*photovoltaic*, PV) consiste na geração de tensão e corrente DC (corrente contínua, em inglês) a partir da luz. Um físico experimental francês, Alexandre Edmond Becquerel, descobriu esse efeito em 1839. Mais recentemente, cientistas descobriram que alguns materiais, como o silício, podem produzir um efeito PV mais significativo. O laboratório norte-americano Bell Labs fabricou painéis fotovoltaicos para atividades espaciais na década de 1950, sendo considerado o início da indústria de energia fotovoltaica.

Desde o ano 2000, a demanda por sistemas PV aumentou de forma significativa depois da Alemanha e da Espanha expandirem sua utilização (SHARMA, 2011). Nos últimos anos, a capacidade de geração desses sistemas aumentou consideravelmente e o custo de instalação diminuiu, além de um maior incentivo através de políticas governamentais no desenvolvimento dessa tecnologia. A energia fotovoltaica pode ser utilizada como fonte de alimentação para dispositivos remotos, como estações de monitoramento agrícola e telefones de emergência em rodovias, até usinas solares conectadas ao sistema de distribuição de energia elétrica para residências e indústrias.

2.2 Sistemas de Geração Fotovoltaicos

De acordo com (ABTAHI, 2017), sistemas de geração fotovoltaicos utilizam a célula PV como componente fundamental, também chamada de célula solar. Uma célula solar com base cristalina é caracterizada por uma junção P-N, representada na Figura 2. As camadas semicondutoras positiva e negativa podem fornecer eletricidade quando uma carga é conectada ao circuito, através de uma tensão contínua v_{pv} formada em seus terminais. Entretanto, a diferença de potencial gerada por uma única célula de junção P-N é inferior a 1 V, sendo esse valor considerado pequeno para a maioria das cargas práticas.

Figura 2: Construção típica de uma célula fotovoltaica com base cristalina

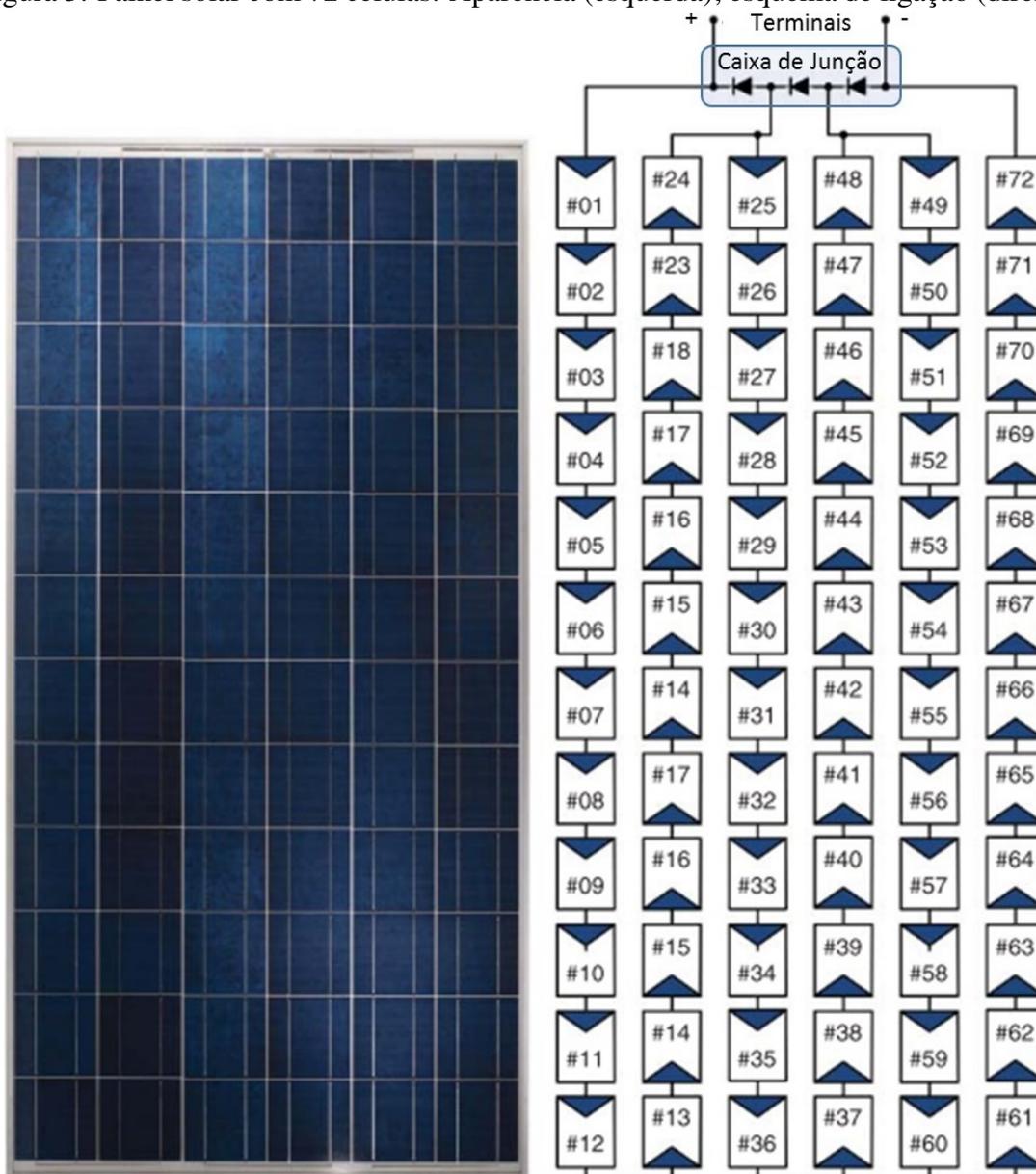


Fonte: Adaptado de (XIAO, 2017)

Dessa forma, segundo (BOHLEN, 2009), a unidade básica de sistemas de geração dessa natureza é o módulo PV ou painel solar, capaz de produzir tensões e correntes elétricas maiores do que uma única célula. O módulo é composto por células interconectadas, na maioria dos casos contendo de 36 a 72 células, integradas com cabos e conectores que possibilitam a instalação em diferentes configurações.

Para se construir um painel solar, as células PV são empilhadas entre um superstrato e um substrato responsáveis pela proteção do módulo. Normalmente utiliza-se vidro temperado texturizado como superstrato, pois esse material oferece boa resistência mecânica, coeficiente de expansão térmica igual ao das células, e alto índice de transmissão luminosa (cerca de 94 %). Condutores metálicos interligam as células PV com topologia série, sendo então protegidas por um encapsulamento que as mantém dentro do conjunto (BOXWELL, 2012).

Figura 3: Painel solar com 72 células: Aparência (esquerda); esquema de ligação (direita)



Fonte: Adaptado de (XIAO, 2017)

Na Figura 3 é apresentada a aparência da superfície de captação de um painel solar composto por 72 células fotovoltaicas no lado esquerdo, e o esquema de ligação com 3 *arrays* (arranjos) de 24 células cada no lado direito. Na Caixa de Junção do painel são feitas as conexões dos *arrays* com os terminais de saída do dispositivo, além dos diodos de *by-pass* que ajudam na proteção e no funcionamento do painel em casos de sombreamento da superfície causado por obstáculos.

2.2.1 Modelagem de Dispositivos Fotovoltaicos

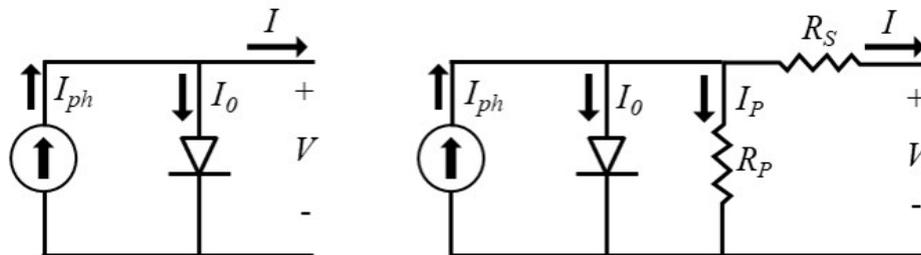
Nesta Seção é descrita a modelagem de dispositivos PV, visto que as equações que descrevem o comportamento desses componentes são implementadas em diagramas de blocos na continuação do trabalho.

A bibliografia em geral apresenta dois modelos para células e conjuntos PV cristalinos, representados tipicamente por dois grupos de circuitos equivalentes: com um diodo (SDM – *Single-Diode Model*) ou com dois diodos (DDM – *Double-Diode Model*). Os modelos utilizam irradiância e temperatura como variáveis de entrada, e as variáveis de saída costumam ser corrente e tensão elétrica, ou o produto desses valores que resultam na potência gerada.

A maioria dos *datasheets* de painéis fotovoltaicos, fornecidos pelos fabricantes destes produtos, apresentam apenas figuras com as curvas de corrente ou potência em função da diferença de potencial elétrico, com baixa resolução (XIAO, 2017). Assim, a falta de precisão dos dados pode não ser apropriada em aplicações onde a modelagem e a simulação demandem um grande número de parâmetros, o que deve ser levado em conta de acordo com a exatidão desejada para aplicação.

Conforme apresentado por (BELLIA; YOUCEF; FATIMA, 2014), um modelo idealizado para células PV é composto por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo, como mostra a Figura 4(a). Na prática, é imprudente negligenciar a resistência em série e a resistência em paralelo (*shunt*), que representam as não idealidades inerentes à estrutura interna dos componentes, devido aos impactos negativos na eficiência de células e módulos PV. Na Figura 4(b) é possível observar o circuito equivalente considerando as resistências citadas.

Figura 4: Circuitos equivalentes do modelo de uma célula fotovoltaica



a) Modelo com um diodo ideal b) Modelo prático considerando R_s e R_p

Fonte: Adaptado de (BELLIA; YOUCEF; FATIMA, 2014)

Segundo (BOURAIYOU et al., 2015), baseado na primeira Lei de Kirchhoff e na Equação de Shockley para um diodo ideal, o modelo da Figura 4(a) é descrito pela Equação (1)

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{q \cdot V_D}{A \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

onde I , I_{ph} e I_0 são as correntes de saída da célula PV, corrente gerada pelo efeito fotoelétrico e a corrente através do diodo, respectivamente. A carga elementar do elétron é representada por q , V_D é a tensão elétrica nos terminais do diodo, k é a constante de Boltzmann, A e T representam o fator de idealidade e a temperatura da junção P-N.

Considerando as resistências série R_s e paralela R_P do modelo prático representado na Figura 4(b), a corrente de saída do módulo PV pode ser descrita pela Equação (2)

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{A \cdot V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_P}, \quad (2)$$

na qual

$$V_T = \frac{N_S \cdot k \cdot T}{q} \quad (3)$$

sendo N_S o número de células conectadas em série.

A corrente gerada pelo efeito fotovoltaico I_{ph} pode ser obtida pela Equação (4)

$$I_{ph} = (I_{SC,STC} + K_i \cdot \Delta T) \cdot \frac{G}{G_{STC}} \quad (4)$$

e a corrente de saturação reversa é proveniente da Equação (5)

$$I_0 = I_{0,ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{q \cdot \varepsilon_G}{A \cdot k} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (5)$$

onde $I_{SC,STC}$ é a corrente nominal em curto-circuito na *Standard Test Condition* (STC) (por exemplo: 25 °C e 1000 W/m²), e G_{STC} é a irradiância solar nominal da STC. O parâmetro K_i é o coeficiente da corrente de curto-circuito em função da temperatura T , T_{ref} é a temperatura de referência. A variável de entrada G é a irradiância solar submetida ao componente. O parâmetro ε_G é uma constante que representa a banda proibida do material. $I_{0,ref}$ é definida pela Equação (6)

$$I_{0,ref} = I_{SC,STC} \cdot \exp \left(\frac{(-V_{OC,STC}) \cdot q}{N_S \cdot k \cdot A \cdot T} \right) \quad (6)$$

na qual $V_{OC,STC}$ é a tensão de circuito aberto na STC.

Dessa forma, conforme apresentado por (BOURAIYOU et al., 2015), um conjunto de N_{SS} x N_{PP} módulos PV interconectados, sendo N_{SS} e N_{PP} o número de módulos em série e em paralelo, respectivamente, apresenta uma corrente de saída descrita pela Equação (7)

$$I = I_{ph} \cdot N_{PP} - I_0 \cdot N_{PP} \left(\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s \cdot (\frac{N_{SS}}{N_{PP}}))}{A \cdot N_S \cdot k \cdot T \cdot N_{SS}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s \cdot (\frac{N_{SS}}{N_{PP}})}{R_P \cdot (\frac{N_{SS}}{N_{PP}})} \quad (7)$$

2.3 Geometria Sol-Terra

Nesta Seção são descritos os principais parâmetros do movimento aparente do Sol, cujo acompanhamento pode ser feito com o algoritmo utilizado no trabalho.

Conforme (GRASSI, 2015), a Terra realiza o movimento de translação sobre um plano, denominado plano de eclíptica, além do movimento de rotação, que ocorre com inclinação de 23,45 graus do seu eixo de rotação em relação ao plano da eclíptica. A combinação desses movimentos causa a variação da incidência de raios solares sobre a superfície terrestre durante o ciclo do planeta, tendo como consequência os dias e as estações do ano.

Segundo (PINHO; GALDINO, 2014), observando-se o movimento aparente do Sol ao longo do ano, é possível verificar que o ângulo entre o plano do Equador e os raios solares varia entre +23,45 graus no dia 21 de junho (solstício de inverno do hemisfério Sul), e -23,45 graus no dia 21 de dezembro (solstício de verão do hemisfério Sul), avaliado ao meio dia solar. Este ângulo é denominado Declinação Solar (δ), sendo definido como positivo ao Norte e negativo ao Sul do Equador. Conforme apresentado por (DUFFIE; BECKMAN, 2003), pode-se calcular a declinação solar através das equações (8) e (9)

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (8)$$

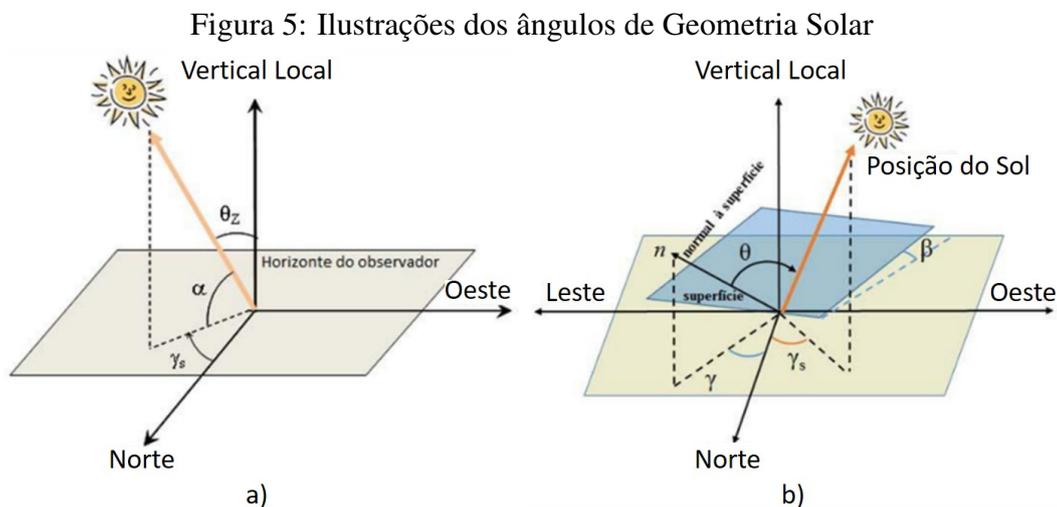
$$\begin{aligned} \delta = & \left(\frac{180}{\pi} \right) \cdot (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(B) + 0,070257 \cdot \sin(B) \\ & - 0,006758 \cdot \cos(2B) + 0,000907 \cdot \sin(2B) - 0,002697 \cdot \cos(3B) \\ & + 0,00148 \cdot \sin(3B)) \end{aligned} \quad (9)$$

onde n representa o dia juliano, contado de 1 a 365 a partir de 1 de janeiro.

Ainda, de acordo com (PINHO; GALDINO, 2014), as relações geométricas dos raios solares e a superfície terrestre são descritas através de outros ângulos definidos a seguir e ilustrados nas figuras 5(a) e 5(b):

- Ângulo Zenital ou Zênite (θ_Z): ângulo formado entre a vertical local e os raios solares;
- Elevação Solar (α): ângulo entre os raios solares e suas respectivas projeções sobre o plano horizontal;
- Ângulo Azimutal do Sol (γ_S): também chamado de azimute solar, representa o ângulo entre a projeção dos raios do Sol no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Por convenção, o deslocamento angular é referente ao Norte (0°) geográfico, sendo positivo à Leste e negativo à Oeste;
- Ângulo Azimutal da Superfície (γ): com as mesmas convenções que o azimute solar, é o ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul;
- Inclinação da superfície de captação (β): ângulo formado entre o plano da superfície e o plano horizontal, variando entre 0° e 90° ;
- Ângulo Horário do Sol (ω): deslocamento angular Leste-Oeste do meridiano do Sol, a partir do meridiano local, devido ao movimento de rotação da Terra, equivalente à 15° por hora, sendo negativo pela manhã e positivo a noite;

- Ângulo de Incidência (θ): ângulo formado entre os raios solares e a normal da superfície de captação.



Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014)

2.4 Métodos para Seguir o Movimento Aparente do Sol

Com o objetivo de maximizar a energia obtida em sistemas de geração fotovoltaicos, diversas técnicas vem sendo implementadas desde o ano 2000. Uma das técnicas mais comuns é acompanhar o movimento aparente do Sol, podendo-se utilizar mecanismos de movimentação com um ou dois eixos de atuação (SUMATHI et al., 2017). O objetivo dessa técnica é manter a superfície do painel fotovoltaico direcionada para o Sol recebendo a máxima irradiância disponível.

2.4.1 Seguidores Passivos

O princípio de funcionamento dos mecanismos seguidores passivos é baseado na energia térmica solar para causar um desbalanço de energia, o qual implica em um movimento na forma de trabalho mecânico. Utilizam a expansão térmica causada pela diferença de temperatura para variar as dimensões dos atuadores de posicionamento. Apesar de serem mais simples, eles apresentam menor eficiência em relação aos seguidores ativos.

2.4.2 Seguidores Ativos

Os seguidores ativos utilizam motores elétricos e relações de engrenagens para controlar o posicionamento do sistema. Os motores devem ser acionados por sinais de controle que indicam o sentido e o deslocamento a serem realizados. Seguidores ativos são mais precisos e mais utilizados do que seguidores passivos, entretanto eles precisam ser energizados e consomem energia elétrica, o que pode prejudicar a eficiência do sistema. Os sinais de controle podem ser gerados tanto a partir da leitura de sensores em tempo real, quanto previamente calculados por algoritmos de posicionamento solar (*Solar Position Algorithm, SPA*) (GRENA, 2008).

2.5 Estado da Arte

(SUMATHI et al., 2017) avalia alguns métodos disponíveis de acompanhamento do movimento aparente do Sol e seus respectivos ganhos na geração de energia, além de diferentes algoritmos de seguimento do ponto de máxima potência. No trabalho, um seguidor automático com um eixo de movimentação controlado por um microcontrolador é implementado e avaliado o desempenho em tempo real. O foco da pesquisa é na orientação da superfície do painel solar em direção à máxima exposição de irradiância solar utilizando um motor de passo controlado acionado por um processador com arquitetura *Advanced RISC Machine* (ARM).

Em (CHANG, 2017), é determinado o ângulo de inclinação ótimo e o ângulo de azimute ideal dos painéis fixos, empregando o algoritmo metaheurístico de busca harmônica (HS). O estudo busca obter os valores ideais avaliando várias cidades da China, com o objetivo de maximizar a radiação extraterrestre na superfície do coletor por um período específico. A posição do Sol é prevista pelo modelo proposto em diferentes momentos, e então a radiação solar é obtida em vários planos inclinados com diferentes orientações. O desempenho do método HS é comparado com outros algoritmos de otimização. Os resultados demonstram que a melhor orientação é geralmente para o sul nas cidades selecionadas. Além disso, o algoritmo HS é uma alternativa prática e confiável para estimar o ângulo de inclinação ótimo e o ângulo de azimute ideal dos painéis fotovoltaicos.

(YANG et al., 2017) desenvolve um sistema de rastreamento do Sol com controle em malha aberta, sem necessidade de utilizar uma fonte de energia externa para o mecanismo de movimentação. O sistema adotado utilizou uma lente de Fresnel para concentrar os raios solares em um motor de ciclo Stirling. Os motores do mecanismo seguidor são alimentados por dois painéis fotovoltaicos instalados nas laterais da lente de concentração. Os resultados apresentaram que a energia obtida pelos painéis, e armazenada nos acumuladores do sistema, foi maior do que a energia necessária para movimentação do mecanismo. Dessa forma, o trabalho propõe a integração de dispositivos fotovoltaicos e térmicos em um sistema de concentração com seguidor, com o objetivo de obter mais energia proveniente do Sol.

A pesquisa de (FOUAD; SHIHATA; MORGAN, 2017) aborda a integração de diversos fatores que afetam o desempenho de painéis fotovoltaicos. Os fatores avaliados abordam características do ambiente, do sistema fotovoltaico e dos métodos de instalação. Cada fator é classificado em subcategorias, relacionando os efeitos de redução e aumento da potência de saída dos sistemas. Segundo o estudo, os fatores ambientais com maior impacto na saída são a irradiância solar, a temperatura dos módulos, o acúmulo de poeira, o sombreamento e a poluição atmosférica. Os principais fatores de instalação apresentados são as características elétricas dos cabos, o ângulo de inclinação, o uso de mecanismos de posicionamento e conexão com sistemas de seguimento do ponto de máxima potência. Os resultados obtidos oferecem uma visão geral para os pesquisadores dessa área, concentrando os efeitos dos fatores abordados no desempenho de painéis fotovoltaicos em um único trabalho.

(SOULATIANTORK, 2018) desenvolve um sistema de testes de baixo custo para aplicações de dispositivos fotovoltaicos, comparando dois painéis dessa tecnologia submetidos às mesmas condições ambientes. Um algoritmo de seguimento do ponto de máxima potência (MPPT, em inglês) é avaliado através de um teste experimental do desempenho do sistema comparado em tempo real. Os resultados da comparação indicam que a solução de validação proposta permite comparar até quatro algoritmos MPPT diferentes, quatro painéis fotovoltaicos e a combinação entre eles.

3 MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 Banco de Dados Solarimétricos - SONDA

Conforme descrito em (THOMAZ; PEREIRA, 2009), através de um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), referente a implementação de infraestrutura física e desenvolvimento de recursos bibliográficos destinados ao incentivo do setor de energia solar e eólica no Brasil, surgiu o Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). O sistema foi instalado e é mantido pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), integrante do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), que realiza atividades de pesquisa e ensino na área de meteorologia aplicada ao setor de energia.

Dentro das pesquisas de campo do LABREN, o sistema de coletas de dados da rede SONDA é composto por estações solarimétricas medindo as principais componentes da radiação solar incidente nas macrorregiões climáticas do Brasil, dentre outras variáveis meteorológicas complementares (Temperatura, Umidade, Velocidade do Vento, por exemplo). Na Figura 6 é possível observar as localizações das estações SONDA no país.

Figura 6: Localizações das estações SONDA no território nacional



Fonte: (SONDA, s.d.)

A justificativa para utilização das estações meteorológicas SONDA como fonte de dados deve-se à compatibilidade do sistema com os critérios de qualidade estabelecidos pela agência *World Meteorological Organization* (WMO), que é considerada referência para pesquisas relacionadas a atmosfera terrestre em projetos com cooperação internacional. Além disso, antes de disponibilizar os dados coletados, a rede os submete a um processo de validação para garantir a confiabilidade dos mesmos. Este processo faz uso de um algoritmo para análise dos dados.

O objetivo do algoritmo de controle de qualidade é identificar dados comprometidos por problemas de operação e manutenção durante o período de aquisição das estações. O processo baseia-se na estratégia de análise adotada pela *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN), sendo ele composto por quatro etapas sequenciais, conforme apresentado em (WRMC-BSRN, s.d.):

1. Dado suspeito quando fisicamente impossível;
2. Dado suspeito quando o evento é extremamente raro;
3. Dado suspeito quando inconsistente com medidas apresentadas por outras variáveis da mesma estação;
4. Dado suspeito caso a medida esteja inconsistente quando comparada com estimativas de modelos computacionais.

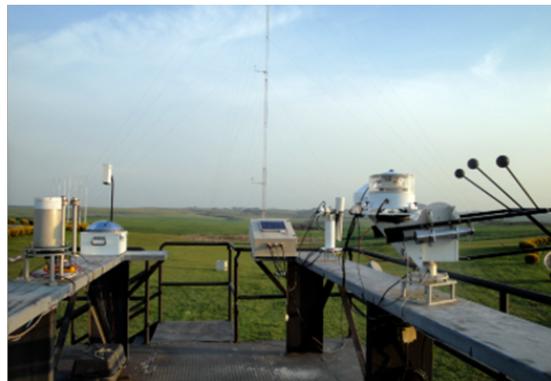
Cada etapa de aprovação é requisito para sequência do processo, de forma que o processo é interrompido caso o dado seja identificado como suspeito e o mesmo receberá um código equivalente a etapa da validação.

Baseado nisso e na proximidade em relação à cidade de Porto Alegre, optou-se pela utilização dos dados da estação SONDA localizada em São Martinho da Serra, no Rio Grande do Sul, situada nas coordenadas $-29,442778^\circ$ Norte e $-53,823056^\circ$ Leste, no sistema de coordenadas WGS84, e sua instalação física pode ser observada nas figuras 7(a) e 7(b).

Figura 7: a) Estrutura e b) Sensores da estação SONDA em São Martinho da Serra - RS



a)



b)

3.2 Algoritmo de Posicionamento Solar - SunEarthTools

Dados de posicionamento do Sol gerados pelo algoritmo apresentado em (REDA; ANDREAS, 2007) foram obtidos através do software de cálculo disponível em (SUNEARTHTOOLS, s.d.), no qual é possível especificar as coordenadas de latitude e longitude, uma data específica ou um ano de interesse, e gerar uma tabela com os valores de Elevação Solar (α) e Azimute Solar (γ_S) para o local especificado. A Figura 8 apresenta um exemplo com o resultado do algoritmo, o qual mostra a direção azimutal do Sol em relação ao local utilizado como estudo de caso, durante o horário de incidência solar onde a estação meteorológica do projeto SONDA está instalada (Latitude: $-29,442778^\circ$ Norte; Longitude: $-53,823056^\circ$ Leste), na cidade de São Martinho da Serra – RS, para o dia 01/01/2015. O marcador no centro do círculo destaca no mapa o local especificado, enquanto o arco com marcadores e rótulos numéricos representa a direção azimutal para cada hora ao longo do período solar no dia.

Figura 8: Trajetória azimutal do Sol na data 01/01/2015 em São Martinho da Serra



Fonte: Adaptado de (SUNEARTHTOOLS, s.d.)

Com a ferramenta disponível em (SUNEARTHTOOLS, s.d.) pode-se gerar uma tabela de dados para um determinado ano, selecionando uma de seis opções de passo de tempo para o cálculo, com incrementos de 5 até 60 minutos. Para o presente trabalho, optou-se pelo incremento temporal de 5 minutos visando maximizar a resolução dos dados de entrada para a simulação. Dessa forma, utilizando as coordenadas geográficas de instalação da estação em São Martinho da Serra e o fuso horário local de acordo com o Tempo Médio de Greenwich (GMT-3), foram gerados arquivos para cada ano de 2011 a 2016. Os dados de posicionamento solar são concatenados com os dados de irradiância adquiridos na estação meteorológica SONDA, relacionando assim essas duas bases de dados para cada marcador temporal.

Os arquivos gerados pela ferramenta são planilhas com extensão “.xls”, e o formato dos dados apresenta cada dia do ano numa respectiva linha da primeira coluna como mostra a Figura 9, Os valores dos ângulos de elevação e direção azimutal exibidos nas células das demais colunas, ou seja:

- Cada dia do ano corresponde a uma linha da planilha, a partir da linha dois;

- Os valores em graus dos ângulos de elevação e azimutal do Sol são exibidos a partir da segunda coluna da planilha, sendo que as colunas pares contém os valores do ângulo de elevação, e as colunas ímpares os valores do ângulo azimutal;
- A cada duas colunas o marcador temporal é incrementado de acordo com a seleção do passo especificado, sendo o marcador exibido na primeira linha da planilha.

Na Figura 9 é possível observar a formatação dos dados na parte inicial da planilha gerada para o ano 2015, sendo que a planilha apresenta apenas os valores para os intervalos em que há exposição direta dos raios solares no local das coordenadas especificadas, ou seja, entre o nascer e o pôr do Sol. Os intervalos sem incidência de raios solares exibem marcadores “--” nas células da planilha.

Figura 9: Planilha com a trajetória solar de 2015 em São Martinho da Serra obtida com o SPA

	A	B	C	D	E	EN	EO
1		E 00:00:00	A 00:00:00	E 00:05:00	A 00:05:00	E 05:55:00	A 05:55:00
2	01/01/2015	--	--	--	--	2.31	115.25
3	02/01/2015	--	--	--	--	2.17	115.23
4	03/01/2015	--	--	--	--	2.03	115.21
5	04/01/2015	--	--	--	--	1.89	115.18
6	05/01/2015	--	--	--	--	1.75	115.14
7	06/01/2015	--	--	--	--	1.60	115.09
8	07/01/2015	--	--	--	--	1.45	115.04
9	08/01/2015	--	--	--	--	1.30	114.98

Fonte: Elaborada pelo Autor

Para concatenar os dados de radiação solar disponíveis em (SONDA, s.d.) com os valores de saída do algoritmo executado através da ferramenta em (SUNEARTHTOOLS, s.d.), utilizou-se a rotina de código do Apêndice A para formatar os arquivos com os ângulos de elevação e direção azimutal, de forma que, com o intervalo de tempo de cinco minutos, os valores de α e γ_S fossem ordenados cronologicamente nas linhas de uma nova planilha. As células da primeira coluna contém os identificadores de data e hora no formato “dia/mês/ano hora:minuto”, e as células da segunda e terceira colunas os valores de α e γ_S em graus. A planilha resultante após a execução da rotina pode ser observada na Figura 10 e comparada com a Figura 9.

Figura 10: Planilha formatada com a trajetória do Sol no ano 2015 em São Martinho da Serra

	A	B	C
1	Data/Hora	Elevação (α)	Azimute (γ_S)
2	01/01/2015 00:00	--	--
3	01/01/2015 00:05	--	--
4	01/01/2015 00:10	--	--
73	01/01/2015 05:55	2,31	115,25
74	01/01/2015 06:00	3,29	114,66

Fonte: Elaborada pelo Autor

3.3 Irradiância Solar em Superfícies Inclinadas

A irradiância solar incidente sobre uma superfície é composta por duas principais componentes, a irradiância direta e a irradiância difusa (DUFFIE; BECKMAN, 2003).

3.3.1 Irradiância Solar Direta em uma Superfície Inclinada

Baseado em (PINHO; GALDINO, 2014), a partir dos ângulos de zênite θ_Z e de incidência θ , é possível calcular a componente direta da irradiância que incide normalmente a uma superfície inclinada, o que é necessário para o cálculo de irradiância coletada por um painel fotovoltaico. A componente de irradiância direta que incide de forma paralela a normal da superfície de um painel PV pode ser determinada pela Equação 10

$$\frac{G_{d,\beta}}{G_{d,h}} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_Z} = R_G \quad (10)$$

sendo $G_{d,\beta}$ e $G_{d,h}$ as componentes diretas da irradiância que incide normalmente a uma superfície inclinada e a uma superfície horizontal, respectivamente. Define-se então R_G como um coeficiente de ganho para irradiância direta em uma superfície inclinada.

O ângulo de zênite pode ser obtido através da Equação 11

$$\cos \theta_Z = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi + \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \quad (11)$$

onde ϕ é a latitude geográfica local e o ângulo horário do Sol ω é definido pela Equação 12 em função do horário H_S que varia de -12 a 12

$$\omega = (H_S - 12) \cdot 15^\circ. \quad (12)$$

O ângulo de incidência θ , formado entre os raios solares a normal da superfície do painel fotovoltaico – sendo esta posicionada com orientação γ e inclinação β – pode ser calculado com a Equação 13

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \cos \beta \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \phi + \cos \beta \cdot \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \\ & + \text{sen} \beta \cdot \text{sen} \gamma \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} \omega \\ & + \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \text{sen} \phi \\ & - \text{sen} \beta \cdot \cos \gamma \cdot \text{sen} \delta \cdot \cos \phi. \end{aligned} \quad (13)$$

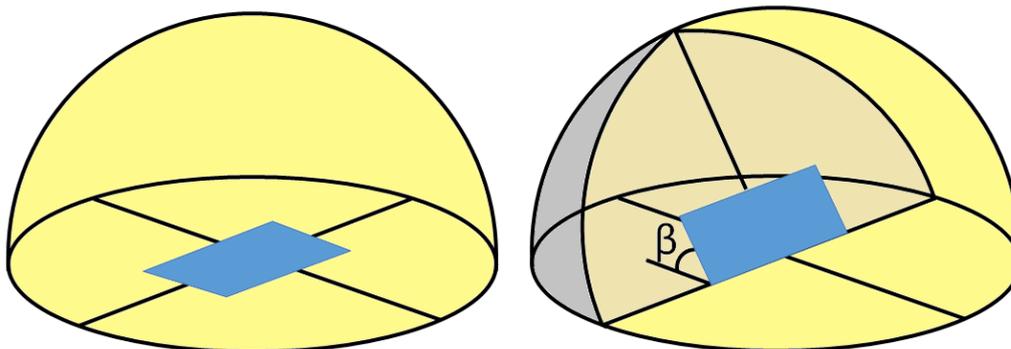
3.3.2 Irradiância Solar Difusa em uma Superfície Inclinada

Segundo (DUFFIE; BECKMAN, 2003), considerando o modelo isotrópico da irradiância solar difusa, assume-se que a distribuição dessa grandeza ocorre de forma uniforme no hemisfério geométrico sobre a superfície em análise, podendo-se portanto determinar a irradiância solar difusa sobre uma superfície inclinada pela Equação 14

$$\frac{I_S}{I_d} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \beta) = R_B, \quad (14)$$

em que I_S e I_d são as irradiâncias solares difusas sobre a superfície inclinada e sobre a superfície horizontal, respectivamente. Define-se R_B como um coeficiente de atenuação para irradiância difusa em uma superfície inclinada. A Figura 11 ilustra o efeito do ângulo de inclinação da superfície na irradiância difusa incidente sobre ela.

Figura 11: Ilustrações da irradiância solar difusa sobre uma superfície horizontal e uma superfície inclinada



Fonte: Elaborada pelo Autor

Dessa forma, utilizando-se das equações apresentadas, foram adicionadas colunas às planilhas de dados contendo os valores dos coeficientes R_G e R_B para entrada de parâmetros na simulação.

3.3.3 Aplicação dos Efeitos de Superfícies Inclinadas para o Sistema Proposto

De acordo com as recomendações de instalação de módulos fotovoltaicos descritas em (PINHO; GALDINO, 2014), para maximizar o aproveitamento da energia solar em painéis PV fixos, devem-se seguir duas condições em relação a orientação e a inclinação do painel.

Em relação à orientação, para uma operação eficiente, as superfícies dos módulos devem ser posicionadas em direção ao Norte Verdadeiro, considerando-se que o local do estudo de caso encontra-se no hemisfério Sul. Em grande parte das localidades a direção do Norte Verdadeiro difere do Norte Magnético que é indicado pela bússola, de forma que seja necessário fazer a correção do referencial magnético. Utilizando a ferramenta disponível em (NOAA, s.d.), obtém-se que o Norte Verdadeiro aproximado para região de São Martinho da Serra no período do estudo equivale a $14,5^\circ$ no sentido Oeste.

A segunda condição indica que os módulos fixos sejam posicionados com ângulo de inclinação igual ao módulo da latitude do local de instalação do sistema, cujo valor pode variar entre -10° e $+10^\circ$ (BAHRAMI; OKOYE; ATIKOL, 2016) sem impactar de forma significativa na energia gerada anualmente. Assim, optou-se por utilizar o valor de inclinação do painel fixo com aproximadamente 5° a mais do que a latitude local, com objetivo de simular o favorecimento da limpeza dos painéis pela ação da água da chuva em um sistema real, sendo definido em 35° de inclinação.

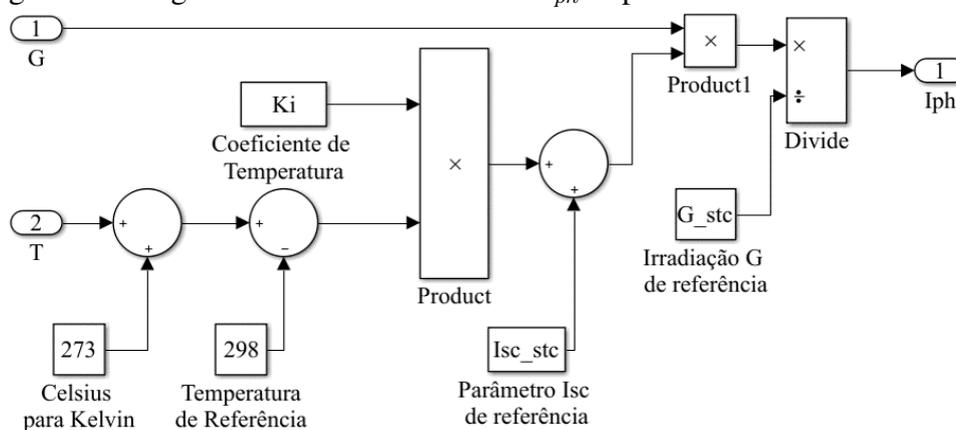
3.4 Software para Simulação – MATLAB/SIMULINK®

A modelagem computacional e a simulação de sistemas físicos no *hardware* vem se tornando cada vez mais atrativas devido aos avanços de *softwares* voltados para o cálculo numérico, como o MATLAB®, desenvolvido pela MathWorks Inc. A plataforma utiliza matrizes como elementos de dados base, além de oferecer ferramentas para implementação de modelos com diagrama de blocos, o que favorece sua aplicação para análise do estudo de caso, visto a compatibilidade do banco de dados solarimétricos da rede SONDA e a facilidade de programação das equações que descrevem o comportamento de um painel fotovoltaico.

O SIMULINK® é um ambiente para desenvolvimento de modelos com diagramas de bloco integrado ao MATLAB®. Esse recurso oferece bibliotecas para customização de blocos e *solvers* que possibilitam a modelagem e a simulação de sistemas dinâmicos através de um editor gráfico, somadas a possibilidade de importar dados e exportar resultados de forma simplificada se comparado a softwares de linguagens compiladas (C e C++, por exemplo).

Assim, baseado em (BELLIA; YOUCEF; FATIMA, 2014) e (BOURAIYOU et al., 2015), as equações 4-7 que descrevem o comportamento do modelo de célula PV apresentado na Figura 4(b) foram implementadas em diagramas de blocos no ambiente do SIMULINK®. Como exemplo do que foi implementado, na Figura 12 pode-se observar a representação da corrente gerada pelo efeito fotoelétrico I_{ph} numa célula PV, cujos parâmetros de entrada são a irradiância G e a temperatura T . Os demais diagramas de blocos podem ser observados no Apêndice B.

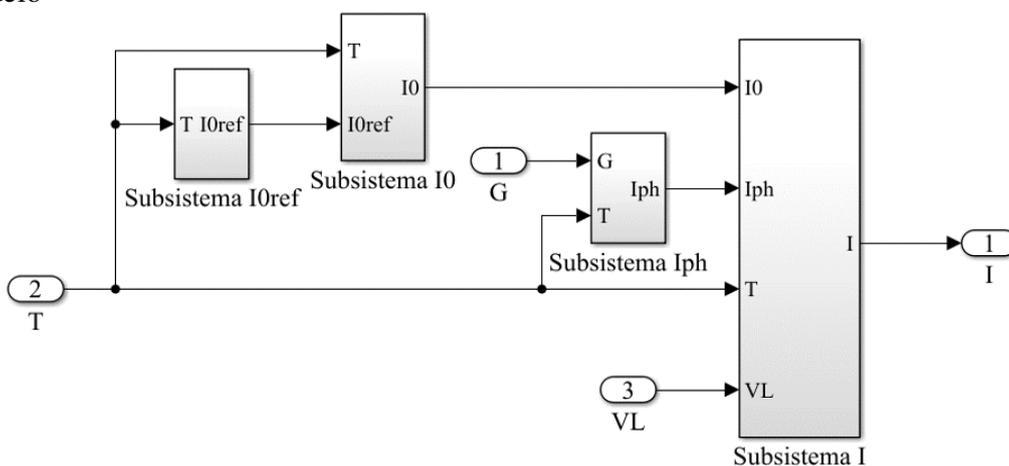
Figura 12: Diagrama de blocos da corrente I_{ph} implementado no SIMULINK®



Fonte: Elaborada pelo Autor

Associando-se os subsistemas dos diagramas de blocos das equações implementadas, pode-se obter o modelo para simulação de um conjunto de dispositivos fotovoltaicos, como apresentado na Figura 13.

Figura 13: Diagrama de blocos de um conjunto fotovoltaico integrando os subsistemas do modelo



Fonte: Elaborada pelo Autor

3.4.1 Parâmetros utilizados na Simulação

Da mesma forma que (BELLIA; YOUCEF; FATIMA, 2014), utilizou-se o painel fotovoltaico *Photowatt* PWX500 como amostra de dispositivo para avaliação do sistema. Dessa forma, os parâmetros utilizados na simulação para validação do modelo são apresentados na Tabela 1. As colunas da tabela descrevem os significados dos parâmetros, as respectivas variáveis utilizadas nos diagramas de blocos do SIMULINK®, os valores numéricos e suas respectivas unidades.

Tabela 1: Parâmetros utilizados para validação do modelo

Parâmetro	Variável	Valor	Unidade
Potência máxima na STC	P_{mp}	49	W
Corrente no ponto P_{mp} na STC	I_{mp}	2,88	A
Tensão no ponto P_{mp} na STC	V_{mp}	17	V
Coefficiente de temperatura	K_i	0.0013	A/K
Corrente de curto-circuito na STC	$I_{sc, stc}$	3.11	A
Irradiância solar na STC	$G_{sc, stc}$	1000	W/m ²
Tensão de circuito aberto na STC	V_{oc}	21.8	V
Carga do elétron	q	1.6021×10^{-19}	C
Fator de idealidade (<i>Si-poly</i>)	A	1.3	—
Constante de Boltzmann	k	1.3805×10^{-23}	J/K
Resistência <i>shunt</i>	R_p	350	Ω
Resistência série	R_s	0.55	Ω
Número de células em série	N_s	36	-
Número de painéis em série	N_{ss}	1	-
Número de painéis em paralelo	N_{pp}	1	-

Fonte: Elaborada pelo Autor baseado em (BELLIA; YOUCEF; FATIMA, 2014)

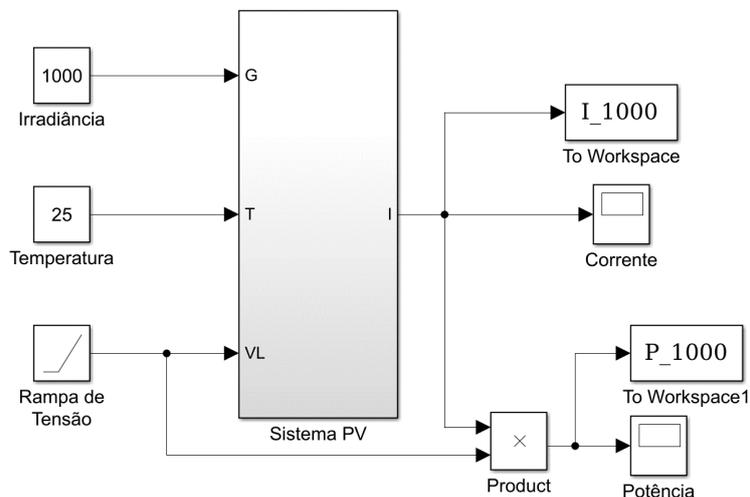
Na Seção 4 são apresentados os resultados obtidos nas simulações em três cenários: na validação do modelo proposto, na geração de energia durante um dia, e nas gerações de energia durante os anos de 2012 a 2016.

4 RESULTADOS

4.1 Validação do Modelo no SIMULINK®

Com objetivo de validar o funcionamento do modelo implementado no MATLAB®, os subsistemas do diagrama de blocos da Figura 13 foram agrupados em um subsistema conforme apresentado na Figura 14. O bloco “Rampa de Tensão” é responsável por variar a tensão simulada nos terminais do dispositivo fotovoltaico de 0 a 25 V, possibilitando obter as curvas de corrente e potência em função da tensão do painel avaliado. Os blocos de constantes “Irradiância” e “Temperatura” permitem entrar com combinações de valores específicos de interesse para seus respectivos parâmetros na simulação.

Figura 14: Diagrama de blocos para simulação dos efeitos de variação de irradiância e temperatura em um dispositivo fotovoltaico

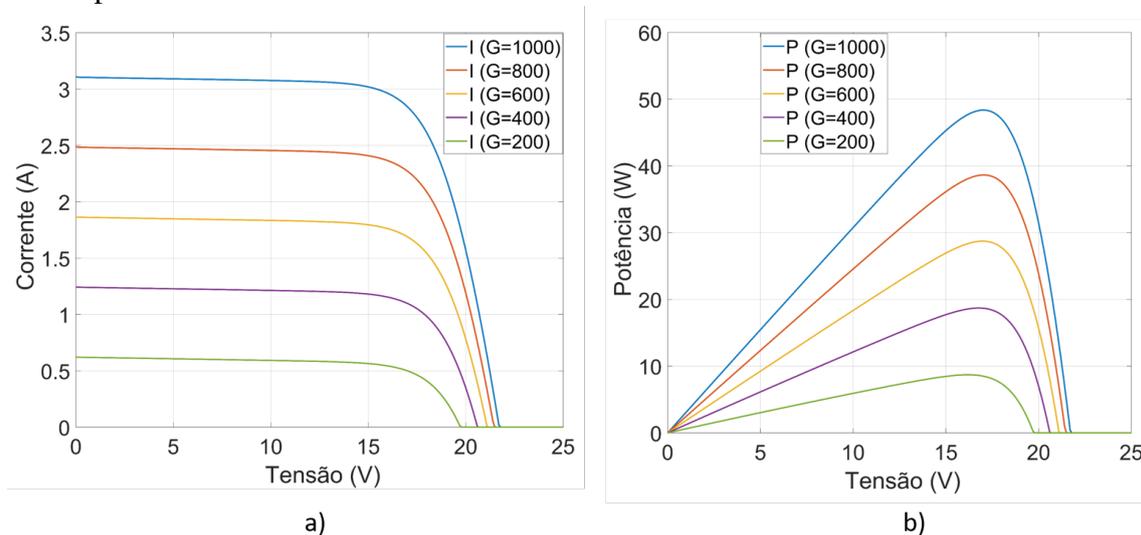


Fonte: Elaborada pelo Autor

Assim, foram simulados cinco cenários variando a irradiância de entrada G entre 200 e 1000 W/m^2 , mantendo a temperatura T constante em $25 \text{ }^\circ\text{C}$. As curvas características de corrente e potência resultantes são apresentadas na Figura 15. Pode-se observar na Figura 15(a) a curva de corrente para a STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) em azul, na qual é possível verificar os valores da corrente de curto-circuito $I_{SC,STC}$ próxima de 3,1 A quando a tensão é nula, e a tensão de circuito aberto V_{OC} próxima de 22 V quando não há circulação de corrente elétrica. Esses valores estão de acordo com os parâmetros de entrada característicos do painel, conforme descritos na Tabela 1. Da mesma forma, a potência P_{mp} de aproximadamente 49 W na Figura 15(b), e a tensão V_{mp} definida pelo

valor de tensão onde as curvas de potência indicam seus pontos máximos, também estão de acordo.

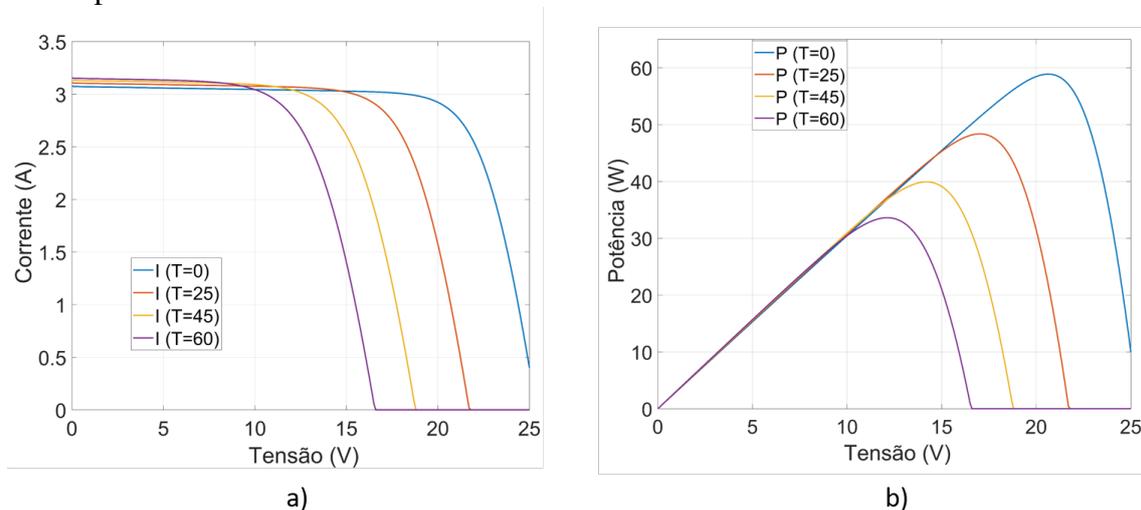
Figura 15: Efeitos de variação de irradiância nas curvas de a) corrente e b) potência de um dispositivo fotovoltaico



Fonte: Elaborada pelo Autor

De forma semelhante, para avaliar os efeitos da variação de temperatura nas curvas de corrente e de potência de um dispositivo PV, foram simulados quatro cenários mantendo a irradiância G constante em 1000 W/m^2 , variando a temperatura T entre 0 e $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Os resultados das curvas de corrente na Figura 16(a) e das curvas de potência na Figura 16(b) demonstram perfis limitados em função do aumento de temperatura, sendo este um comportamento característico de dispositivos fotovoltaicos. Considera-se assim, portanto, que o modelo está validado.

Figura 16: Efeitos da variação de temperatura nas curvas de a) corrente e b) potência de um dispositivo fotovoltaico



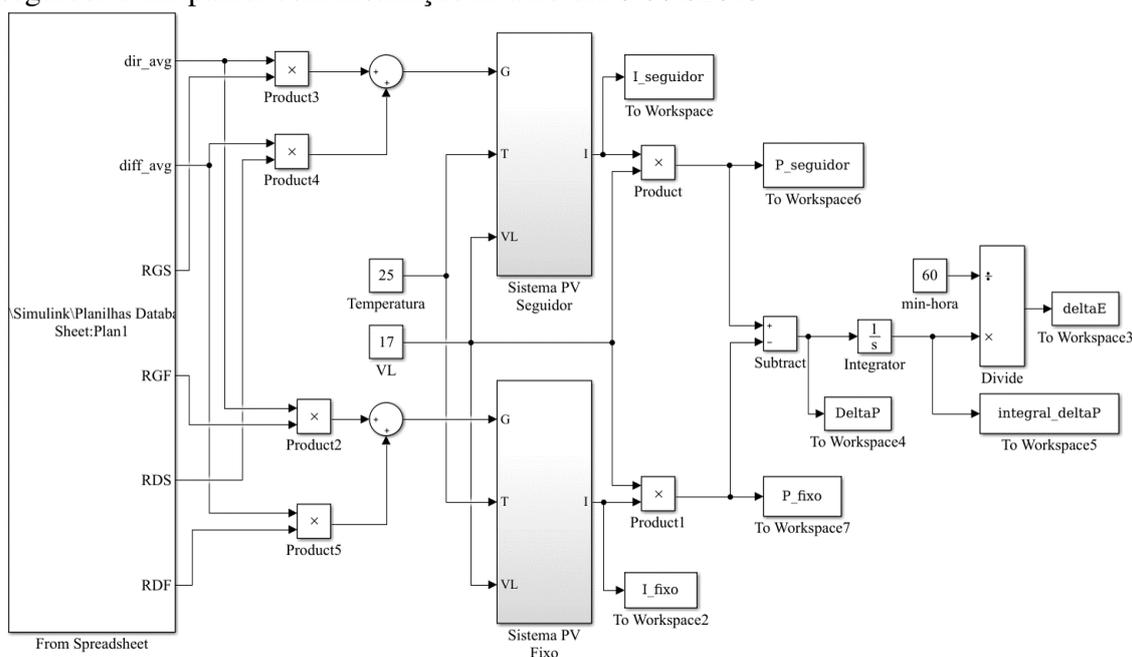
Fonte: Elaborada pelo Autor

4.2 Simulação da Geração de Energia em um dia

Avaliado o comportamento do modelo, com objetivo de comparar a geração de um painel fotovoltaico com sistema de movimentação seguidor e um painel fotovoltaico estático em um único dia, implementou-se um diagrama de blocos capaz de ler os dados de uma planilha com formato “.xls”. A data para simulação foi arbitrada em 4 de janeiro de 2015. De forma semelhante ao diagrama da Figura 14, utilizaram-se dois blocos correspondentes ao subsistema do modelo de um dispositivo fotovoltaico, sendo um dos blocos para o painel PV com seguidor e o outro para o painel PV fixo.

Optou-se por utilizar a tensão de saída dos módulos VL igual a V_{mp} , considerando o uso de um dispositivo seguidor do ponto de máxima potência (MPPT), com controle por tensão constante, conectado nas saídas dos módulos fotovoltaicos. O presente trabalho limitou-se a simular apenas os resultados em função da variação de irradiância, avaliando assim cenários apenas para temperatura constante com T igual a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. O diagrama utilizado para comparar a geração de energia no dia especificado pode ser visto na Figura 17.

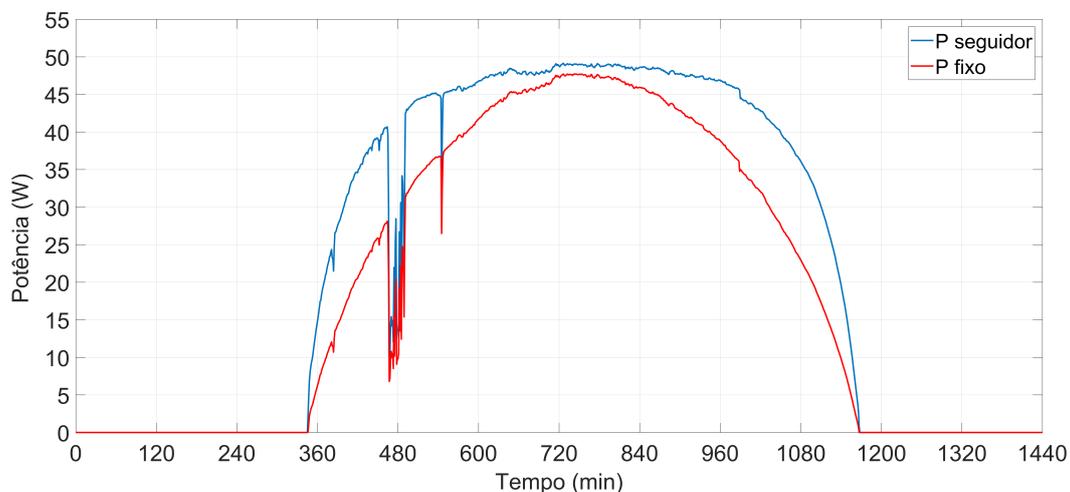
Figura 17: Diagrama de blocos para comparação de geração de um painel com sistema seguidor e um painel com instalação fixa no dia 04/01/2015



Fonte: Elaborada pelo Autor

Ambos os painéis dessa simulação são do modelo descrito pela Tabela 1. O resultado das potências geradas pode ser visto na Figura 18, na qual a linha em azul indica a potência de saída do painel com sistema de movimentação seguidor, e a linha em vermelho representa a potência fornecida pelo painel fixo. Pode-se observar que, dos 1439 minutos do dia, cerca de 800 minutos apresentaram irradiância solar incidente no local de estudo. Tanto nos minutos após o nascer do Sol, próximo dos 360 minutos do dia, quanto nos minutos anteriores ao pôr do Sol, antes dos 1200 minutos, as baixas potências de saída dos painéis são atribuídas à pequena quantidade de irradiância disponível nesses períodos, composta apenas pela componente difusa dessa variável.

Figura 18: Simulação das potências geradas por painéis de 36 células com sistema seguidor e com instalação fixa no dia 04/01/2015

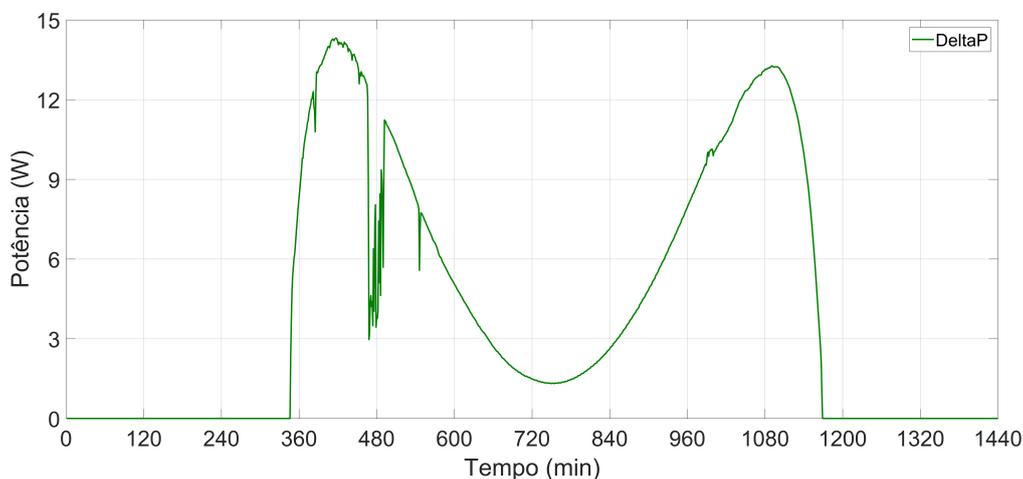


Fonte: Elaborada pelo Autor

Analisando a Figura 18, deve-se atribuir as oscilações dos sinais de potência na faixa dos 480 minutos do dia ao bloqueio dos raios solares causado possivelmente por nuvens. Como as nuvens podem interromper total ou parcialmente a incidência da irradiância direta, sendo essa a principal componente que difere entre uma instalação com seguidor e uma instalação fixa, a diferença das potências também diminui.

Um bloco de subtração é utilizado para obter a diferença ΔP entre a potência gerada pelo painel fotovoltaico com sistema seguidor e a potência gerada pelo painel fixo. A diferença de potência é conectada a um bloco integrador que acumula durante o intervalo de simulação, sendo possível assim obter a quantidade de energia gerada a mais com o sistema seguidor, equivalente a 97,4 Wh com os dados solarimétricos do dia 04/01/2015. Considerando que o painel avaliado oferece 49 Wp na STC, pode-se avaliar que a diferença obtida equivale a duas horas a mais de Sol nesta condição de operação. O sinal da diferença ΔP para essa data pode ser analisado na Figura 19.

Figura 19: Diferença das potências geradas na simulação com um painel de 36 células com sistema seguidor e com instalação fixa no dia 04/01/2015



Fonte: Elaborada pelo Autor

Um comportamento analisado no sinal da Figura 19 é que durante o período de incidência solar (entre o nascer e o pôr do Sol), a diferença das potências não apresentou valor nulo. Isso deve-se ao fato de que os ângulos de inclinação e de azimute das superfícies em nenhum instante foram iguais, visto que esses são os parâmetros diferentes entre os sistemas na simulação, e são eles que influenciam as variações das componentes de irradiância direta e difusa nas superfícies dos painéis.

4.3 Simulação da Geração de Energia em cinco anos

Buscando-se obter resultados para um intervalo de tempo maior do que um dia, optou-se por comparar dois sistemas compostos por painéis do mesmo modelo PWX500 utilizados nas simulações anteriores, mas com uma quantidade diferente de dispositivos. Assim, arbitrou-se uma configuração com 12 painéis conectados em paralelo para cada um dos sistemas (com seguidor e fixo).

Conforme descrito na Seção 3.1, os dados solarimétricos do projeto SONDA são disponibilizados após passarem por um algoritmo de controle de qualidade, de forma que existam amostras dos intervalos de tempo cujos valores de irradiância foram reprovados, sendo assim excluídos das planilhas. Com isso, foram executadas simulações utilizando os dados de irradiância dos anos de 2012 até 2016, apresentando-se os resultados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados das simulações de geração de energia em cinco anos

Ano	Energia Gerada Sistema Seguidor (kWh)	Energia Gerada Sistema Fixo (kWh)	Diferença de Energia (kWh)	Intervalo de tempo com dados válidos (min)
2012	994,1	806,7	187,4	524521
2013	969,9	784,0	185,9	518132
2014	954,3	775,1	179,2	523522
2015	863,8	701,3	162,5	511414
2016	908,1	739,7	168,4	507761

Fonte: Elaborada pelo Autor

Pode-se avaliar na Tabela 2 que o sistema seguidor gerou mais energia elétrica nos cinco períodos se comparado ao sistema fixo. A diferença de energia gerada é mostrada em kWh e representa uma média de 23,7 % de ganho na geração anual de sistemas com a mesma quantidade de painéis. Ainda, para cada ano são apresentadas as quantidades de amostras válidas nos intervalos de tempo simulados, sabendo-se que um ano de 365 dias equivale a 525600 minutos. A menor quantidade de amostras disponíveis pode implicar nos valores de geração de energia identificados nos anos de 2015 e 2016, que estão abaixo dos demais anos.

5 CONCLUSÃO

Através do trabalho realizado foi possível obter um modelo com diagramas de blocos capaz de representar o comportamento de um dispositivo fotovoltaico. Este modelo foi validado aplicando-se na sua entrada valores de irradiância e temperatura conforme a STC especificada pelo fabricante, cujos resultados estão de acordo com o esperado.

Em relação ao algoritmo de posicionamento solar executado através da ferramenta *online*, pode-se verificar sua eficiência baseado nos resultados da simulação da geração de energia em um dia, e na diferença de geração obtida para os anos de 2012 a 2016. O ganho médio encontrado foi de 23,7 % de energia gerada no sistema com mecanismo seguidor em relação ao sistema com instalação fixa. O resultado positivo já era algo descrito na bibliografia, porém o trabalho permitiu estimar de forma quantitativa o ganho esperado para determinadas configurações de sistemas de geração dessa natureza.

Embora alguns efeitos não tenham sido considerados nesse estudo, como a variação de temperatura dos painéis, o envelhecimento dos dispositivos e o consumo dos atuadores que reduzem a eficiência dos painéis, a análise comparativa oferecida pode ser um critério na tomada de decisões para projetos de geradores solares.

Com isso, tendo como foco principal o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de estimar o ganho de sistemas fotovoltaicos com mecanismo seguidor, utilizando na entrada dados de irradiância da localidade de interesse, a solução implementada no trabalho foi considerada satisfatória.

5.1 Trabalhos Futuros

As propostas de aprimoramento são divididas em atividades para continuidade na implementação da ferramenta, e atividades de aplicação prática através da montagem de um sistema de geração real.

Visto que o software MATLAB/SIMULINK® requer um conhecimento razoável de utilização, sugere-se o desenvolvimento de uma interface mais amigável para possíveis usuários da ferramenta, incentivando assim a aplicação dessa tecnologia como fonte alternativa de energia.

Pode-se também acrescentar os efeitos não considerados ao modelo utilizado, como a influência da variação de temperatura das células PV, o envelhecimento dos componentes, o acúmulo de poeira em sistemas não autolimpantes e o consumo dos atuadores de movimentação. Isso pode aumentar a confiabilidade dos resultados visto que o comportamento simulado tende a ser mais próximo do real.

Através do levantamento de produtos disponíveis no mercado desse ramo tecnológico, utilizando a ferramenta proposta é possível realizar uma análise econômica de viabilidade com estimativas de *payback* para variados cenários de investimento.

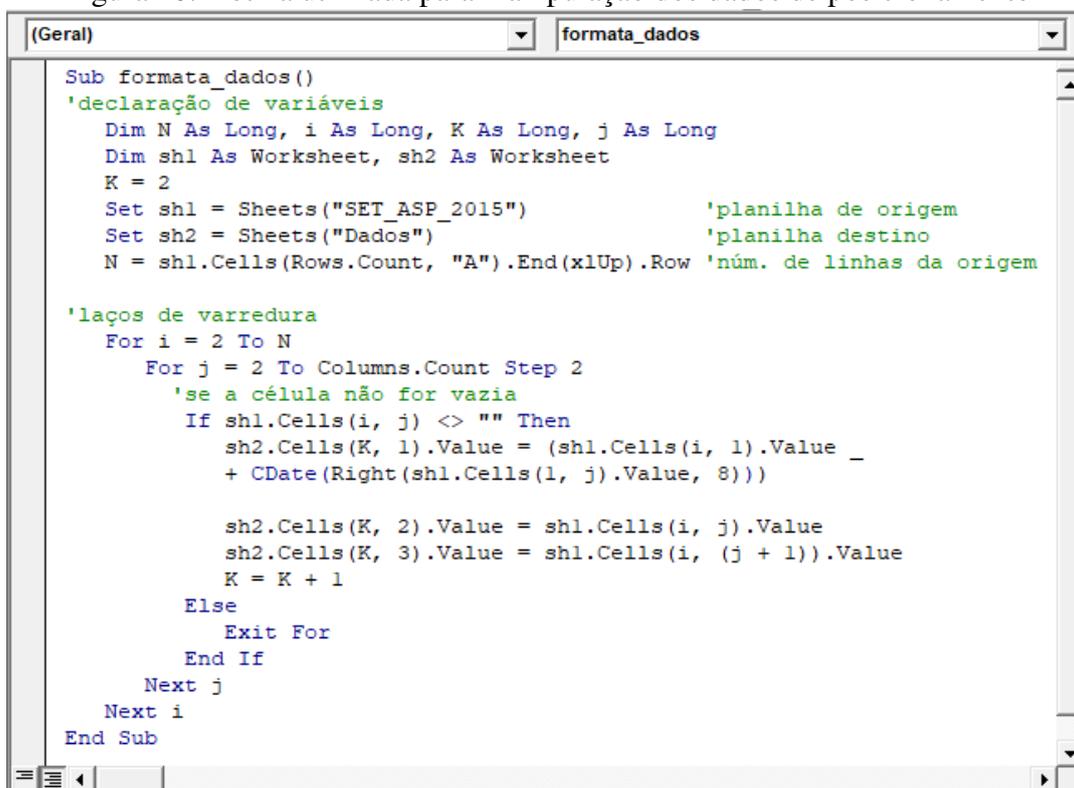
BIBLIOGRAFIA

- ABTAHI Amir; Messenger, R. **Photovoltaic Systems Engineering**. 4. ed. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica - Resolução Normativa 482. Brasil, 2012.
- BAHRAMI, A.; OKOYE, C. O.; ATIKOL, U. The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa. **Applied Energy**, Elsevier, v. 177, p. 896–906, 2016.
- BELLIA, H.; YUCEF, R.; FATIMA, M. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. **NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics**, National Research Institute of Astronomy e Geophysics, v. 3, n. 1, p. 53–61, 2014.
- BENITO, T. P. **Práticas de energia solar fotovoltaica**. 1. ed. Porto, Portugal: Publindústria, 2011. 110p.
- BOHLEN, D. V. Solar power. March, 2009.
- BOURAIYOU, A. et al. Modeling and Simulation of Photovoltaic Module and Array Based on One and Two Diode Model Using Matlab/Simulink. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 74, p. 864–877, 2015.
- BOXWELL, M. **Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy : how to Design and Install Photovoltaic Solar Electric Systems**, p. 197, 2012.
- CHAICHAN, M. T.; KAZEM, H. A. **Generating Electricity Using Photovoltaic Solar Plants in Iraq**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–207.
- CHANG, Y. P. Optimal the tilt angles for photovoltaic modules in Taiwan. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Elsevier, v. 32, n. 9, p. 956–964, 2017.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Radiation**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 116, p. 928.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional - 2018. Rio de Janeiro, maio 2018.
- FOUAD, M. M.; SHIHATA, L. A.; MORGAN, E. S. I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 80, June, p. 1499–1511, 2017.
- GERLACH, A. et al. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany. September, p. 21–25, 2009.
- GRASSI, C. A. O. Potencial de Geração de Energia Elétrica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede e Integrado a uma Edificação na Orla de Porto Alegre: Verificação do Tempo de Retorno do Investimento. Porto Alegre, p. 88, 2015.

- GRENA, R. An algorithm for the computation of the solar position. **Solar Energy**, v. 82, n. 5, p. 462–470, 2008.
- KALOGIROU, S. **Solar energy engineering: processes and systems**. [S.l.]: Elsevier, 2009.
- NOAA. **Ferramentas para designers e consumidores de energia solar**. [S.l.]. Disponível em: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web>. Acesso em: 12 out. 2018.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014.
- REDA, I.; ANDREAS, A. Corrigendum to Solar position algorithm for solar radiation applications. **Solar Energy**, v. 81, n. 6, p. 838, 2007.
- SOLARGIS. **Solar Resource Maps of World**. [S.l.]. Disponível em: <http://solar-gis.com/maps-and-gis-data>. Acesso em: 3 set. 2018.
- SONDA. **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. [S.l.]. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/infos/index.html>. Acesso em: 14 set. 2018.
- SOULATIANTORK, P. Performance comparison of a two PV module experimental setup using a modified MPPT algorithm under real outdoor conditions. **Solar Energy**, Elsevier, v. 169, p. 401–410, 2018.
- SUMATHI, V. et al. Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade. Elsevier, v. 74, p. 130–138, 2017.
- SUNEARTHTOOLS. **Ferramentas para designers e consumidores de energia solar**. [S.l.]. Disponível em: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php. Acesso em: 12 out. 2018.
- THOMAZ, C. J.; PEREIRA, E. Sonda BSRN network in brazil: status and new thresholds in data quality control, 2009.
- VIEBAHN, P.; LECHON, Y.; TRIEB, F. The potential role of concentrated solar power (CSP) in Africa and Europe-A dynamic assessment of technology development, cost development and life cycle inventories until 2050. **Energy Policy**, Elsevier, v. 39, n. 8, p. 4420–4430, 2011.
- VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica : conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012. 224p.
- WRMC-BSRN. **World Radiation Monitoring Center - Baseline Surface Radiation Network**. [S.l.]. Disponível em: <https://bsrn.awi.de/>. Acesso em: 17 set. 2018.
- XIAO, W. **Photovoltaic Power System**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 65–91.
- YANG, C. K. et al. Open-loop altitude-azimuth concentrated solar tracking system for solar-thermal applications. **Solar Energy**, Elsevier, v. 147, p. 52–60, 2017.

APÊNDICE A ROTINA DADOS DE POSICIONAMENTO

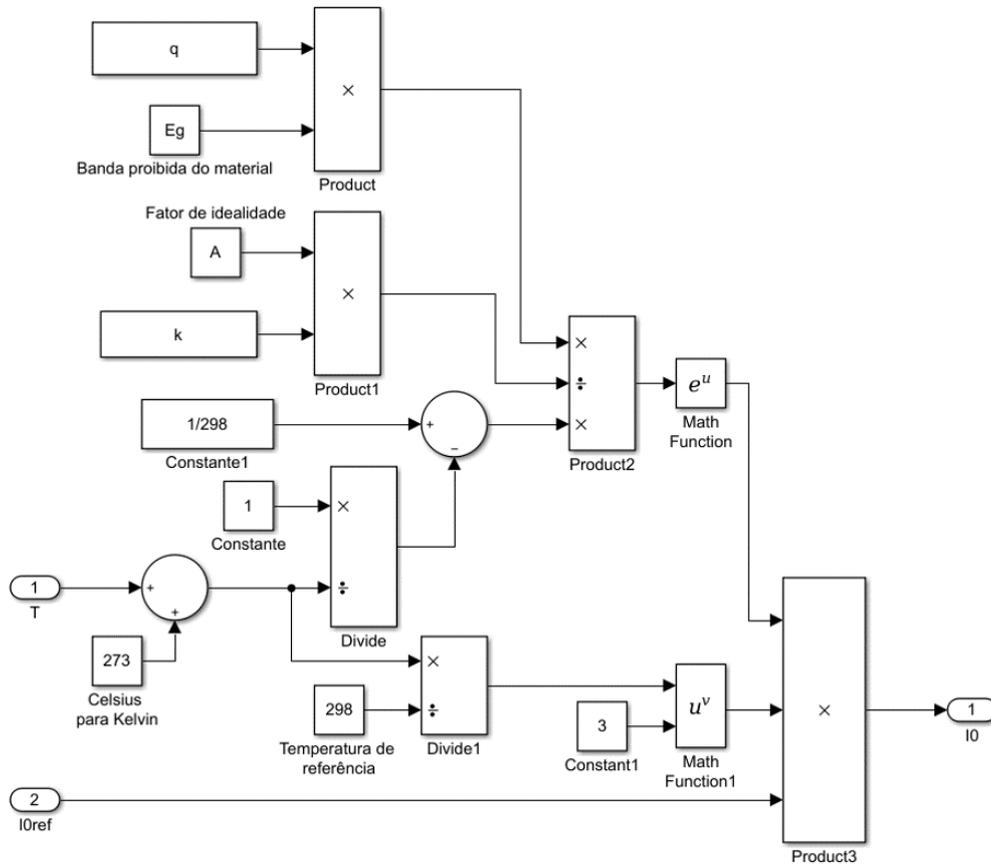
Figura 20: Rotina utilizada para manipulação dos dados de posicionamento



```
Sub formata_dados()  
'declaração de variáveis  
Dim N As Long, i As Long, K As Long, j As Long  
Dim sh1 As Worksheet, sh2 As Worksheet  
K = 2  
Set sh1 = Sheets("SET_ASP_2015")           'planilha de origem  
Set sh2 = Sheets("Dados")                 'planilha destino  
N = sh1.Cells(Rows.Count, "A").End(xlUp).Row 'núm. de linhas da origem  
  
'laços de varredura  
For i = 2 To N  
    For j = 2 To Columns.Count Step 2  
        'se a célula não for vazia  
        If sh1.Cells(i, j) <> "" Then  
            sh2.Cells(K, 1).Value = (sh1.Cells(i, 1).Value _  
                + CDate(Right(sh1.Cells(1, j).Value, 8)))  
  
            sh2.Cells(K, 2).Value = sh1.Cells(i, j).Value  
            sh2.Cells(K, 3).Value = sh1.Cells(i, (j + 1)).Value  
            K = K + 1  
        Else  
            Exit For  
        End If  
    Next j  
Next i  
End Sub
```

Fonte: Elaborada pelo Autor

Figura 23: Diagrama de blocos da corrente I_0 implementado no SIMULINK®



Fonte: Elaborada pelo Autor