



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

ALINE MARQUES DA SILVA

**Estudo do sistema de controle e aplicabilidade de um
sistema fotovoltaico com seguidor solar de um eixo
utilizando um servomotor.**

Uberlândia
2020

ALINE MARQUES DA SILVA

**Estudo do sistema de controle e aplicabilidade de um sistema
fotovoltaico com seguidor solar de um eixo utilizando um
servomotor.**

Trabalho apresentado como requisito
parcial de avaliação na disciplina
Trabalho de Conclusão de Curso do Curso
de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho
Gomes

Assinatura do orientador

Uberlândia
2020

ALINE MARQUES DA SILVA

Estudo do sistema de controle e aplicabilidade de um sistema fotovoltaico com seguidor solar de um eixo utilizando um servomotor.

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Assinatura do orientador

Banca examinadora

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes (UFU) (Orientador)

Prof. (UFU)

Prof. (UFU)

Uberlândia
2020

Dedico este trabalho aos que me apoiaram na jornada.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à minha vó Silvéria, minha tia Marilene e meu pai Reginaldo, que sempre foram exemplo e inspiração para minha formação pessoal.

À meu namorado, Marcelo, que me apoiou na diagramação deste documento, e esteve aos meus lados nos momentos de dificuldade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes, por ter me confiado o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas de turma, que se tornaram uma família para mim. E em especial ao Lincoln pelo apoio e ajuda para desenvolvimento da simulação presente neste trabalho, ao Diogo por ajudar em diversas dúvidas, e ao Julio pelo apoio no desenvolvimento no tema a ser discutido.

E por fim, a Deus, por estar sempre ao meu lado.

RESUMO

SILVA, A. M. **Estudo do sistema de controle e aplicabilidade de um sistema fotovoltaico com seguidor solar de um eixo utilizando um servomotor..** 2020. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

O mercado tem evoluído cada vez mais, e a demanda por um sistema de geração solar tem crescido gradualmente, com isso novas tecnologias são continuamente lançadas no mercado com intuito de aumentar a eficiência dos painéis solares, um dos métodos é o rastreamento solar. Métodos estes que proporcionam o alinhamento da superfície dos painéis fotovoltaicos com o ângulo de incidência solar, acompanhando o movimento do Sol ao longo do dia ou ao longo das estações, assim aumentando o rendimento de um sistema de geração fotovoltaica. Para fazer a modelagem, a análise e simulação do funcionamento do sistema de controle de um servomotor, será utilizada a ferramenta **Simulink**, desenvolvida pela companhia de softwares **MathWorks**. Os elementos do sistema serão modelados em blocos com parâmetros variáveis, sem utilizar linhas de código.. Sendo assim, esse estudo será focado em modelar os elementos do sistema de controle, obter a posição do painel. Em seguida será realizado um estudo de caso visando comparar o sistema móvel com um sistema solar fixo de mesma potência. Os elementos modelados e simulados serão: posição solar, fonte de tensão, erro, máquina de estados finitos (microcontrolador), função de transferência e medidores.

Palavras-chave: Seguidor Solar, Solar tacker, servomotor, controle, máquina de estados finitos.

ABSTRACT

SILVA, A. M. Study of the control and applicability system of a photovoltaic system with a solar axis tracking using a servomotor .. 2020. Monograph (Bachelor of Electrical Engineering) - Faculty of Electrical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2020.

*The market has evolved more and more, and the demand for a solar generation system has grown gradually, with this new technologies are continuously launched on the market in order to increase the efficiency of solar panels, one of the methods is solar tracking. These methods provide the alignment of the surface of the photovoltaic panels with the angle of solar incidence, following the movement of the Sun throughout the day or throughout the seasons, thus increasing the performance of a photovoltaic generation system. To do the modeling, analysis and simulation of the functioning of the control system of a servomotor, the **Simulink** tool, developed by the software company **MathWorks**, will be used. The elements of the system will be modeled in blocks with variable parameters, without using lines of code. Therefore, this study will focus on modeling the elements of the control system, obtaining the position of the panel. Then a case study will be carried out to compare the mobile system with a fixed solar system of the same power. The modeled and simulated elements will be: solar position, voltage source, error, finite state machine (microcontroller), transference function and meters.*

Keywords: Solar follower, Solar tacker, servomotor, control, finite state machine.

FIGURAS

Figura 1: Fontes de Energia Elétrica no Brasil	13
Figura 2: Mapa Solarimétrico do Brasil, com a média anual da irradiação diária..	14
Figura 3: Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica.	18
Figura 4: Componentes de um módulo fotovoltaico.	19
Figura 5: Componentes de um módulo fotovoltaico.	19
Figura 6: Inversor de frequência da marca Fronius.	20
Figura 7: Medidor de energia bidimensional	21
Figura 8: Área da curva $p(t)$	22
Figura 9: Representação da posição solar em determinada coordenada.	24
Figura 10: Representação do grau de movimentação do seguidor solar de um eixo..	25
Figura 11: Representação do grau de movimentação do seguidor solar de dois eixos..	26
Figura 12: Representação do grau de movimentação do seguidor solar de dois eixos..	27
Figura 13: Representação do circuito de um motor de corrente contínua.	27
Figura 14: Sistema de controle de malha fechada.	29
Figura 15: Representação das grandezas relacionadas ao PWM.	31
Figura 16: Representação das grandezas relacionadas ao PWM.	32
Figura 17: Duty Cycle de uma fonte geradora de tensão de 5V.	33
Figura 18: Representação do circuito do servomotor.	33
Figura 19: Função de transferência do servomotor	35
Figura 20: Visão geral da simulação do controle do servomotor.	37
Figura 21: Bloco n-D Lookup Table.	38
Figura 22: Representação do erro e o controle lógico de máquina de	

estados finitos sistema simulado..	39
Figura 23: Controle lógico de de máquina de estados finitos sistema simulado.	39
Figura 24: Controle lógico de de máquina de estados finitos sistema simulado	40
Figura 25: Função de transferência 1.	41
Figura 26: Função de transferência 2.	41
Figura 27: Função de transferência 3.	42
Figura 28: Função de transferência, parâmetros constantes e degrau de realimentação do sistema..	42
Figura 29: Posição do painel em relação a posição solar.	43
Figura 30: Posição solar, posição do painel e o pulso (PWM).	44
Figura 31: Posição solar, posição do painel e o erro simulado..	44
Figura 32: Instalação do sistema solar na região da Paraíba.	45
Figura 33: Comparação da energia gerada pelo sistema fixo e o sistema móvel.	47
Figura 34: Comparação da energia gerada ao longo do ano.	47

ABREVIATURAS E SIGLAS

MPPT	Seguidor do Ponto Máxima Potência
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
IGCT	Portão Integrado Controlado
MOSFET	Transistor de efeito de Campo Metal
PWM	Modulação por largura de pulso
V	Volts
SAM	System Advisor Model

SUMÁRIO

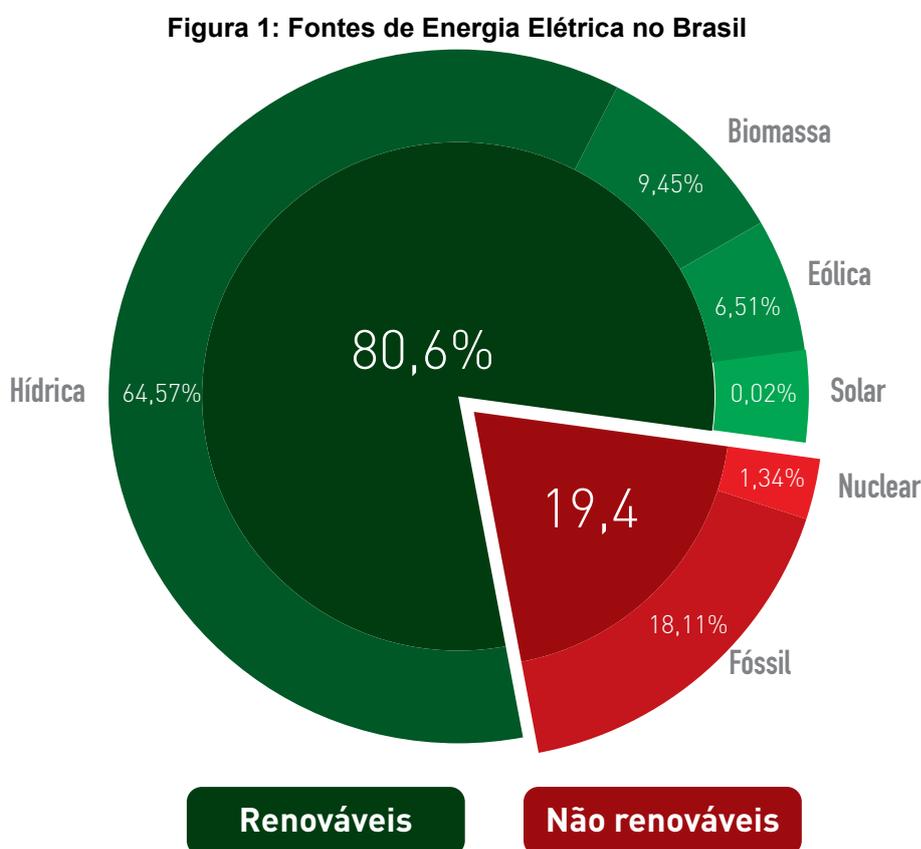
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.	15
1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 ENERGIA SOLAR	17
2.1.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO	17
2.1.1.1 ENERGIA GERADA.	21
2.1.2.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.	22
2.2 POSICIONAMENTO SOLAR	23
2.3 RASTREAMENTO SOLAR	24
2.3.1 SISTEMA DE EIXO ÚNICO	25
2.3.2 SISTEMA DE EIXO DUPLO	26
2.4 MAQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA	26
2.5 SISTEMAS DE CONTROLE	28
2.5.1 CONTROLE POR MALHA FECHADA	28
2.5.3 ERRO EM REGIME PERMANENTE	29
2.5.3 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE SISTEMAS LINEARES	30
3. SERVOMOTOR	31
3.1 PWM (PULSE-WIDTH MODULATION)	32
3.2 MODELO MATEMÁTICO DO SERVOMOTOR.	33
4 MODELAGEM DO SERVOMOTOR NO MATLAB-SIMULINK®.	37
4.1 PARÂMETROS DE ENTRADA	37

4.1.1 POSIÇÃO SOLAR	38
4.1.2 PWM E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE LÓGICO DE MÁQUINA DE ESTADOS FINITOS	38
4.1.3 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	40
4.1.5 PARÂMETROS DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO	43
5. ANÁLISE DE UM ESTUDO DE CASO COMPARATIVO DE UM SISTEMA FOTOVOLTÁICO EM MODO FIXO E COM SEGUIDOR.	45
6 CONCLUSÃO	48
6.1 TRABALHOS FUTUROS.	48

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, tal qual o restante do mundo sofre um crescente consumo e demanda de energia elétrica nas residências, comércio e indústria devido ao crescimento populacional e ao contínuo processo de desenvolvimento tecnológico que insere o uso de eletricidade em diversas aplicações.

No país cerca de 80,6% da matriz elétrica são de fontes renováveis, sendo 60,2% hidráulica, 8,2% biomassa e 6,9% solar e eólica conforme ilustrado na Figura 1 (BEN, 2018).



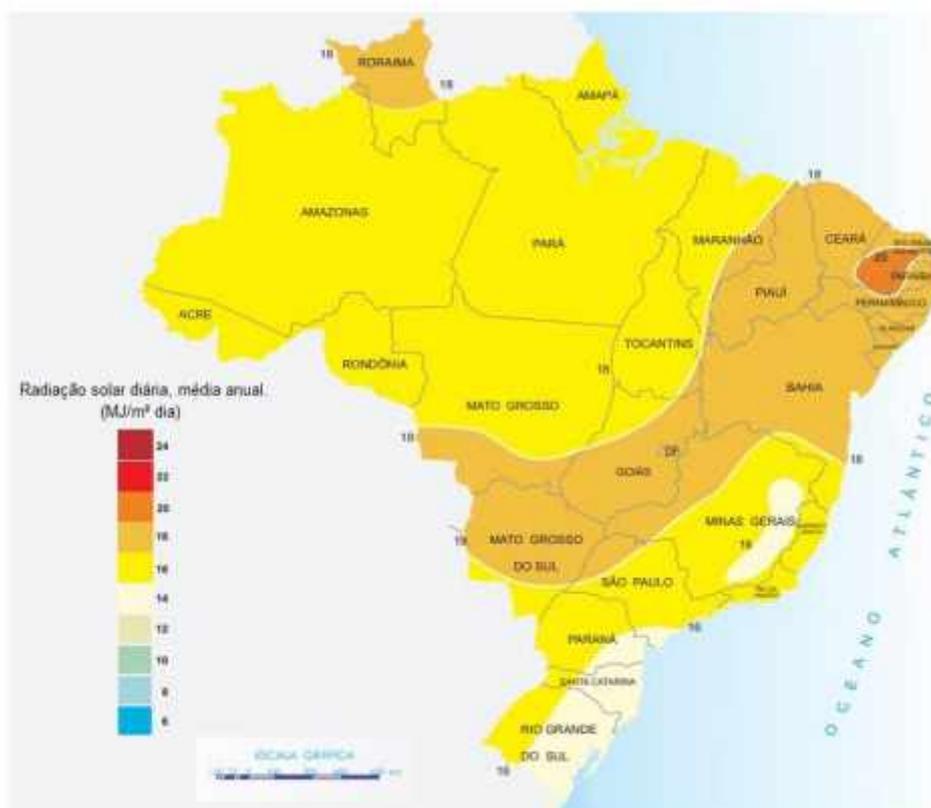
Fonte: (Adaptado de Aneel, 2017)

Apesar de renovável, a geração de energia a partir de fontes hidráulicas é limitada e possui alto impacto ambiental na flora e fauna da região alagada. A exemplo da metodologia aplicada no PDEE 2006-2015 (EPE, 2006c), a análise socioambiental do sistema elétrico brasileiro deve destacar os seguintes pontos: principais biomas, as áreas protegidas (Unidades de Conservação - UC e Terras Indígenas), as áreas prioritárias para conservação da biodiversidade, os diferentes usos do solo, as bacias

hidrográficas e as áreas com maior densidade demográfica. Considerando que, cerca de 70% do potencial a aproveitar está localizado nas regiões Norte e Centro-Oeste, são especialmente relevantes, do ponto de vista socioambiental, os três primeiros pontos acima relacionados (EPE, 2006c).

Tendo em vista tamanho impacto ambiental, e o grande crescimento exponencial do consumo de energia, a geração de energia solar é um dos grandes potenciais energéticos brasileiros. Como observado na figura 2, com o mapa Solatimétrico do Brasil, representando a média anual de incidência solar, em regiões por intensidade.

Figura 2: Mapa Solarimétrico do Brasil, com a média anual da irradiação diária.



Fonte: (EPE, 2008)

O Brasil ultrapassou a marca de 1 gigawatt de potência instalada em micro e minigeração distribuída de energia elétrica. Trata-se de um grande avanço, proporcionado em grande medida pela regulação da ANEEL (Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015). Graças a essas ações, o consumidor pode gerar sua energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (ANEEL, 2020).

1.1 OBJETIVOS

O Foco desse trabalho é analisar a viabilidade da instalação de um seguidor solar de um eixo, comprovando a eficiência do método perante os painéis solares fixos tradicionais. Para tal será modelado o sistema de controle de um servomotor, e também realizada uma simulação utilizando a ferramenta Simulink do software MATLAB, produzido pela MathWorks.

Cabe também ressaltar como objetivo deste trabalho, a análise e aplicabilidade destes sistemas rastreadores, analisando as vantagens financeiras de sua introdução em um sistema fotovoltaico. Para tal é importante também apurar as desvantagens trazidas pela introdução dos seguidores solares, como aumento e complexidade do sistema, o aumento no custo e aumento do consumo das cargas próprio do sistema implementado.

1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

O capítulo 2 oferece um referencial teórico para embasar o entendimento do trabalho. Neste referencial, será discutido o sistema fotovoltaico, como calcular a energia gerada e a eficiência do mesmo. Também serão apresentados os parâmetros que representam a posição solar, para então explicar sobre os tipos de rastreadores solar. Além de tudo será discorrido sobre as máquinas rotativas de corrente contínua.

No capítulo 3 é introduzido o conceito e realizado um modelo matemático do servomotor, além de apontar quais serão os valores e modelo adotados na simulação.

No capítulo 4 é apresentada a simulação realizada no Simulink, bem como os resultados obtidos.

No capítulo 5 será discutido a viabilidade da substituição de um painel com mesmas propriedades um fixo, e outro utilizando o seguidor solar de um eixo.

Por fim, o Capítulo 6 está reservado para as conclusões finais deste trabalho e sobre os trabalhos futuros.



2. REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir será descrito o referencial teórico utilizado para compor este documento.

2.1 ENERGIA SOLAR

Em 1839 surgiu o princípio da energia fotovoltaica com a descoberta de Edmond Becquerel, onde estudou-se o surgimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica quando esta era exposta à luz. No século seguinte, durante a guerra fria com o crescimento da indústria aeroespacial surgiu a necessidade de fontes de energia para os veículos e satélites devido a longa permanência no espaço. Outro incentivador para o desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos foi a crise energética de 1973, onde países de todo o mundo estavam buscando alternativas ao uso de do petróleo (BRAGA, 2008).

O efeito fotovoltaico, se dá devido a transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, ou tensão elétrica, sobre uma célula composta por materiais semicondutores. Quando conectada a dois eletrodos, e se houver caminho elétrico entre os dois eletrodos surgirá uma corrente elétrica (VILLALVA, 2012).

2.1.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os sistemas fotovoltaicos de geração distribuída, são divididos em dois tipos: *On grid* e *Off Grid*.

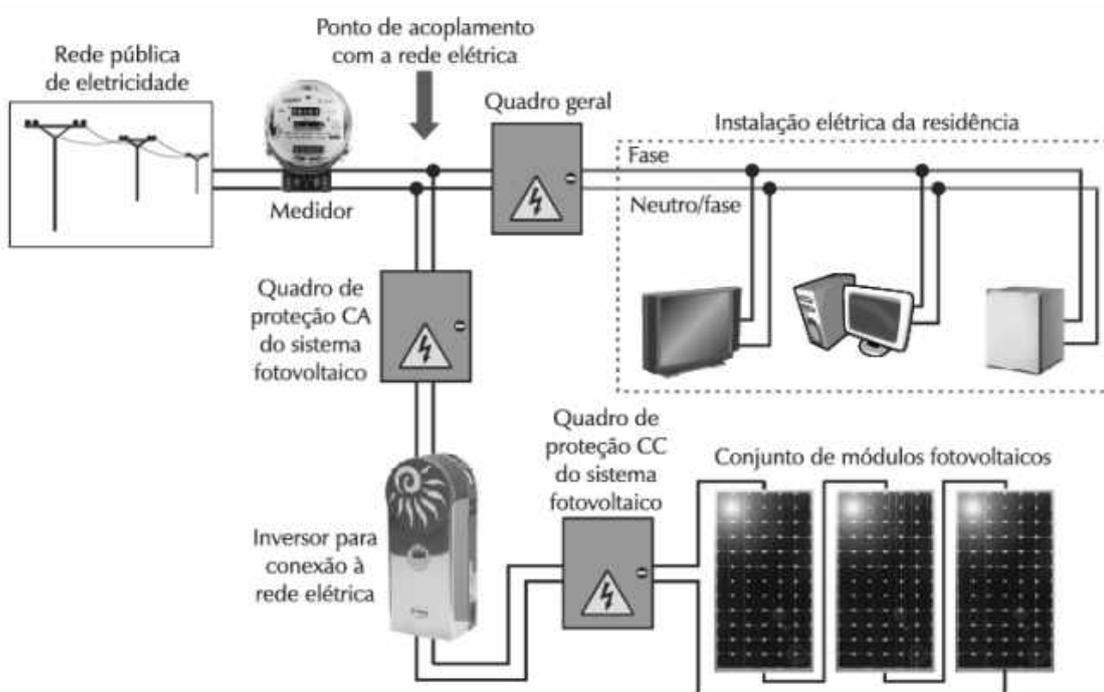
O sistema *Off Grid* não necessita ser conectado à rede, uma grande vantagem para sistemas que precisam ser instalados em locais mais afastados e sem acesso à rede da concessionária. Porém para armazenar a energia é necessário a utilização de baterias, que aumentam significativamente o valor do sistema, e que também são poluentes e não serão portanto estudados mais profundamente neste documento.

Já o sistema *On Grid* é conectado à rede, e o excedente de energia produzida que não é consumida é injetado à rede. Comparado ao sistema *Off Grid* seu custo é

significativamente menor, e em caso de algum tipo de pane no sistema fotovoltaico à instalação não tem seu fornecimento de energia interrompido uma vez que a mesma está conectada à rede elétrica da concessionária.

Um sistema fotovoltaico On Grid é constituído pelos seguintes elementos: medidor bipolar, quadro geral de proteção CA do sistema fotovoltaico, inversor para conexão à rede elétrica, quadro de proteção CC do sistema fotovoltaico, conjunto de módulos fotovoltaicos conforme ilustrado na figura 3.

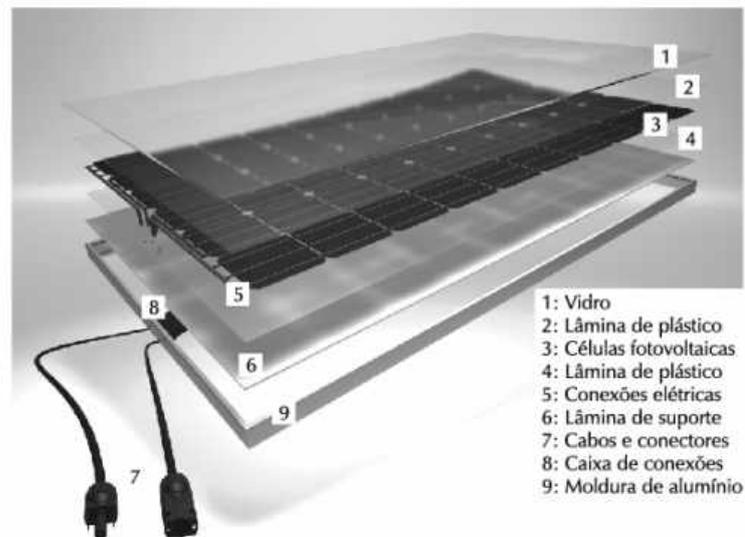
Figura 3: Organização e componentes de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica.



Fonte: (VILLALVA, 2012)

Um módulo fotovoltaico é um conjunto de células montadas sobre uma estrutura metálica e conectadas eletricamente, compostas de silício. Comumente conectadas em série, ou seja, os terminais superiores de uma célula são ligados aos terminais inferiores da outra e assim sucessivamente a fim de produzir tensões maiores. São compostos de uma camada de vidro, uma fina lâmina de plástico, conexões elétricas, lâmina de suporte, cabos e conectores, caixa de conexões e moldura de alumínio conforme pode ser visto na figura 4.

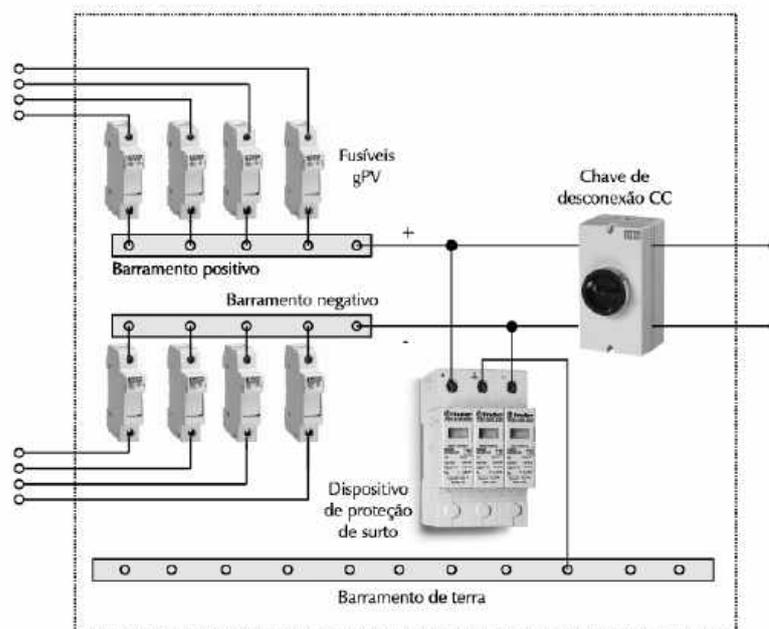
Figura 4: Componentes de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (Bosch Solar Energy AG, 2012)

O quadro de proteção de corrente contínua (Figura 5) do sistema fotovoltaico, além de possuir os fusíveis para conexão dos strings (junção das conexões provenientes dos paines fotovoltaicos), incorpora um chave de desconexão CC e dispositivo de proteção de surto (VILLALVA, 2012). O quadro de proteção CC também deve possuir um barramento de aterramento, necessário realizar as conexões dos módulos fotovoltaicos e estruturas metálicas à terra.

Figura 5: Componentes de um módulo fotovoltaico.



Fonte: (VILLALVA, 2012)

Já o quadro de proteção CA é responsável por fazer a conexão entre os inversores do sistema fotovoltaico e a rede elétrica. Também deve possuir um barramento de aterramento para conectar os inversores à terra, além de um dispositivo de proteção contra surto. Neste quadro percebe-se a presença de um disjuntor diferencial residual na entrada, que pode ser substituído por um disjuntor termomagnético combinado a um interruptor diferencial.

O inversor solar é um equipamento eletrônico que converte a corrente elétrica (CC) e em alternada (CA), além de garantir a segurança de todo o sistema e pela otimização de energia produzida. O aparelho conta com interruptores ou chaves eletrônicas, que podem ser transistores do tipo IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada), IGCT (Portão Integrado Controlado) ou MOSFET (Transistor de efeito de Campo Metal — óxido — semicondutor) (GUIMARÃES, 2019). Além dos botões para configuração necessária do aparelho como pode ser visto na figura 6.

Figura 6: Inversor de frequência da marca Fronius.



Fonte: (PROCESSTEC, 2019)

O sistema fotovoltaico deve dispor de um medidor bidirecional uma vez que é um componente fundamental para os sistemas de energia solar fotovoltaica conectados à rede das concessionárias de energia elétrica. Ao contrário do medidor convencional, o medidor bidirecional mede não só a energia consumida por uma instalação, mas também mede a quantidade de energia injetada na rede elétrica (SOLIS ENERGIA, 2019).

Figura 7: Medidor de energia bidimensional



Fonte: (SOLARVOLT, 2020)

2.1.1.1 ENERGIA GERADA

Para se calcular a energia gerada por um sistema fotovoltaico é necessário multiplicar a tensão e as correntes geradas, o que resulta na potência instânea do sistema.

$$E=P \times t \quad (1)$$

Porém a potência gerada não é a mesma durante todo o intervalo de tempo, logo é necessário integrar a curva da potência no tempo, afim de se obter a energia que foi gerada em um dia pelo sistema fotovoltaico.

$$E = \int_a^b p(t) \times dt \quad (2)$$

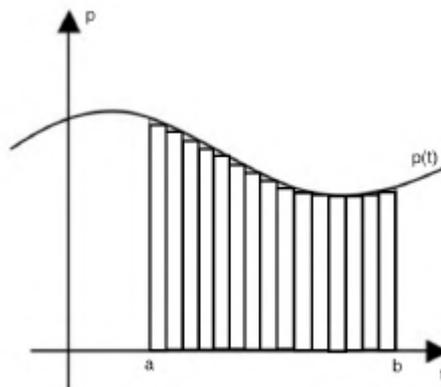
Onde:

- E representa a energia gerada;
- P a potência gerada pelo sistema fotovoltaico;
- $p(t)$ a potência no domínio do tempo.

Contudo não é sabida a função da curva do sistema através de medidores comerciais, mas se sabe a potência instantânea a cada período de tempo. A soma das áreas fornecerá a área total da superfície, que é a energia total gerada, conforme ilustrado na figura 8.

$$E = \sum_a^b (p(t) \times dt) \quad (3)$$

Figura 8: Área da curva p(t)



Fonte: (CARAVITA, 2016)

Em outros termos, a energia total gerada pelo sistema fotovoltaico é a somatória, no intervalo do tempo de funcionamento das placas, das potências instantâneas a cada medida tomada vezes o intervalo entre as medidas (CARAVITA, 2016).

2.1.2.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O cálculo da eficiência de um painel solar pode ser obtido dividindo a energia gerada pelo painel pela energia entregue pelo sol. Para a dedução de uma fórmula que relacione o rendimento de um sistema solar fixo e um sistema solar móvel, serão utilizadas as seguintes equações:

$$\eta_{fixo} = \frac{E_{fixo}}{E_{sol}} \quad (5)$$

$$\eta_{móvel} = \frac{E_{móvel}}{E_{sol}} \quad (6)$$

Onde:

- η_{fixo} rendimento dos painéis solares do sistema fixo.
- $\eta_{móvel}$ rendimento dos painéis solares do sistema móvel.
- E_{fixo} energia gerada pelo sistema fixo.
- $E_{móvel}$ energia gerada pelo sistema móvel.
- E_{sd} energia entregue pelo sol.

No momento em que as medições são realizadas, a energia entregue pelo sol pode ser considerada igual, uma vez que os painéis estarão posicionados nas mesmas coordenadas. Igualando a energia entregue pelo sol temos:

$$E_{sd} = E_{sol} \quad (7)$$

$$\frac{E_{fixo}}{\eta_{fixo}} = \frac{E_{móvel}}{\eta_{móvel}}$$

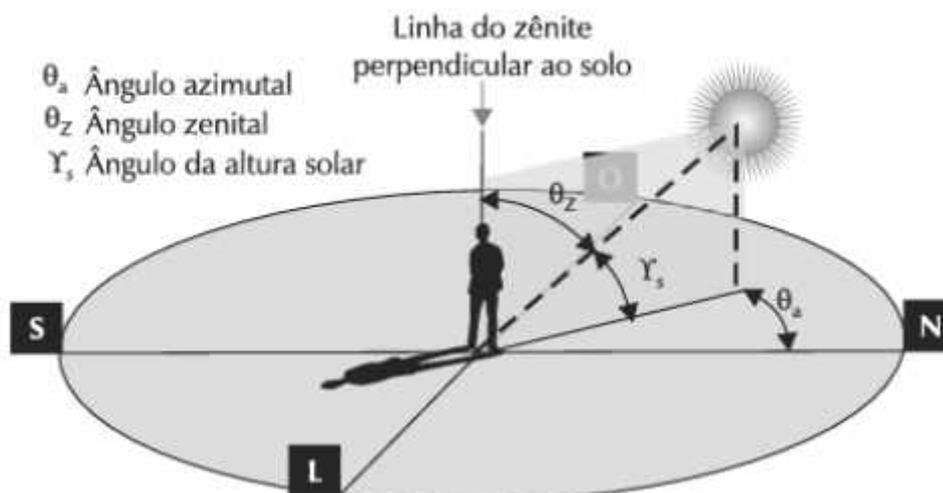
$$\frac{\eta_{móvel}}{\eta_{fixo}} > 1 \quad (8)$$

Dessa forma temos que caso a eficiência do sistema móvel seja superior ao fixo, a divisão de um pelo outro deverá ser maior que um.

2.2 POSICIONAMENTO SOLAR

Os raios solares são ondas eletromagnéticas paralelas entre si que chegam à Terra em linha reta, porém quando atingem a atmosfera terrestre, os raios sofrem um efeito de difusão sendo refletidos e desviados em todas as direções, porém alguns seguem sua trajetória em linha reta. A posição solar em cada coordenada do planeta é definida pelos ângulos azimutal, zenital e da altura solar (Figura 9).

Figura 9: Representação da posição solar em determinada coordenada.



Fonte: (VILLALVA, 2012)

O ângulo azimutal é a orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico, como ilustrado na imagem 8 (VILLALVA, 2012). Assim em diferentes posições geográficas um observador irá ver o sol com diferentes angulações durante o dia.

Por sua vez o ângulo zenital é a orientação dos raios solares verticalmente, orientada em relação à linha do zênite que por sua vez é perpendicular ao solo como também é possível verificar na figura 8.

Por fim o ângulo da altura solar é o ângulo de inclinação da trajetória do sol com o plano horizontal, e depende da localização geográfica do observador e também do ângulo de declinação solar. Os observadores próximos à linha do equador enxergam alturas solares maiores, enquanto os observadores mais próximos dos polos terrestres enxergam alturas menores, mesmo durante o verão (VILLALVA, 2012).

2.3 RASTREAMENTO SOLAR

Um sistema de rastreamento solar tem função de otimizar a posição solar, possibilitando a movimentação dos painéis solares de acordo com o movimento do sol, aumentando a incidência solar capturada pelos painéis solares. Durante o dia, conforme os ângulos solares são alterados, os painéis rotacionam aproveitando o máximo possível do período de incidência solar do nascer ao por do sol.

Estudos realizados pela Forland Tech mostram que um sistema fotovoltaico com tecnologia de seguidor solar é capaz de aumentar de 20-30% da eficiência da energia entregue. Porém o sistema móvel possui um aumento na carga do sistema, uma vez que é necessário alimentar os motores responsáveis pelo movimento das placas e também os aparelhos medidores (RENEWABLEENERGYWORLD, 2011). Tendo em mente esse fato se faz de extrema importância um estudo de viabilidade econômica e técnica da implantação do sistema, tal qual será estudo nesse documento.

2.3.1 Sistema de Eixo único

Um seguidor solar de um eixo é restrito à seguir apenas a direção azimutal, de leste a oeste ou norte a sul, normalmente são configurados com um padrão pré-estabelecido baseado no tempo e na época do ano. Podendo girar em torno de um eixo vertical, de um eixo inclinado ou eixo horizontal (Figura 10). Como esse sistema possui apenas um eixo ele contém apenas um motor o que reduz o consumo de energia.

Figura 10: Representação do grau de movimentação do seguidor solar de um eixo.



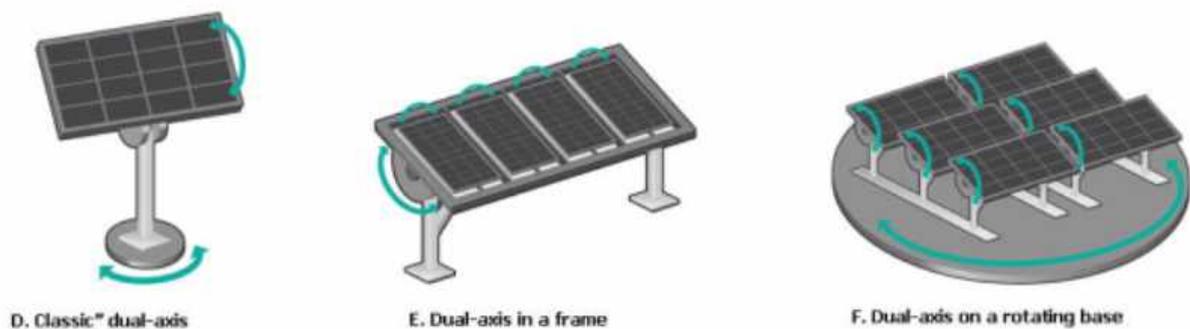
Fonte: (JUDA, 2013)

Conforme ilustrado no tópico de posicionamento solar, em diferentes coordenadas o uso do seguidor solar de apenas um eixo pode apresentar configurações mais eficientes diferentes. O eixo leste oeste por se o movimento com maior variação do sol é o mais usado, porém nos polos onde esta variação diária é menor o mais interessante é utilizar o eixo norte-sul como referência.

2.3.2 Sistema de Eixo duplo

O seguidor solar de eixo duplo permite que o painel acompanhe o movimento do sol em duas direções, a direção azimutal e a direção zenital ou seja eixo leste-oeste e norte-sul. Os seguidores de dois eixos precisam se mover com maior liberdade em suas estruturas, e para tal utilizam dois motores para sua movimentação (Figura 11).

Figura 11: Representação do grau de movimentação do seguidor solar de dois eixos.



Fonte: (JUDA, 2013)

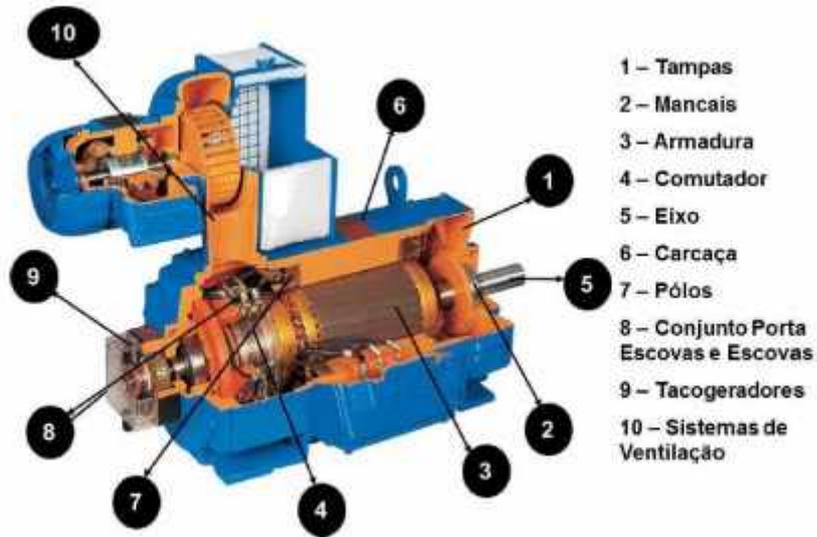
Os seguidores dotados de dois eixos, diferente dos seguidores de um eixo que são configurados com padrões pré estabelecidos, possui um sensor que possui um funcionamento semelhante a um olho, ou seja, é capaz de seguir visualmente o sol. Por isso apesar de possuir um sistema mais complexo, e que drena mais energia devido aos dois motores, é mais eficiente.

2.4 MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Os motores de corrente contínua foram os primeiros motores a serem fabricados o que isso acontece porque nessa altura a distribuição de energia era feita em corrente contínua (CC).

Hoje em dia os principais tipos de motores de corrente contínua são: Motores CC Convencionais (com escovas) e Motores CC Brushless (sem escovas). Na figura 12 está representado um motor de corrente contínua convencional.

Figura 12: Representação do grau de movimentação do seguidor solar de dois eixos.

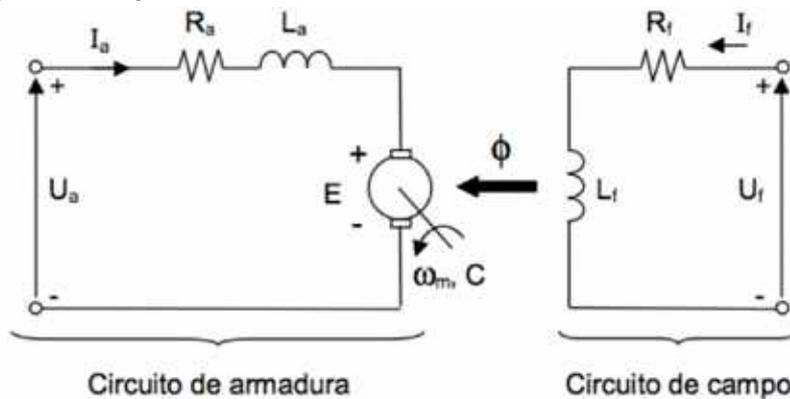


Fonte: (TEIXEIRA, 2014)

O princípio de funcionamento de uma máquina de corrente contínua baseia-se na criação de um campo indutor. Este campo é criado pela passagem de corrente nas bobinas do estator, estando estas envolvidas nas ranhuras estatóricas.

O rotor é do tipo bobinado, cuja passagem de corrente pelos seus enrolamentos cria um campo magnético, cuja intensidade do mesmo depende diretamente do valor da corrente que percorre as espiras (Figura 13).

Figura 13: Representação do cricuito de um motor de corrente contínua.



Fonte (PETRY, 2015)

A interação entre o campo magnético estatórico e o campo magnético rotórico cria

o movimento de rotação do motor. Este tipo de motor apresenta um controle simples de velocidade uma vez que é feito através da tensão de alimentação do mesmo, já que são diretamente proporcionais.

Os motores “Brushless” apresentam os mesmos princípios de funcionamento, sendo que a comutação em vez de ser feita mecanicamente por intermédio de escovas, é feita eletronicamente por aparelhagem de eletrônica de potência (semicondutores). O rotor destes motores é constituído por ímãs permanentes, o que torna o campo magnético contínuo e independente da corrente, levando á ausência do controle deste campo.

As máquinas de corrente contínua convencionais atualmente são menos utilizadas devido à frequente manutenção e ao baixo rendimento que estas apresentam, sendo substituídas pelas máquinas de corrente contínua sem escovas “Brushless DC”.

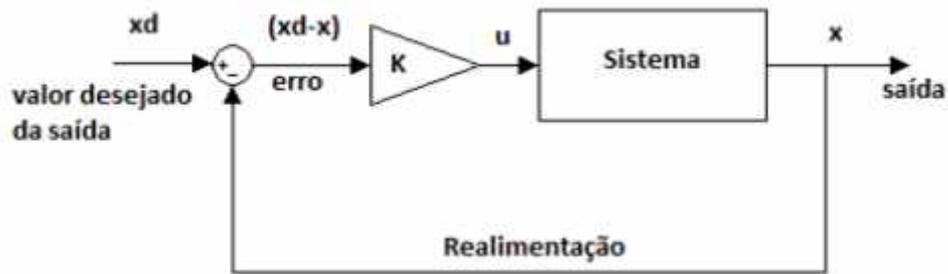
2.5 SISTEMAS DE CONTROLE

Um sistema de controle é uma interconexão de vários componentes resultando numa configuração que fornece um desempenho desejado. A descrição do sistema se refere à relação causal entre a entrada e a saída do sistema, em geral, descrita matematicamente através de equações diferenciais, equações de diferença, funções de transferência, etc (MARUYAMA, 2017).

2.5.1 CONTROLE POR MALHA FECHADA

Diferentemente de um sistema de controle a malha aberta, um sistema de controle a malha fechada utiliza uma medida adicional da saída real para comparar a saída real com a resposta desejada (Figura 14). A medida da saída é chamada de sinal de retroação (DORF;BISHOP, 1998).

Figura 14: Sistema de controle de malha fechada.



Fonte: (MANO, 2017)

O sinal de erro atuante, ou seja, a diferença entre sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas ou integrais), realimenta o controlador, de modo que minimize o erro e acerte a saída do sistema ao valor desejado (OGATA, 2003). Desta forma, o controle por malha fechada é muito utilizado nas leis de controle, garantindo o aumento da precisão do sistema e estabilizando um sistema que pode ser considerado instável em malha aberta.

O controle por malha aberta pode alterar uma dinâmica indesejada por uma dinâmica desejada ao controlador. As medidas de ações de controle em malha aberta são tomadas a partir de mudanças do ambiente, fornecendo uma boa resposta, mas não dependendo da medida atual da resposta. Já no controle por malha fechada a saída é medida (utilizando um sensor, por exemplo) e comparada à entrada e, por meio da realimentação, modifica indiretamente a dinâmica do sistema. (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

2.5.3 ERRO EM REGIME PERMANENTE

Ao se utilizar um sistema de controle, um dos principais objetivos é que a saída de um certo sistema siga o sinal de referência, em regime permanente. A diferença entre o sinal de saída e o sinal de referência é definido como erro em regime permanente (CAMPOS, 2017). Para um sistema em malha fechada, o erro de malha fechada ($E(s)$) é definido como:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1+G(s)} \quad (9)$$

Para um sistema em malha fechada o erro em regime permanente depende da função de transferência em malha aberta e do sinal de referência, sendo o degrau, a rampa e a parábola as entradas mais comuns (CAMPOS, 2017).

Para definir as constantes de erro, deve-se observar o grau dos sinais de referência. Se a entrada é de grau zero, como um degrau ou posição, a constante é chamada de constante de posição e é definida por K_p e o sistema classificado como Tipo 0. Se a entrada é uma função do primeiro grau, como uma rampa ou entrada de velocidade, a constante é chamada de constante de velocidade definida como K_v e o sistema classificado como Tipo 1. Para um sistema Tipo 2 o sinal de entrada é uma parábola unitária e a constante é chamada de constante de velocidade (K_a) (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI,2013).

2.5.3 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE SISTEMAS LINEARES

Pode-se definir a função de transferência de um sistema linear pela relação entre a transformada de Laplace da variável de saída e da variável de entrada, considerando-se todas as condições iniciais iguais a zero. (DORF; BISHOP, 1998)

A função de transferência é determinada apenas para sistemas lineares e estacionários, utilizando a transformada de Laplace. De forma genérica, a função de transferência é definida como apresentado na equação 10:

$$G(s) = \frac{L(saída)}{L(entrada)} \quad (10)$$

Considerando as condições iniciais nulas, pode-se representar a dinâmica de um sistema invariante no tempo em “s”.

Tais informações serão de extrema importância para o desenvolvimento do modelo matemático que se segue, para a posterior simulação e análise.

3. SERVOMOTOR

Um servo motor (FIGURA 15) de corrente contínua(CC) funciona da seguinte maneira, uma tensão contínua de referência é regulada para um valor correspondente à saída desejada. Dependendo do circuito de controle a tensão pode ser gerada usando potenciômetro, modulação por largura de pulso (PWM) ou através de temporizadores (NEDELKOVSKI, 2018).

Figura 15: Representação das grandezas relacionadas ao PWM.



Fonte: (WEG, 2020)

Os Servo motores necessitam de um sinal de realimentação que corresponde ao posicionamento atual do mesmo, sendo obtido através de um sensor de posição. Este sensor de posicionamento é na verdade um potenciômetro interno que fornece um sinal de tensão correspondente ao ângulo do eixo do motor. Este sinal de tensão relacionado à posição atual do motor é comparado com a tensão desejada, ou seja, com a tensão que é obtida pela largura de pulso. Assim produzindo um sinal de erro com tensão positiva ou negativa (MUNDO ELÉTRICA, 2020).

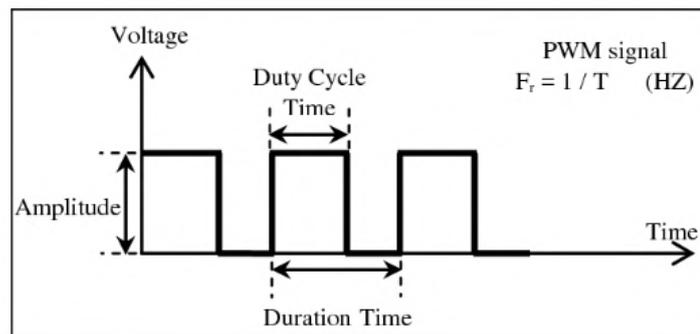
Se o sinal de erro for positivo, a tensão aplicada na armadura do motor faz com que o rotor gire em uma direção. Porém se o erro for negativo, a tensão da armadura sofre uma inversão e neste caso o rotor do motor gira na direção oposta. Enquanto houver o sinal de erro o motor permanecerá girando, ou seja, o motor vai girar até o sinal de erro ser zero (MUNDO ELÉTRICA, 2020).

3.1 PWM (Pulse-Width Modulation)

O PWM é um sistema que funciona modulando o sinal entregue a carga, através de um ciclo ativo de uma onda quadrada. Portanto uma fonte de tensão com PWM entrega à carga , uma série de pulsos controladas que podem ser variadas.

O ciclo ativo(*duty cycle*) é o período de tempo que o sistema fornece tensão a carga com determinada amplitude, em relação ao tempo de duração, como pode ser visto na figura 12. A duração do tempo ligado é chamada “largura de pulso”, já o tempo decorrido entre duas rampas de subida em dois pulsos adjacentes é chamado de período, comumente simbolizada pela letra maiúscula T também apresentada na figura 12 (REIS, 2017).

Figura 16: Representação das grandezas relacionadas ao PWM.

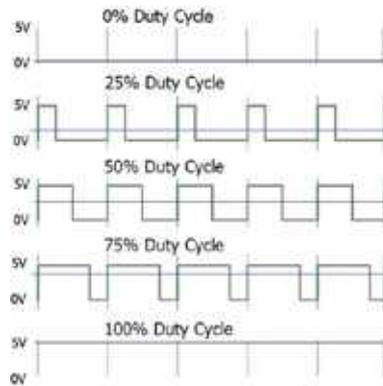


Fonte: (ELMAHALAWY, 2013)

É importante ressaltar que o *duty cycle* pode ser representado por porcentagens, estas representam o percentual de tensão entregue ao sistema. Na figura 17, está um exemplo onde a fonte geradora é capaz de gerar 5V, note que:

- Com um *duty cycle* de 0% a tensão elétrica também é zero volts.
- Com um *duty cycle* de 100% a tensão elétrica atinge seu valor máximo de 5V.
- *Duty cycles* intermediários entre 0 e 100% permitem obter valores intermediários de tensão elétrica que podem variar de 0 a 100%.

Figura 17: Duty Cycle de uma fonte geradora de tensão de 5V.



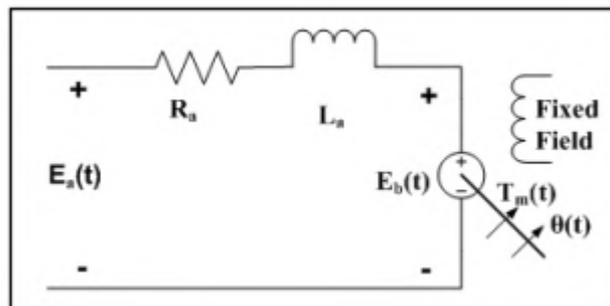
Fonte: (RAJ, 2018)

3.2 Modelo matemático do servomotor

O modelo matemático é um modelo criado para que seja possível simular algumas características de um problema real. Existem várias maneiras de se obter um modelo matemático, uma delas é a modelagem caixa preta, que será utilizada nesse documento, uma vez que se utilizam pouco ou nenhum conhecimento sobre o sistema a ser descrito esta maneira é conhecida como modelagem caixa preta. Um modelo matemático para um determinado sistema não é único e dependendo da perspectiva que se consiste, é escolhida a forma que o sistema deve ser modelado,(OGATA, 2010).

Na figura 18, está representado o circuito do motor de passo que será simulado, o mesmo possui uma ligação shunt ou seja, o conjunto das bobinas de campo fica em paralelo com o enrolamento da armadura.

Figura 18: Representação do circuito do servomotor.



Fonte: (JASIM, 2018)

Onde:

- $E_a(t)$ é a tensão na armadura.
- R_a representa a resistência da armadura.
- L_a representa os enrolamentos da armadura.
- $E_b(t)$ é a tensão fornecida pela fonte geradora de ondas quadradas.
- $T_m(t)$ é o torque ou conjugado aplicado ao eixo do motor.
- $\theta(t)$ é o deslocamento angular do eixo do motor.

Aplicando a Lei das Malhas ou Lei de Kirchhoff, no circuito da armadura do motor obtém-se as seguintes equações:

$$V = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E \quad (11)$$

Onde E é a força eletromotriz induzida no eixo do motor, há uma relação eletromecânica estabelecida para um motor que possibilita a obtenção de uma equação que relacione a parte elétrica e mecânica do sistema do motor (SANTOS, 2017), que é dada pelas seguintes equações:

$$T = K i_a \quad (12)$$

$$E = K_b \omega \quad (13)$$

Porém é sabido que a velocidade angular (ω) pode ser escrita como:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (14)$$

Portanto é possível reescrever a equação 13, conforme apresentado na equação 15:

$$E = K_b \frac{d\theta}{dt} \quad (15)$$

Contudo a equação do torque do motor também pode ser escrita em função do coeficiente de inércia (J) e do coeficiente de fricção (B) segundo a equação 16:

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} \quad (16)$$

Aplicando a transformada de Laplace nas equações 11, 12, 15 e 16 temos:

$$\begin{aligned} V(s) &= R I_a(s) + L s I_a(s) + E(s) \\ V(s) - E(s) &= I_a(s) [R + sL] \end{aligned} \quad (17)$$

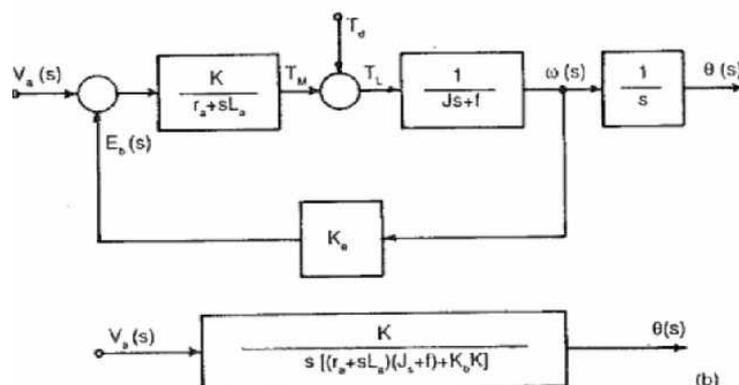
$$E = K_b s \theta \quad (18)$$

$$T(s) = K I_a(s) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} T(s) &= s^2 J \theta(s) + B s \theta(s) \\ T(s) &= s \theta(s) [sJ + B] \end{aligned} \quad (20)$$

Com as equações representadas no domínio da frequência é possível determinar a função de transferência do servomotor (Figura 19).

Figura 19: Função de transferência do servomotor



Fonte: (Durgaprasad, 2020)

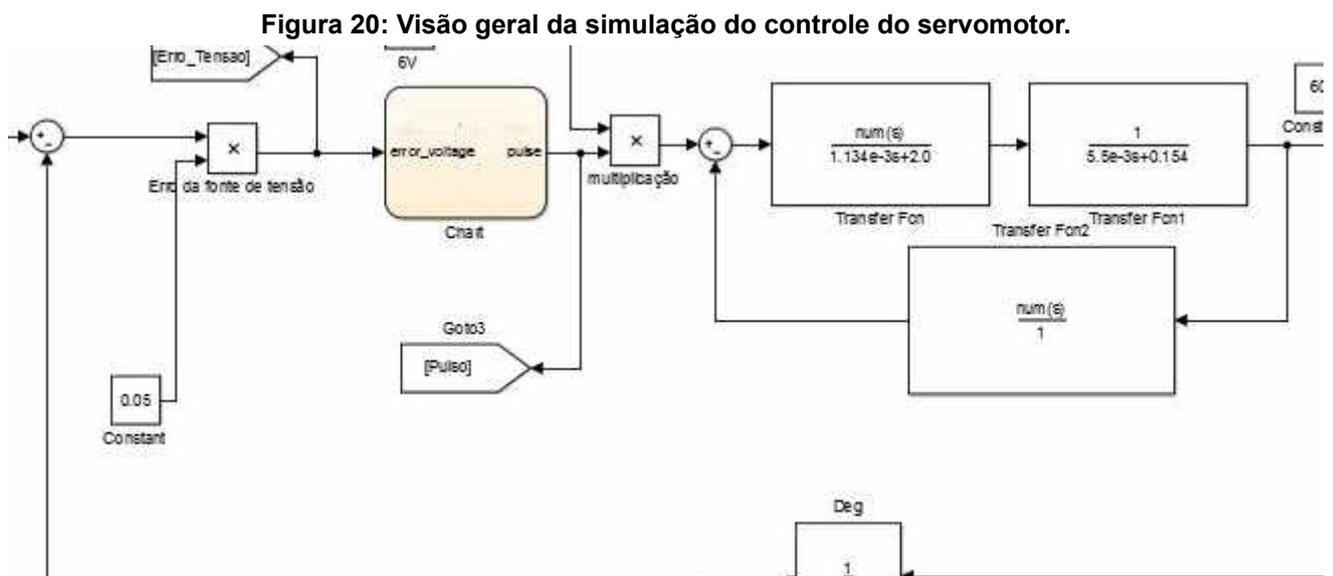
O servomotor utilizado neste documento é o modelo MG995 R, e as informações para cálculo e simulação a ser feita no próximo capítulo da função de transferência são fornecidas pelo fabricante:

- $K_b=0,453$
- $K_t=0,431$
- $J=5,5 \times 10^{(-3)}$
- $B=5,88$
- $R=2 \Omega$
- $L=1,134 \text{ mH}$

4 MODELAGEM DO SERVOMOTOR NO MATLAB-SIMULINK®

A seguir são apresentadas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do projeto, como funcionam e como foram utilizadas, além do projeto final, levando-se em consideração que o projeto foi desenvolvido para versões 2016 ou mais novas do software, sendo o que é descrito a seguir válido apenas para elas e para as mais antigas pode ser necessário alguns ajuste, ou mesmo em versões mais antigas, pode ser que seja impossível a aplicação do modelo proposto.

Este capítulo será dividido em três partes, uma explicação dos fatores de entrada, a função de transferência e os parâmetros de saída do circuito como pode ser visto na visão geral do projeto na imagem 20.



Fonte: (AUTORA, 2020)

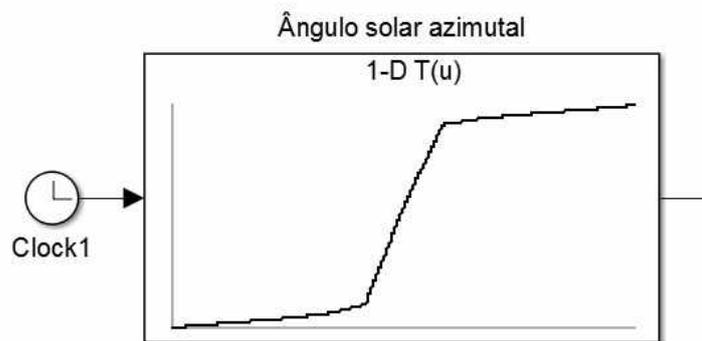
4.1 PARÂMETROS DE ENTRADA

Neste primeiro momento será apresentado os parâmetros de entrada do sistema ou seja, a posição solar da coordenada escolhida além do sistema PWM responsável por realizar a variação de tensão que irá alimentar o servomotor.

4.1.1 POSIÇÃO SOLAR

Para inserir no software os dados de posição solar, utilizou-se um bloco chamado n-D Lookup Table(Figura 21), esse bloco é capaz de buscar uma referência de linhas, colunas e páginas para compor uma tabela que o software é capaz de simular.

Figura 21: Bloco n-D Lookup Table.



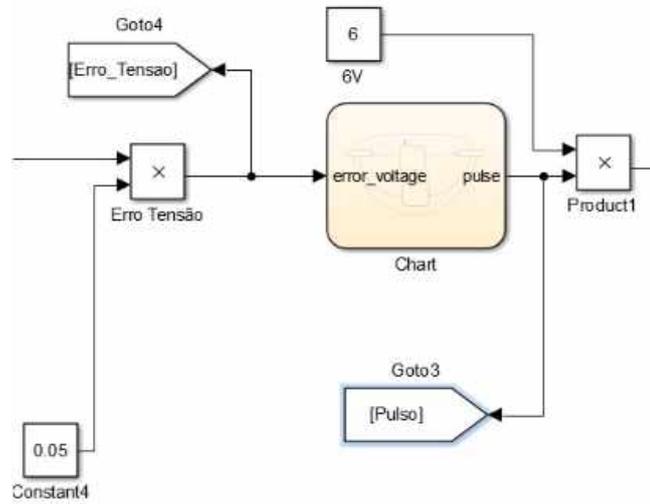
Fonte: (AUTORA, 2020)

No caso do projeto utilizou-se o software Excel para criar a tabela de referência, com duas colunas: ângulo azimutal e posição solar uma vez que espera-se que o painel se movimente seguindo o ângulo azimutal acima proposto.

4.1.2 PWM E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE LÓGICO DE MÁQUINA DE ESTADOS FINITOS

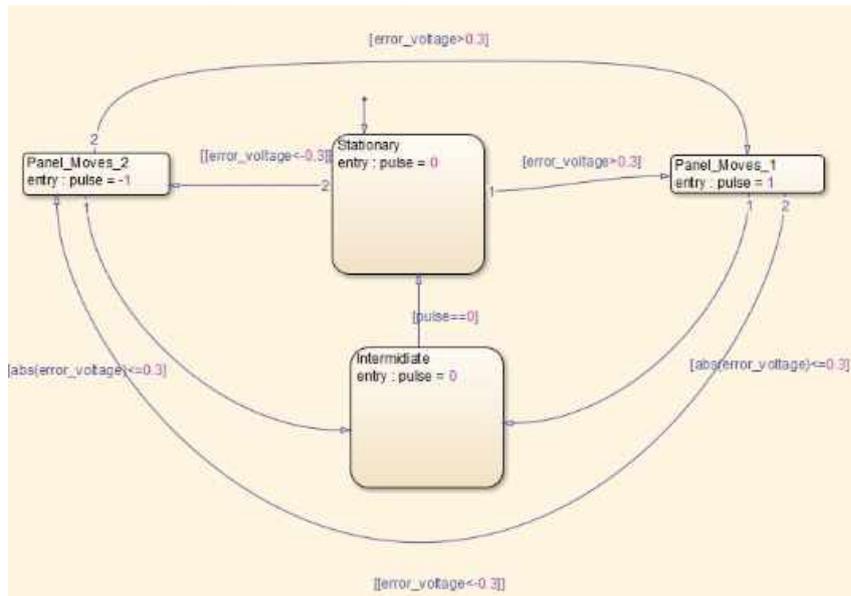
Simulou-se um erro de constante (Figura 22) de 0,05 multiplicado pela posição solar para criar os dados de entrada para o bloco chart (controle lógico de máquina de estados finitos) representados na figura 23.

Figura 22: Representação do erro e o controle lógico de de máquina de estados finitos sistema simulado.



Fonte: (AUTORA, 2020)

Figura 23: Controle lógico de de máquina de estados finitos sistema simulado.



(AUTORA, 2020)

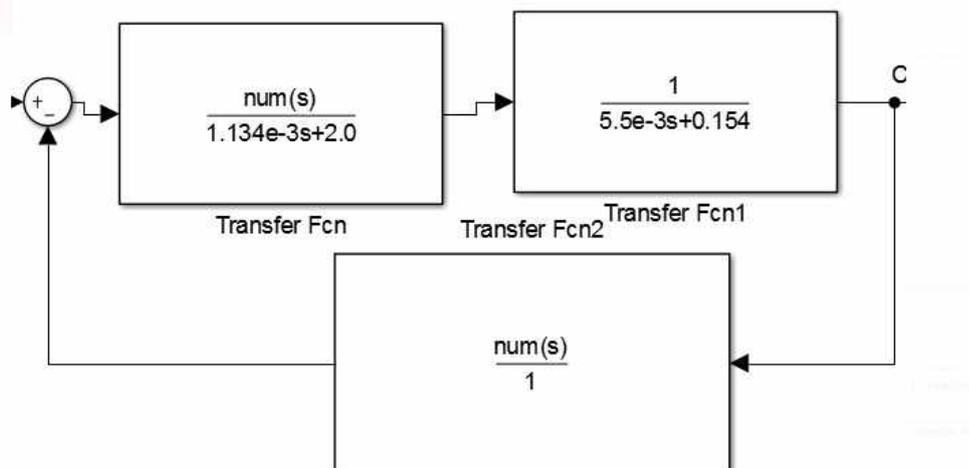
As máquinas de estados são máquinas abstratas que capturam as partes essenciais de algumas máquinas concretas, no caso deste documento a máquina será um microcontrolador. O diagrama de estado criado para o projeto está representado na figura 23. A máquina utiliza um parâmetro de comparação de 0,03 e o erro de tensão é comparado a essa referência, esta tensão é aplicada à armadura do motor se o erro for maior que a referência, maior a tensão aplicada à armadura do motor lembrando que a tensão aplicada é de 6V conforme representado na figura 22. O motor gira em

uma das direções anti horária ou horária enquanto o erro for positivo ou negativo e o motor estaciona quando o erro for zero.

4.1.3 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

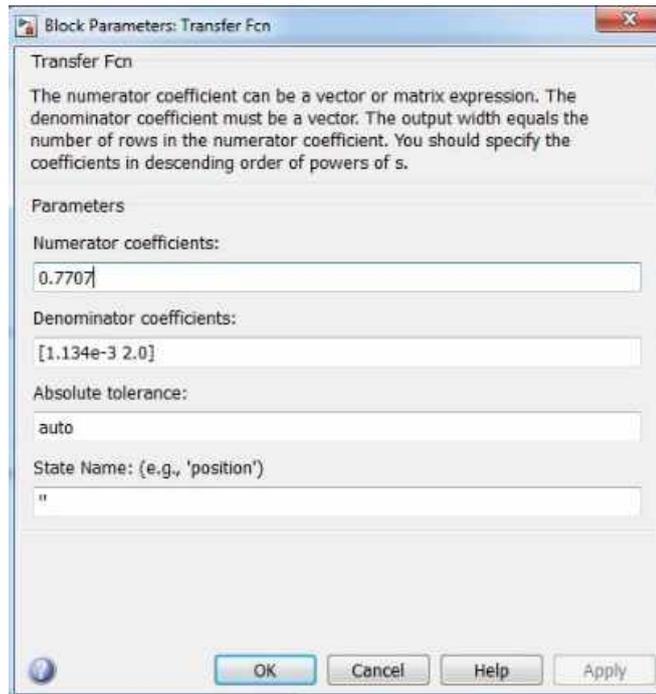
Na figura 24 está representada a função de transferência do servomotor, previamente apresentada no capítulo 2 deste documento. Os parâmetros também foram previamente apresentados e as configurações do blocos está representada respectivamente nas figuras 26, 27 e 28.

Figura 24: Controle lógico de máquina de estados finitos sistema simulado



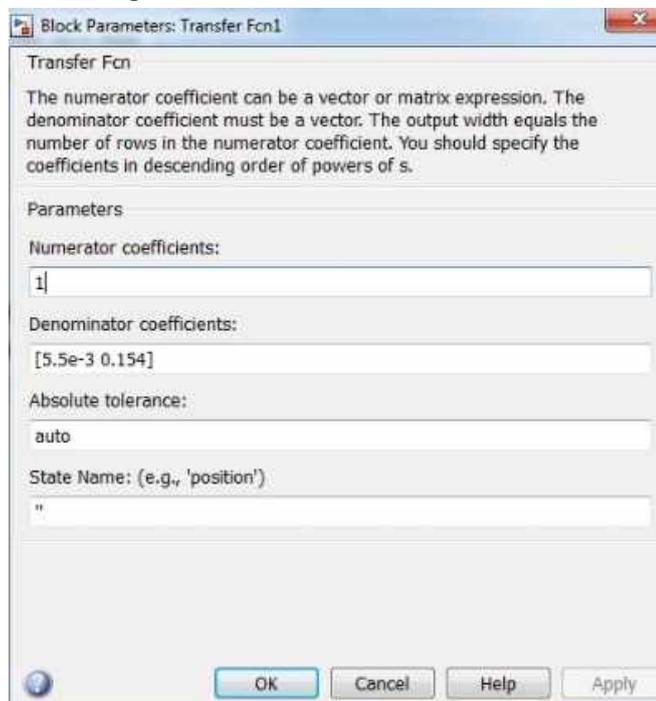
Fonte: (AUTORA, 2020)

Figura 25: Função de transferência 1.



Fonte: (AUTORA, 2020)

Figura 26: Função de transferência 2.



Fonte: (AUTORA, 2020)

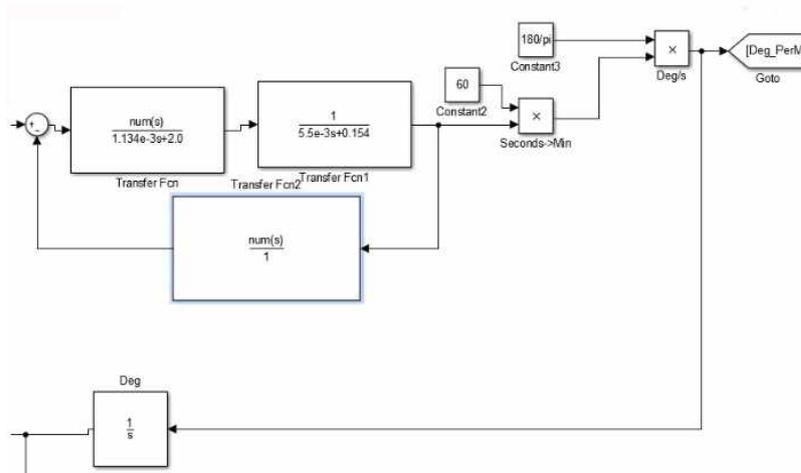
Figura 27: Função de transferência 3.



Fonte: (AUTORA, 2020)

Durante a simulação notou-se a necessidade de aplicar a frequência de 60hz no sistema, além disso como foi apresentado anteriormente o servomotor utilizado possui uma limitação de 180 graus, que também está representado na figura 28. Na mesma figura é representado o sistema realimentado.

Figura 28: Função de transferência, parâmetros constantes e degrau de realimentação do sistema.



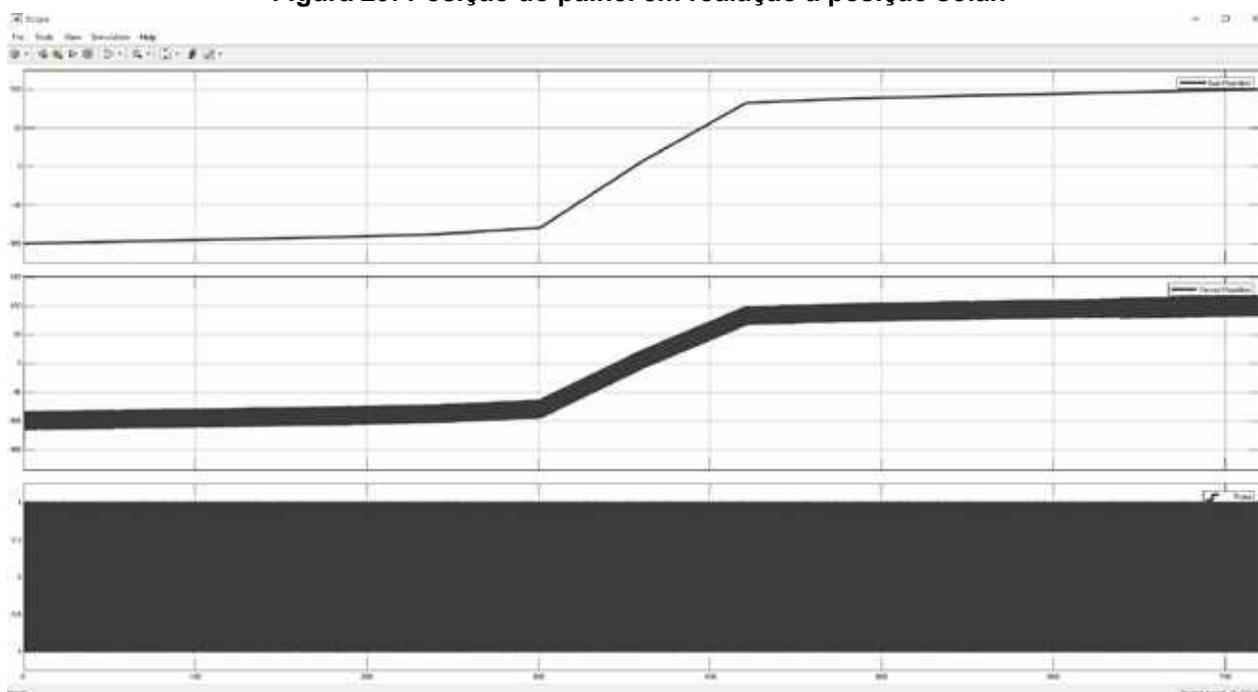
Fonte: (AUTORA, 2020)

4.1.5 PARÂMETROS DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO

A simulação considera um step de 721.000, e simula a incidência solar durante 24 horas.

Conforme esperado, podemos ver a máquina de estado finito está funcionando corretamente, uma vez que na figura 28, fruta da simulação, o painel está posicionado de acordo com a posição solar na coordenada simulada.

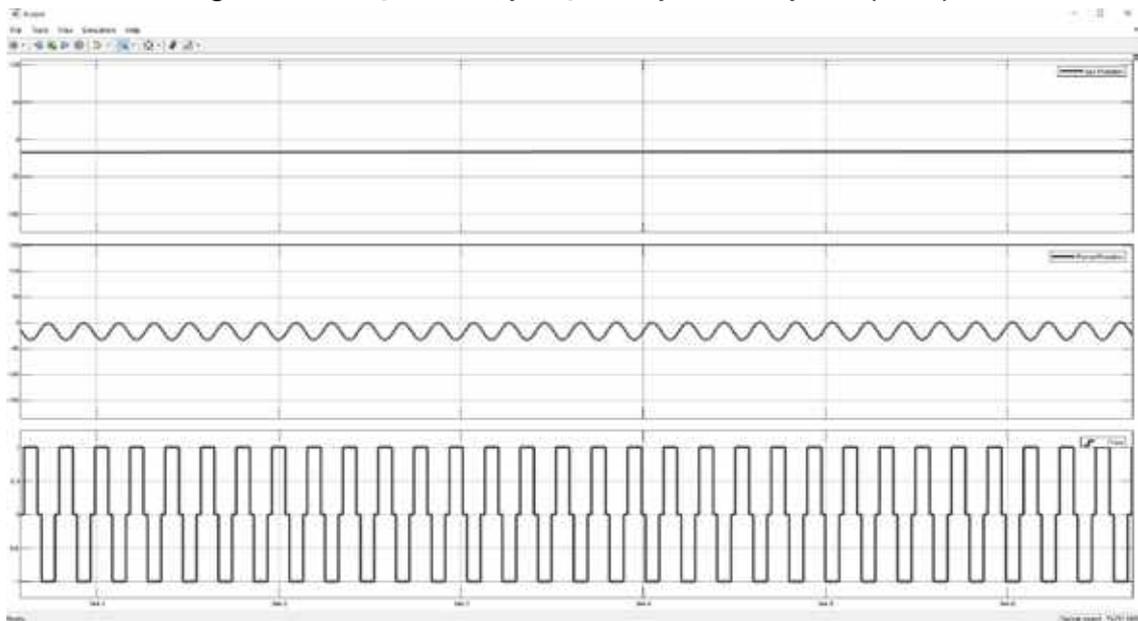
Figura 29: Posição do painel em relação a posição solar.



Fonte: (AUTORA, 2020)

Quando aplicado um zoom na simulação (Figura 30), é possível visualizar respectivamente, a posição solar, a posição do painel e o pulso (PWM).

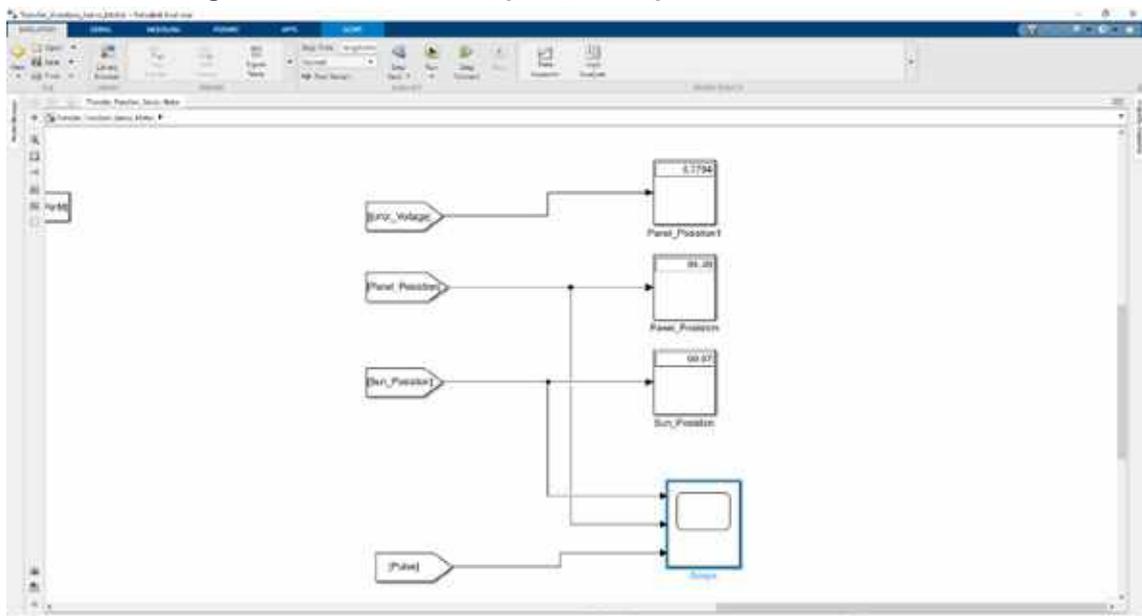
Figura 30: Posição solar, posição do painel e o pulso (PWM).



Fonte: (AUTORA, 2020)

A figura 31 apresenta, um dos valores medidos na simulação em que é possível analisar a posição solar, do painel considerando o erro simulado.

Figura 31: Posição solar, posição do painel e o erro simulado.



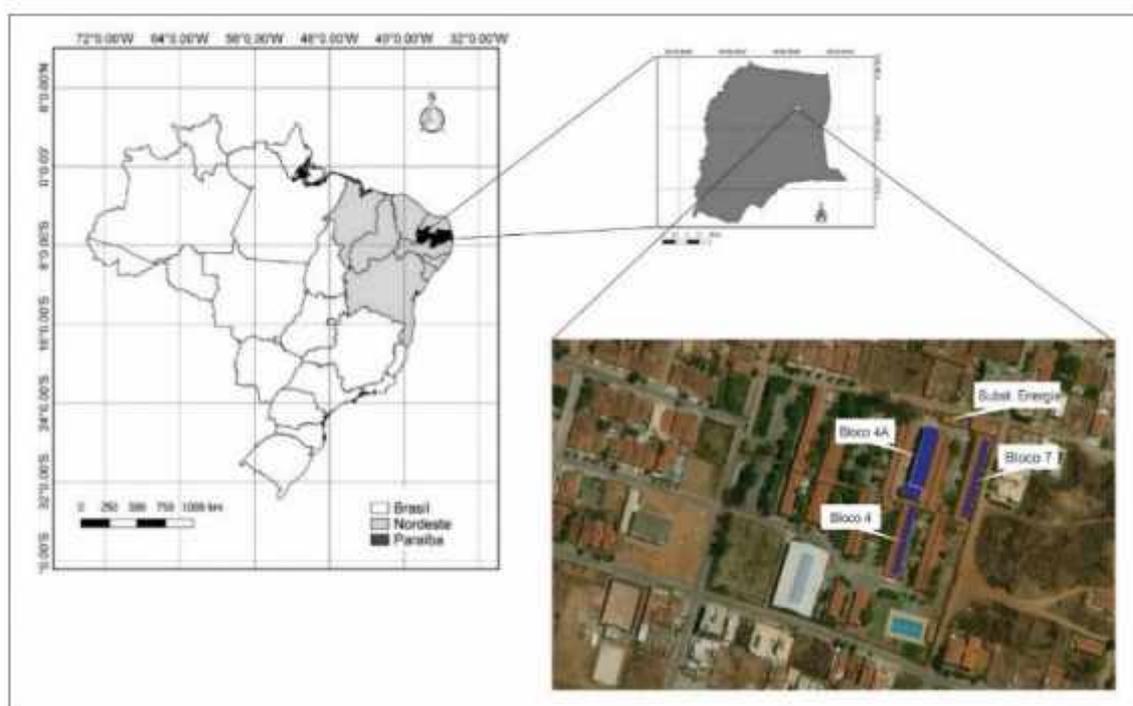
Fonte: (AUTORA, 2020)

No próximo capítulo, será discorrido a viabilidade de implementação do sistema solar móvel, a luz da geração de ambos sistemas.

5. Análise de um estudo de caso comparativo de um sistema fotovoltaico em modo fixo e com seguidor.

Em um estudo realizado por Nóbrega et al. (2019) publicado na revista de divulgação científica Principia, os autores apresentam um estudo de caso utilizando o software de simulação System Advisor Model (SAM – versão 2017.9.5) em uma instituição de ensino pública IFPB, localizada no Sertão do estado da Paraíba (Brasil) para avaliar a viabilidade de instalação de um sistema solar móvel.

Figura 32: Instalação do sistema solar na região da Paraíba.



Fonte: Nóbrega et al. ,2019.

Antes de realizar a estimativa de produção de energia, o recurso solar disponível foi analisado a fim de averiguar o potencial de instalação de sistemas fotovoltaicos no local do estudo. A determinação da quantidade de irradiação solar incidente na superfície horizontal foi obtida a partir dos dados sobre o clima local do banco de dados do National Solar Radiation Database (NSRDB), disponibilizados pelo NREL no SAM (NÓBREGA ET AL. 2019).

Para a área disponível no IFPB Campus Cajazeiras, um sistema fotovoltaico fixo

foi dimensionado com capacidade de 103 kWp de potência, ocupando uma área de 614 m² com 323 módulos e 4 inversores. O ângulo de inclinação utilizado foi de 10° e o azimute, 106°, escolhidos a partir de medidas obtidas dos telhados da instituição em estudo, visto que colocar o sistema posicionado para o norte verdadeiro (azimute 0°) e a inclinação igual à latitude – o que é indicado na literatura como posição ideal – necessitaria de uma estrutura mais robusta, o que acarretaria custos adicionais ao sistema (KALOGIROU, 2013).

Os componentes utilizados nos dois sistemas foram módulos multicristalino com 315 Wp de potência e 16,5% de eficiência, conectados a quatro inversores Sun Power SPR-24000. O módulo multicristalino foi escolhido por ser um dos mais utilizados no Brasil (GREENER, 2018).

Com base nos dados disponibilizados no National Solar Radiation Database (NSRDB), os valores médios de irradiação global horizontal para a cidade de Cajazeiras são de 6,65 kWh/m².dia. Os maiores níveis de irradiação ocorrem durante os meses de agosto a novembro e os menores, entre abril e julho (Figura 2 na próxima página). Quanto às demais características climáticas, a região tem clima semiárido, quente e seco, sendo definido em duas estações, seca e chuvosa. A cidade apresenta baixa nebulosidade, forte insolação e temperatura média diária de 27,08°C, que, no entanto, pode variar entre 21°C e 41°C (NÓBREGA ET AL. 2019).

O valor médio mensal no campus foi 36.400 kWh, o máximo de 43.680 kWh e os mínimos de 17.280 kWh e 29.920 kWh, nos respectivos meses de janeiro e julho.

Os valores estimados da produção anual de energia elétrica para o sistema fixo com inclinação de 10° para o sistema com seguidor são, respectivamente de 182.344,90 kWh e 240.265,50 kWh (Figura 27), que significariam uma redução de 41,7% e 55% do consumo de energia elétrica, respectivamente. A diferença na produção indicou que o sistema com seguidor solar produz 32% a mais que o fixo (Figura 27).

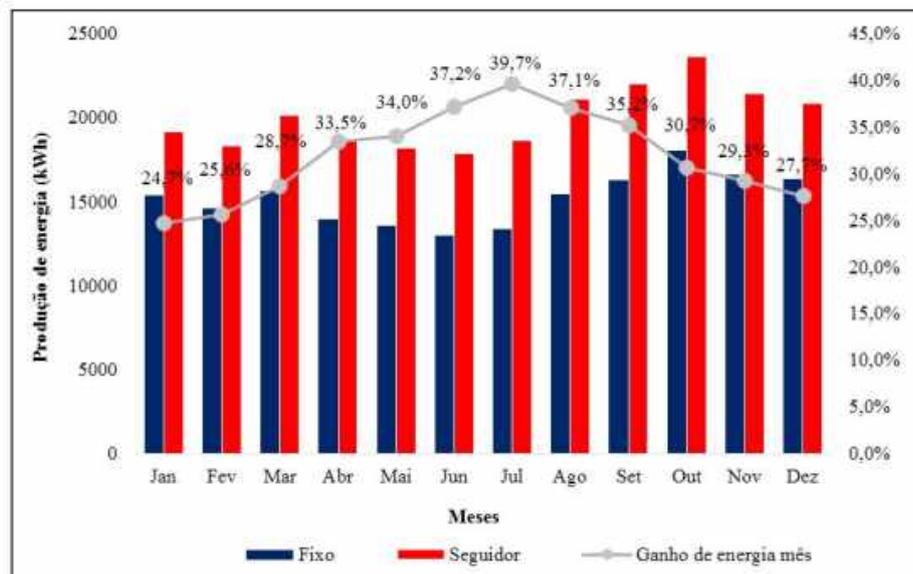
Figura 33: Comparação da energia gerada pelo sistema fixo e o sistema móvel.



Fonte: Adaptado de Nóbrega et al. ,2019.

Observou-se então que no ponto de vista de geração e eficiência é superior ao sistema fixo, como pode ser visto na figura X durante os meses de junho e julho ocorrem os ganhos mais consideráveis com a instalação do seguidor solar: 37,2% e 39,7%, respectivamente (NÓBREGA ET AL. 2019).

Figura 34: Comparação da energia gerada ao longo do ano.



Fonte: Nóbrega et al. ,2019.

6 CONCLUSÃO

Como exposto no capítulo 1 a intenção deste trabalho, foi estudar o funcionamento e modelagem matemática de um servomotor e também a simulação do mesmo utilizando o Simulink. Para tal estudou-se a função de transferência do servomotor, para então determinar a mesma, para o motor escolhido. Encontrou-se algumas dificuldades para levantar todos os dados do motor já que nem todo catálogo possui todas as informações necessárias, logo foi necessário investigar a fundo qual motor seria estudado e posteriormente simulado.

Em seguida utilizando a ferramenta Simulink e blocos disponíveis na plataforma, aplicou-se a função de transferência previamente levantada e também os parâmetros construtivos do motor. Inicialmente existiu uma dificuldade para inserir na ferramenta a posição solar, porém utilizando vetores tornou-se fácil aplicar os dados para simulação. Munido de todos os dados necessários a docente realizou a simulação mostrando que com um sistema simples e didático é possível observar o aumento da eficiência do painel.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado não foca na análise de viabilidade financeira para um trabalho futuro sugere-se um estudo de caso na Universidade Feral de Uberlândia no bloco 1E, considerando a implementação de um sistema fotovoltaico. Para tal construir um protótipo de um sistema móvel com um eixo e com dois eixos, utilizando sistema próprio construído utilizando linguagens de programação para controlar o servomotor, e então levantar na prática as medições do sistema fixo e dos sistemas móveis.

Munido de tais dados, realizar um estudo financeiro detalhado para determinar além da viabilidade técnica, a viabilidade financeira dos sistemas móveis.

REFERÊNCIAS

AID. **Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída**. ANEEL, 11 de jun. De 2019.. Disponível em: < https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877>. Acesso em: 21 de set. de 2020.

COMO FUNCIONA O MEDIDOR BIDIRECIONAL DA ENERGIA SOLAR. **Solis Energia**, 2019. Disponível em <<https://solisenergia.com.br/como-funciona-o-medidor-bidirecional-da-energia-solar/>>. Acesso em: 22 de set. De 2020.

CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 17., Palmas. **COMPARATIVO DE DESEMPENHO TÉCNICO-ECONÔMICO ENTRE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICO FIXO E UM SISTEMA COM SEGUIDOR DE UM EIXO HORIZONTAL**. Palmas: CONTEC, 2019.

JUDA, CHUCK. **Pepperl+Fuchs**, 18 de jan. de 2013. Disponível em < <https://tecnoblog.net/247956/referencia-site-abnt-artigos/>>. Acesso em: 24 de set. De 2020.

M.H. Jasim; **Tuning of a PID Controller by Bacterial Foraging Algorithm for Position Control of DC Servo Motor**. Engineering and Technology Journal, Vol. 36, PartA, No. 3, pp. 287-294, 2018. Acesso em: https://www.researchgate.net/publication/327833067_Control_of_DC_Servo_Motor . Acesso em: 01 de dez. de 2020.

MARUYAMA, NEWTON. **Introdução os sistemas de controle**. Apostila do Curso de Engenharia da automação da EPUSP, 2017.

MATRIZ ENERGÉTICA E ELÉTRICA. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 21 de set. de 2020.

Mohamed, M; A ,Elmahalawy. **Developing The Pulse Width Modulation Tool (PWMT) for Two Timer Mechanism Technique in Microcontrollers**. Computer Eng. and science Department, Faculty of Electronic Eng., Menofia University, Menofia, v.36, n.2, p. 35-45, maio/Agosto. 2014.

NÓBREGA, B. ET AL. **Comparação entre sistemas fotovoltaicos em modo fixo e com seguidor em uma instituição pública de ensino no Nordeste do Brasil.** Revista Princípia, João Pessoa, 2019.

O QUE É SERVO MOTOR E COMO FUNCIONA?. **Mundo da Elétrica**, 2019. Disponível em <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-servo-motor-e-como-funciona/>>. Acesso em: 29 de nov. De 2020.

RAJ, ASWINTH. **Circuit Digest**, 19 de Sep. de 2018, disponível em <<https://circuitdigest.com/tutorial/what-is-pwm-pulse-width-modulation>> . Acesso em: 23 de nov de 2020.

S. AZIZ, S. HASSAN. **Improving the Efficiency of a Solar Panel Tracking System.** Procedia Manufacturing, 2017.

SANCHES, ESTANISLAU ANTONIO. (engenheiro cartógrafo) **Leituras angulares e distâncias indiretas.** Apostila do Curso de Engenharia Cartográfica da UFAM, 2019.

SANKARSHAN, DURGAPRASAD. **Single Axis Solar Tracker Simulation**, 19 de set. De 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/80572-single-axis-solar-tracker-simulation>>. Acessado em: 29 de nov. de 2020.

SILVA, MARTA CRISTINA DA COSTA. **Aplicabilidade e diferenças entre conversores e inversores de frequência em plantas industriais com controle de velocidade.** Centro federal de educação tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SILVA, MARTA CRISTINA DA COSTA. **Estudo Comparativo de um Painel Solar Fotovoltaico Fixo vs Móvel.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Minho, Gualtar, 2012.

TIGRE, ANTÔNIO ABINEVALDO DOS SANTOS. **Introdução à Energia Solar (Heliotérmica e Fotovoltaica).** Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Universitário Estácio de São Paulo, São Paulo, 2020.

TREVELIN, FELIPE CAMARGO. **Estudo comparativo entre o métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos.** Trabalho de Conclusão

de Curso – Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

VILLALVA, MARCELO GRADELLA. **Energia Solar Fotovoltáica**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.

WHAT IS A SOLAR TRACKER. **Renewable Energy World**, Orlando, 30 de jan. de 2020. Disponível em < <https://www.renewableenergyworld.com/2011/11/21/what-is-a-solar-tracker/>>. Acesso em: 22 de set. De 2020.