



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO – CECAU



RAFAEL BATISTA ANDRADE

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE UM
SISTEMA HIDRÁULICO PARA CONTROLAR A POSIÇÃO
DE UM CONJUNTO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Ouro Preto, 2021

RAFAEL BATISTA ANDRADE

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE UM
SISTEMA HIDRÁULICO PARA CONTROLAR A POSIÇÃO
DE UM CONJUNTO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Ronilson Rocha, Dr.

Co-orientador: Prof. João Carlos Vilela de Castro, Dr.

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Abril/2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A553e Andrade, Rafael Batista .

Estudo de viabilidade de utilização de um sistema hidráulico para controlar a posição de um conjunto de placas fotovoltaicas. [manuscrito] / Rafael Batista Andrade. - 2021.

64 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Ronilson Rocha.

Coorientador: Prof. Dr. João Carlos Vilela.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Painéis fotovoltaicos. 2. Rastreamento automático. 3. Sistemas hidráulicos. 4. Energia sustentável. 5. Geração de energia fotovoltaica. I. Rocha, Ronilson. II. Vilela, João Carlos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rafael Batista Andrade

Estudo de Viabilidade de Utilização de um Sistema Hidráulico para Controlar a Posição de um Conjunto de Placas Fotovoltaicas

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovada em 12 de Abril de 2021

Membros da banca

Prof. DSc. Ronilson Rocha - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. MSc. João Carlos Vilela de Castro - Co-orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. DSc. Wolmar Araújo Neto (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. MSc. Caio César de Souza Pereira (Universidade Federal de Ouro Preto)

João Carlos Vilela de Castro, co-orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/04/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Joao Carlos Vilela de Castro**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/04/2021, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0159300** e o código CRC **CC5471EC**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Ronilson e João Carlos pela paciência e disponibilidade de ensinar, ao longo da graduação e em cada uma das fases deste trabalho, ao professor Caio do departamento de Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos de Hidráulica Industrial, dentro e fora da sala de aula, e ao meu amigo, grande empreendedor e colega de classe Jader Miranda, por todo o suporte e disponibilidade de compartilhar seu conhecimento com relação aos sistemas fotovoltaicos.

Agradeço também as demais pessoas que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

RESUMO

O tema sustentabilidade ganha cada vez mais visibilidade em todo o mundo, a necessidade de se produzir energia limpa e em constante equilíbrio com o meio ambiente se faz presente nas indústrias, universidades e municípios. Porém, o atual cenário energético do mundo todo não produz, em sua maioria, energia de forma limpa e sustentável, nem com o constante crescimento e avanço da tecnologia tal prática se faz viável, economicamente. Esse projeto tem como objetivo, estudar a viabilidade de utilização de um sistema hidráulico para controlar a posição de um conjunto de placas fotovoltaicas, com o intuito de aumentar a eficiência na conversão de energia solar em elétrica, utilizando técnicas e sistemas de rastreamento automático da posição do sol já existentes, além de comparar qualitativamente o preço, facilidade de programação e instalação dos componentes e outros fatores do sistema em questão com outros tipos de sistemas já estudados. Para tal, foram utilizadas uma vasta gama de conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso, como técnicas de seguidor do ponto de máxima potência e controladores lógicos programáveis, além do dimensionamento de dois sistemas de diferentes portes que funcionam de duas maneiras distintas, para atestar a viabilidade de utilização do sistema hidráulico. Os resultados foram, em sua maioria, positivos, revelando que um seguidor automático do sol funcionando de maneira intermitente é um possível e promissor gerador de energia limpa e sustentável, em média ou larga escala.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico. Sistema de rastreamento automático do sol. Sistemas hidráulicos. Energia sustentável.

ABSTRACT

The sustainability theme is gaining more and more visibility worldwide, the need to produce clean energy and in constant balance with the environment is present in industries, universities and cities. However, the current energy scenario in the world does not produce, in its majority, energy in a clean and sustainable way, nor with the constant growth and advancement of technology, this practice becomes economically viable. This project aims to study the feasibility of using a hydraulic system to control the position of a set of photovoltaic panels, in order to increase efficiency in the conversion of solar energy into electricity, using techniques and systems of automatic tracking sun position that already exist, in addition to qualitatively comparing the price, ease of programming and installation of the components and other factors of the system in question with other types of systems already studied. To this, a wide range of theoretical knowledge acquired throughout the course was used, such as maximum power point tracking techniques and programmable logic controllers, in addition to the design of two systems of different sizes that work in two different ways, to attest to the feasibility of using the hydraulic system. The results were mostly positive, revealing that an automatic sun tracking system operating intermittently is a possible and promising generator of clean and sustainable energy, on a medium or large scale.

Key-words: Photovoltaic panel. Automatic sun tracking system. Hydraulic systems. Sustainable energy.

LISTA DE SIGLAS

- EPE – Empresa de Pesquisa Energética do Governo Federal
- MPPT – *Maximum Power Point Tracking* (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
- CLP – Controlador Lógico Programável
- PWM – *Pulse-width modulation* (Modulação por Largura de Pulso)
- TFSC – *Thin-filme Solar Cell* (Célula Solar de Filme Fino)
- DGS – *Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie* (Sociedade Alemã de Energia Solar)
- MPP – *Maximum Power Point* (Ponto de Máxima Potência)
- MOSFET – *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor* (Transistor de Efeito de Campo de Óxido de Metal Semicondutor)
- PV – *Photovoltaic* (Fotovoltaico)
- HSP – Horas de Sol Pico
- CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. de Brito
- MEA – *More Electric Aircraft* (Aeronave Mais Elétrica)
- CC – Corrente Contínua
- CA – Corrente Alternada
- CI – Circuito Integrado
- EEPROM – *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory* (Memória somente leitura programável e apagável eletricamente)
- DAC – *Digital to Analogic Converter* (Conversor de Digital para Analógico)
- ADC – *Analogic to Digital Converter* (Conversor de Analógico para Digital)
- $\mu C/OS$ – *Micro-Controller Operating Systems* (Sistemas operacionais de microcontroladores)
- P&O – Técnica Perturbe & Observe
- CV – Cavalo-vapor

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz elétrica global de 2016.	17
Figura 2: Matriz elétrica brasileira de 2017.....	17
Figura 3: Comparação de produção de energia renovável e não renovável no ano de 2016....	18
Figura 4: Junção P-N.....	21
Figura 5: Célula fotovoltaica.	21
Figura 6: Painel solar de silício monocristalino.	22
Figura 7: Painel solar de silício policristalino.	23
Figura 8: Painel solar de silício amorfo (a-Si).....	23
Figura 9: Painel solar de Telureto de cádmio (CdTe).	24
Figura 10: Painel solar de seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS).	25
Figura 11: Célula fotovoltaica orgânica (OPV).....	25
Figura 12: Painel solar híbrido.	26
Figura 13: Diagrama esquemático de iluminação e regulação da temperatura de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.....	29
Figura 14: (a) variação da potência e tensão de acordo com a variação da temperatura, para: 28°C, 40°C, 60°C e 80°C, (b) curva característica da potência em função da temperatura, para: 28°C, 40°C, 60°C e 80°C.....	29
Figura 15: Curva do MPP para uma temperatura de 60°C e uma irradiância de 830 W/m ²	30
Figura 16: Atlas Solarimétrico do Brasil: irradiação solar diária, média anual (horas).	31
Figura 17: Representação de um motor de indução trifásico, composto de estator, rotor e bobinas, assim como o ângulo de defasagem entre as correntes do estator e rotor (θ).	33
Figura 18: Representação gráfica de uma onda senoidal trifásica, onde a defasagem entre cada tensão é 1/3 do período e igual a 120°.	33
Figura 19: Princípio da prensa hidráulica, onde a força (F) na saída é 10 vezes maior que na entrada simplesmente variando-se a área de seção transversal (A). A pressão (Pr) permanece constante.	34
Figura 20: Processo de pressurização e tratamento do ar em uma rede de ar comprimido.....	36
Figura 21: Tipos de sistemas de rastreamento para painéis fotovoltaicos: (a) eixo único, (b) eixo duplo, (b1) azimutal, (b2) equatorial, (b3) pseudo-equatorial.	38
Figura 22: Potência de saída para diferentes sistemas fotovoltaicos de eixo único no país da Jordânia: (a) no dia 07/05/2004, (b) no dia 06/10/2004.	39

Figura 23: (a) comparativo entre a potência máxima entregue por cada tipo de sistema em relação ao tempo de 10 horas, (b) comparativo entre o nível de carga da bateria carregada por cada tipo de sistema ao longo de 10 horas.....	40
Figura 24: Exemplo de três diferentes ondas de potência genéricas geradas através de um PWM.....	42
Figura 25: Curva característica de um painel fotovoltaico destacando seu MPP.....	43
Figura 26: Fluxograma do método P&O.	44
Figura 27: Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7 m/s.	45
Figura 28: Estrutura mecânica proposta.	46
Figura 29: Sistema teoricamente com momento, torque ou conjugado de partida máximo (operação próxima aos horários de 07:00 e 17:00 horas).....	47
Figura 30: Sistema teoricamente com momento, torque ou conjugado de partida igual a zero (operação próxima ao horário de 12:00 horas).....	48
Figura 31: Vista superior da estrutura mecânica comportando 78 placas fotovoltaicas com centro de gravidade em “cg”.	49
Figura 32: Influência da força do vento no sistema.....	50
Figura 33: Especificações técnicas da linha de motores Hägglunds CA.....	52
Figura 34: Especificações técnicas da linha de motores Hägglunds CA.....	53
Figura 35: Especificações técnicas da linha de motores Calzoni MR.....	54
Figura 36: Especificações técnicas da linha de motores Calzoni MRT.	55
Figura 37: Irradiação solar em diferentes planos para o município de Ouro Preto.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Eficiência de uma célula fotovoltaica.....	26
Tabela 2: Comparativo de eficiência entre células fotovoltaicas fabricadas de diferentes materiais.	27
Tabela 3: Perdas elétricas em uma estação fotovoltaica.....	28
Tabela 4: Comparação entre os diferentes tipos de acionamentos mecânicos.	37
Tabela 5: Características físicas de cada sistema.	51
Tabela 6: Discriminação dos componentes do sistema de 78 placas.	59
Tabela 7: Discriminação dos componentes do sistema de 198 placas.	59

LISTA DE SÍMBOLOS

P_L ou P – Potência em Watts

U_L, U ou V – Tensão em Volts

P_{Lmax} – Potência máxima em Watts

T° – Temperatura em Graus Celsius

I – Corrente em Amperes

θ – Ângulo de defasagem entre as correntes do Estator e Rotor

cm^2 – Área em centímetros quadrados

kgf – Força em Quilograma força

Pr – Pressão em Quilograma força por centímetros quadrados

I_{cc} ou I_{sc} – Corrente de curto-circuito em Amperes

I_{pp} ou I_m – Corrente de máxima potência em Amperes

V_{pp} ou U_m – Tensão de máxima potência em Volts

V_{ca} ou U_{oc} – Tensão de circuito aberto em Volts

$V(t)$ – Função de tensão em Volts ao longo do tempo em segundos

$I(t)$ – Função de corrente em Amperes ao longo do tempo em segundos

$P(t)$ – Função de potência em Watts ao longo do tempo em segundos

ΔV – Variação de tensão em Volts

ΔP – Variação de potência em Watts

Δt – Variação do tempo em segundos

V_{ref} – Tensão de referência em Volts

m/s – Velocidade em metros por segundo

GW – Potência em Gigawatts

TWh/ano – Energia em Terawatts-hora por ano

Pe – Peso em Newtons

$D2$ – Distância em metros entre o eixo bi-apoiado e o centro de gravidade do conjunto de placas

$D1$ – Distância em metros entre o centro de gravidade e a extremidade do conjunto de placas

Wp – Potência em Watts-pico

kg – Massa em Quilogramas

mm – Comprimento em milímetros

m – Comprimento em metros

cg – Centro de gravidade

m^2 – Área em metros quadrados

W/m^2 – Irradiância

Nm – Torque em Newton-metro

N – Força em Newton

kg/m^3 – Quilograma por metro cúbico

$kWh/m^2.dia$ – Irradiância solar diária em Quilowatt-hora por metros quadrados em um dia

kW – Potência em Quilowatt

kWh – Energia em Quilowatt-hora

kWh/dia – Energia em Quilowatt-hora por dia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Estado da arte	16
1.2	Objetivo geral	18
1.3	Objetivos específicos	18
1.4	Justificativa	19
1.5	Metodologia	19
1.6	Estrutura do trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Painel Fotovoltaico	20
2.1.1	Construção de uma célula fotovoltaica	20
2.1.2	O efeito fotoelétrico	21
2.1.3	Tipos de placas fotovoltaicas	22
2.1.4	Comparação entre os diferentes tipos de células fotovoltaicas	26
2.1.5	Perdas elétricas em sistemas fotovoltaicos	27
2.1.6	Influência da temperatura na eficiência de uma célula fotovoltaica	28
2.1.7	Irradiação solar em diferentes regiões do Brasil	30
2.2	Acionamentos de sistemas mecânicos	31
2.2.1	Motores elétricos	32
2.2.2	Sistemas de acionamento hidráulico	34
2.2.3	Sistemas pneumáticos	35
2.2.4	Comparação entre os tipos de acionamentos mecânicos	37
2.3	Controle em 1 e 2 eixos	38
2.3.1	Sistemas de eixo único	39
2.3.2	Sistemas de eixo duplo	40
2.4	Sistemas de rastreamento automático da posição do sol	40
2.4.1	Microcontroladores	41
2.4.2	Controlador lógico programável	41
2.4.3	PWM	42
2.4.4	Técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência	42
2.4.5	Sensores	44
2.4.6	Força do vento em diferentes partes do Brasil	45

3	DESENVOLVIMENTO	46
3.1	Dimensionamento	47
3.1.1	Cálculo do conjugado de partida.....	47
3.1.2	Cálculo da força do vento.....	50
3.2	Escolha dos motores	52
3.3	Gasto energético do sistema	56
3.4	Geração de energia.....	57
3.5	Cálculo do tempo de retorno de investimento	59
4	CONCLUSÃO	61
4.1	Resultados.....	61
4.2	Sugestões para futuros trabalhos.....	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estado da arte

O fórum mundial de energia previu que, em menos de dez décadas, as reservas de óleo, gás e carvão provenientes de fontes fósseis, serão extintas. Combustíveis fósseis correspondem a cerca de 79% da energia primária consumida em todo o mundo, sendo 57,7% dela usada no setor de transporte (RUSTEMLI e DINCER, 2011).

Sabe-se que o uso crescente de combustíveis fósseis, além de outras práticas comuns do ser humano, contribui com a degradação do meio ambiente. Além de contribuir com o aquecimento global, através de buracos na camada de ozônio, poluem o ar e colocam em risco a saúde e estabilidade dos seres humanos e animais (JACOBSON, 2009).

O uso de alternativas sustentáveis na geração de energia elétrica se faz necessária no atual cenário mundial, com a intenção de extinguir ou, no mínimo, reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Um método que ganha cada vez mais repercussão é a energia solar, que consiste em transformar a energia do sol em energia elétrica através do efeito fotoelétrico. Isso porque a energia solar é limpa, renovável e abundante em todo o planeta.

Thomaz (2017) citou que, devido à grande dependência de fontes de energia hidráulica, aliada a falta de chuva e a falta de investimentos no setor, fizeram com que o Brasil, no ano de 2015, passasse por uma crise energética sem precedentes, mesmo em comparação ao racionamento energético de 2001.

O Brasil é beneficiado, geograficamente, com uma enorme capacidade de geração de energia limpa e sustentável, seja ela hidráulica, devido ao grande volume de rios em todo seu território, eólica, principalmente nas regiões litorâneas, ou solar, devido à grande intensidade de irradiação do sol durante quase todo o ano. Fator esse, que representa um grande potencial de geração de energia solar. Em contrapartida, considera-se um impedimento de investimento em energia solar, a baixa eficiência de conversão das placas solares fotovoltaicas fabricadas e comercializadas atualmente, que giram em torno de 20% em média. Nos dias de hoje, a produção de energia solar no Brasil não ultrapassa 7% da produção total, mas mesmo assim, o país é um dos grandes líderes na geração de energia limpa, onde a maior parte da energia elétrica se deve à produção hidráulica, ao passo que, mundialmente o carvão se apresenta como a maior fonte na produção de energia elétrica, o que pode ser facilmente observado nas Figuras 1, 2 e 3.

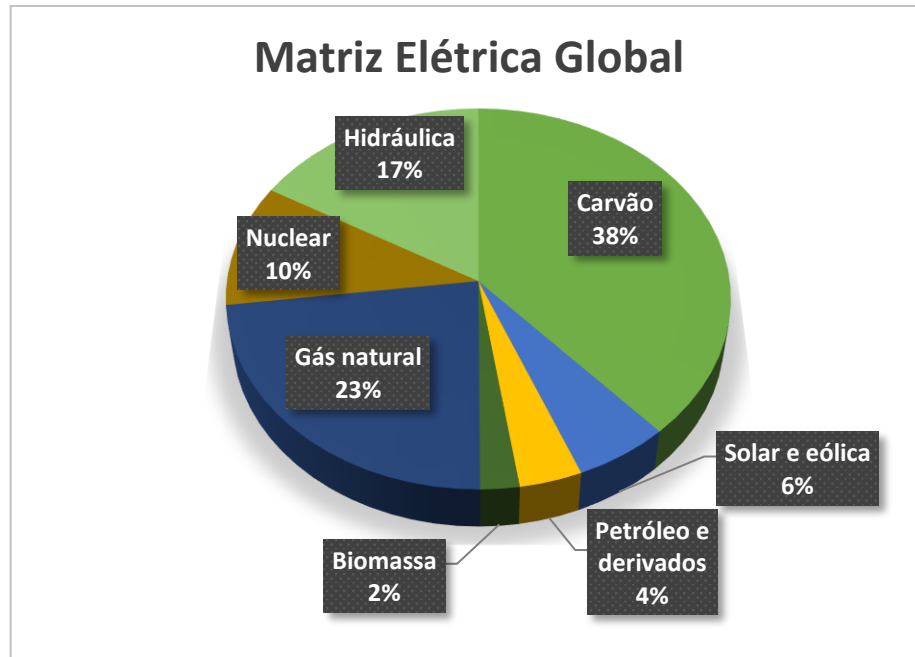


Figura 1: Matriz elétrica global de 2016.

Adaptado de: EPE – Empresa de pesquisa energética do Governo Federal, 2017

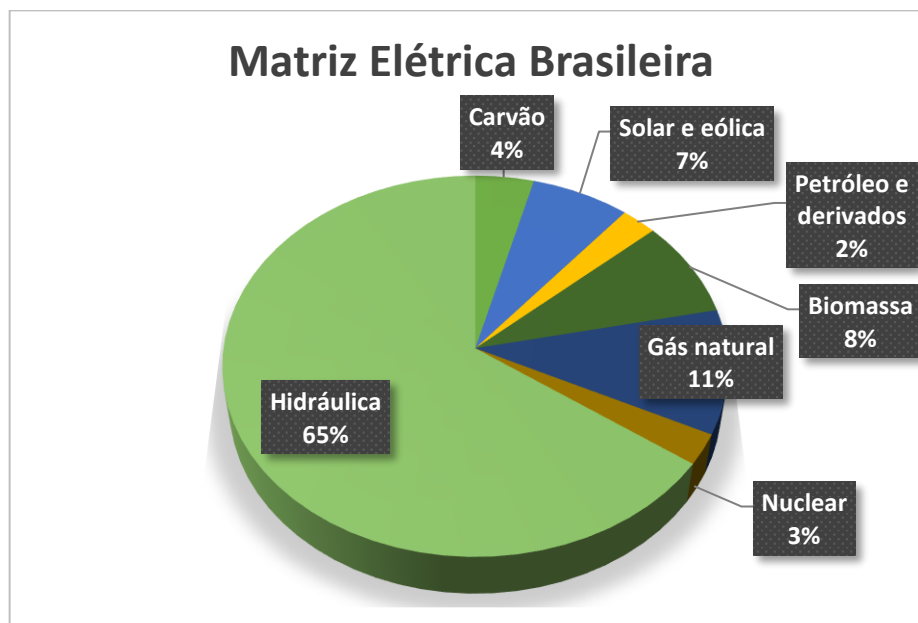


Figura 2: Matriz elétrica brasileira de 2017.

Adaptado de: EPE – Empresa de pesquisa energética do Governo Federal, 2017

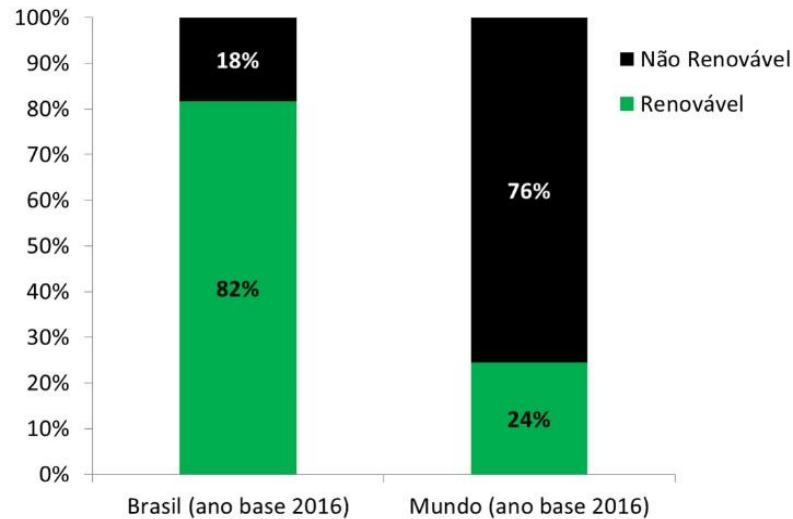


Figura 3: Comparação de produção de energia renovável e não renovável no ano de 2016.
 Fonte: EPE – Empresa de pesquisa energética do Governo Federal, 2017

1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como principal propósito estudar, teoricamente, a viabilidade de usar um sistema hidráulico para controlar a posição de um conjunto de placas fotovoltaicas, utilizando técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), microcontroladores ou CLP e PWM, com o propósito de aumentar a eficiência na conversão da energia solar em elétrica.

1.3 Objetivos específicos

- Analisar os diferentes tipos de acionamentos mecânicos, comparando qualitativamente sua eficiência energética, potência de operação, torque, vida útil, frequência de manutenção, facilidade de implementação, entre outros fatores. Com a finalidade de atestar o sistema hidráulico como melhor candidato para este projeto.
- Propor uma estrutura física que irá comportar os módulos ou placas fotovoltaicas, assim como os motores e demais equipamentos necessários em uma estação fotovoltaica.
- Dimensionar quatro sistemas hidráulicos de dois portes diferentes, dois funcionando de maneira contínua e os outros dois de modo intermitente, para comparar a eficiência entre cada um deles.
- Comparar a eficiência energética gerada com a implantação dos quatro sistemas com os gastos extras que os mesmos proporcionam, com a intenção de calcular o tempo de retorno de investimento (payback) e atestar sua viabilidade de implantação.

1.4 Justificativa

O sistema proposto neste trabalho visa aumentar a eficiência na geração de energia elétrica de um sistema fotovoltaico, melhorando sua viabilidade econômica, especialmente para aplicações de geração de energia em larga escala, seja em grandes produtoras de energia ou por empresas que pretendem atingir a autonomia energética, produzindo a própria energia que consome, tornando assim a opção de geração fotovoltaica mais atraente.

1.5 Metodologia

Para a execução do presente trabalho, a metodologia adotada é, primeiramente, a revisão bibliográfica, com o intuito de obter um referencial teórico para o trabalho, seguido de desenvolvimento teórico, composto pela avaliação e comparação entre os diferentes tipos de sistemas de acionamentos mecânicos, dimensionamento dos diferentes sistemas fotovoltaicos, e por fim, será comparado, de maneira qualitativa e quantitativa, os benefícios da aquisição de cada um dos sistemas, no intuito de atestar a viabilidade de utilização do sistema hidráulico.

1.6 Estrutura do trabalho

No primeiro capítulo, é apresentado ao leitor uma breve introdução relativa ao tema abordado no trabalho, assim como os objetivos e justificativas que levaram ao desenvolvimento do mesmo.

No segundo capítulo, é apresentado o referencial teórico em que o trabalho se baseia.

No terceiro capítulo, é feito todo o desenvolvimento teórico do trabalho, que envolve a elaboração e proposta de um sistema mecânico para comportar as placas fotovoltaicas, dimensionamento dos sistemas hidráulicos, cálculo do gasto de energia elétrica que cada sistema hidráulico necessitará para operar, cálculo da energia gerada por cada sistema e, por fim, o cálculo do tempo de retorno de investimento.

No quarto capítulo, são discutidos os resultados que este trabalho obteve, assim como recomendações para futuros trabalhos no ramo da união entre sistemas hidráulicos e fotovoltaicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aqui são apresentadas pesquisas já existentes no contexto de geração de energia solar, através dos mais diversos tipos de células fotovoltaicas, diferentes tipos de acionamentos mecânicos, comparando-se entre elétricos, hidráulicos e pneumáticos, técnicas de rastreamento do máximo ponto de potência (MPPT), microcontroladores e CLPs, controle de sistemas fotovoltaicos em 01 e 02 eixos e sistemas de rastreamento automático da posição do sol, com o intuito de situar o leitor a respeito do tema e fundamentar o trabalho.

2.1 Painel Fotovoltaico

Fontes de energia limpas e sustentáveis são cada vez mais utilizadas, tanto nas indústrias quanto em residências. Uma delas é a energia fotovoltaica, que consiste em, basicamente, transformar a irradiação do sol em energia elétrica, através do efeito fotoelétrico.

2.1.1 Construção de uma célula fotovoltaica

Toda célula fotovoltaica é composta de um material semicondutor. O material mais utilizado em sua construção é o silício, não por ser o melhor material semicondutor existente, mas por sua abundância na superfície terrestre, compondo cerca de 27,70% da crosta terrestre, sendo o segundo elemento mais presente no planeta, ficando atrás apenas do oxigênio, que compõe cerca de 49,78 (MUNDO EDUCAÇÃO, 2019).

Vale ressaltar que uma placa ou módulo fotovoltaico é construído a partir da junção de várias células fotovoltaicas.

O silício em sua forma pura, não possui elétrons livres em sua camada de valência. Para modificar suas propriedades, é necessário a realização de um procedimento de dopagem do material, acrescentando ao silício outros elementos.

Ao ligar silício e impurezas trivalentes, cria-se um material composto de lacunas de elétrons, isto é, com falta de elétrons em sua camada de valência, este material é chamado de tipo P. Analogamente, ligando-se silício e impurezas pentavalentes, obtém-se um material com excesso de elétrons livres, chamado de tipo N.

Uma célula fotovoltaica é basicamente a junção de uma película de um material do tipo P com uma outra película de material do tipo N, de modo que o material do tipo P seja presente em maior quantidade, como pode ser observado na Figura 4.

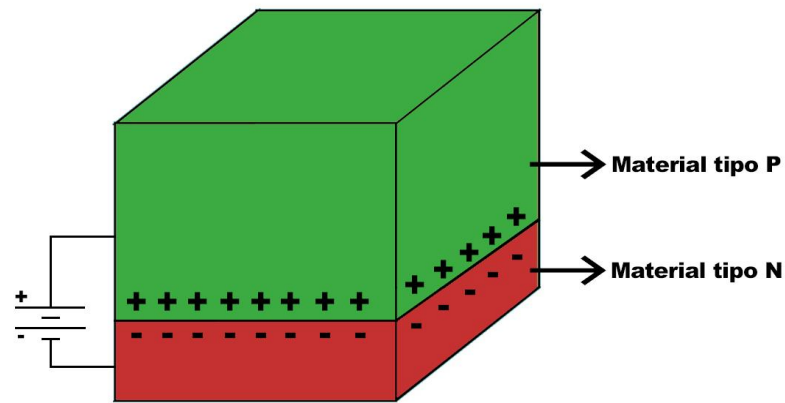


Figura 4: Junção P-N.
Fonte: Arquivo pessoal

2.1.2 O efeito fotoelétrico

Ao incidir luz solar na superfície da célula fotovoltaica, ocorre o efeito fotoelétrico propriamente dito, que consiste na formação de uma corrente elétrica, do material do tipo P para o material do tipo N, devido a uma determinada incidência e frequência de radiação eletromagnética. Os fótons que incidem sobre a célula, fornecem energia aos elétrons em excesso na camada de valência do material do tipo N, que fluem para a película do material do tipo P, gerando-se assim a corrente elétrica, que pode ser observada na Figura 5.

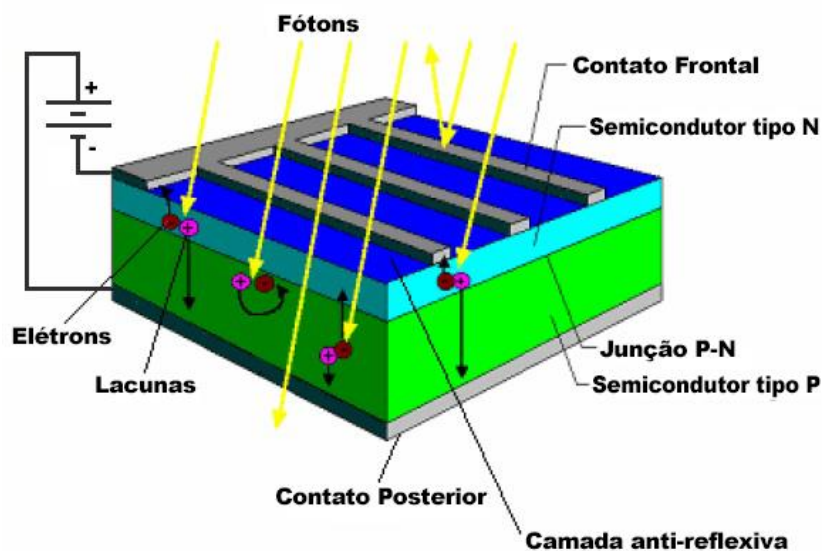


Figura 5: Célula fotovoltaica.
Adaptado de: Oliveira, 2008, p. 38

2.1.3 Tipos de placas fotovoltaicas

Placas fotovoltaicas podem ser construídas de diferentes formas, cada qual possui determinadas vantagens e desvantagens, em comparação com as demais. A seguir serão apresentados os principais tipos de placas fotovoltaicas produzidas industrialmente.

2.1.3.1 Painel solar de silício monocristalino

É a mais antiga tecnologia de fabricação e os painéis que apresentam a maior eficiência, que variam entre 15% e 22%. São facilmente identificáveis, pois possuem uma cor uniforme em toda sua extensão, característica que indica um alto grau de pureza do silício. São fabricados a partir de um único cristal de silício altamente puro, através de lingotes de silício em forma cilíndrica. Apresentam como vantagens, uma alta eficiência, a maior entre as atuais tecnologias comercialmente viáveis. Ocupam menos espaço na planta, uma vez que para alcançar a potência final desejada, é necessário menos painéis, devido sua alta eficiência. Possuem uma vida útil elevada, que ultrapassa os 30 anos e tendem a funcionar melhor em áreas com menor incidência da luz solar. Como desvantagens, apresentam um elevado custo de aquisição e fabricação, além de altos índices de desperdício durante o processo de fabricação (PORTAL SOLAR, 2018).

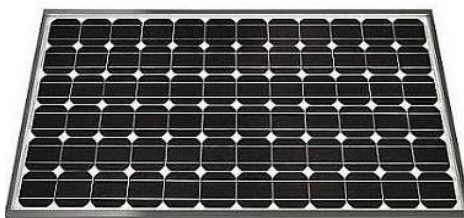


Figura 6: Painel solar de silício monocristalino.
Fonte: Portal Solar, 2018

2.1.3.2 Painel solar de silício policristalino

Sua principal diferença em relação aos painéis de silício monocristalino é na forma de fundição dos cristais de silício. No policristalino, os cristais são fundidos em um bloco, preservando a formação de múltiplos cristais. Uma vez fundidos, são cortados em blocos quadrados, e posteriormente, fatiados em chapas, assim como no monocristalino, a única diferença é que as chapas são quadradas. Apresenta como vantagens uma menor quantidade de

silício residual gerado durante a fase de corte das células, são mais baratos em comparação aos painéis monocristalinos. Apresenta vida útil semelhante aos monocristalinos. Possui uma eficiência menor em comparação com os painéis monocristalinos, que varia entre 14% e 20%, devido ao menor grau de pureza de silício em sua composição. Ocupam mais espaço na planta, devido a menor eficiência (PORTAL SOLAR, 2018).



Figura 7: Painel solar de silício policristalino.
Fonte: Portal Solar, 2018

2.1.3.3 Painel solar de silício amorfo (a-Si)

Geralmente, só são usadas para aplicações de pequena escala, pois a eficiência de produção de energia é baixa nesta tecnologia, como por exemplo, em calculadoras de bolso. Entretanto, recentes inovações permitiram a utilização deste tipo de painel em grande escala, através de uma técnica de fabricação chamada de “empilhamento”, que consiste na combinação de várias camadas das células solares, resultando em uma melhora na eficiência, mas que mesmo assim, não é tão alta, variando entre 6% e 9%. O custo de fabricação por “empilhamento” é elevado, encarecendo seu valor. Por outro lado, apenas 1% do silício utilizado nas placas cristalinas é utilizado neste modelo (PORTAL SOLAR, 2018).

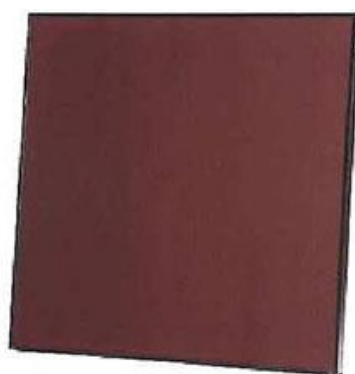


Figura 8: Painel solar de silício amorfo (a-Si).
Fonte: Portal Solar, 2018

2.1.3.4 Painel solar de Telureto de cádmio (CdTe)

Esse tipo de painel, dentre todos os painéis solares compostos por células de película fina (TFSC), que são o de silício amorfo (a-Si); Telureto de cádmio (CdTe); Cobre, índio e gálio seleneto (CIS/CIGS) e células solares fotovoltaicas orgânicas (OPV), é o único que superou o custo/eficiência dos painéis solares de silício cristalino em uma parcela significativa do mercado mundial. Apresenta uma eficiência entre 9% e 16%. Instalações com esse tipo de painel, geralmente são grandes campos solares, presentes em grandes usinas de energia solar. A *First Solar*, maior fabricante de módulos fotovoltaicos no mundo atualmente, instalou mais de 5 gigawatts (GW) de painéis fotovoltaicos de filme fino com base na tecnologia de Telureto de cádmio em todo o mundo. A mesma empresa detém o recorde mundial de eficiência, que é de 16% (PORTAL SOLAR, 2018).



Figura 9: Painel solar de Telureto de cádmio (CdTe).
Fonte: Portal Solar, 2018

2.1.3.5 Painel solar de seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS)

Em comparação com as demais tecnologias de painéis filme fino, apresentam maior potencial em termos de eficiência, além de conter menor quantidade de cádmio em sua composição, que é um material tóxico. Geralmente operam na faixa de eficiência de 10% a 12% (PORTAL SOLAR, 2018).



Figura 10: Painel solar de seleneto de cobre, índio e gálio (CIS/CIGS).
Fonte: Portal Solar, 2018

2.1.3.6 Células fotovoltaicas orgânicas (OPV)

Este é um tipo de célula solar de polímero que utiliza a eletrônica orgânica, um ramo da eletrônica que lida com polímeros orgânicos condutores ou pequenas moléculas orgânicas, para absorção de luz e transporte de carga para a produção de eletricidade através do efeito fotoelétrico. Essa tecnologia foi idealizada com o intuito de ser flexível e de baixo custo, utilizando processos simples para sua produção, assim como materiais abundantes (PORTAL SOLAR, 2018).

Embora sua produção não seja complexa, esse tipo de célula solar apresenta complicações de estabilidade dos materiais utilizados, não permitindo a captação dos elétrons liberados no efeito fotoelétrico (BLUE SOL, 2017).

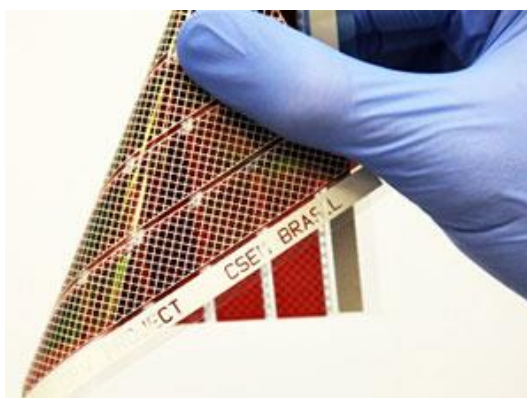


Figura 11: Célula fotovoltaica orgânica (OPV).
Fonte: Portal Solar, 2018

2.1.3.7 Painel solar híbrido

É uma nova tecnologia presente no mercado fotovoltaico, conhecida por “heterojunção”. A eficiência dos painéis desse tipo varia de 21% a 24%. O processo de fabricação se assemelha ao do painel de silício monocristalino, porém, possuem uma passivação com camada de silício amorfo (a-Si), dentre outras diferenças (PORTAL SOLAR, 2018).

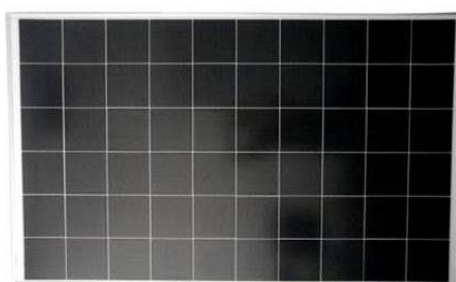


Figura 12: Painel solar híbrido.
Fonte: Portal Solar, 2018

2.1.4 Comparação entre os diferentes tipos de células fotovoltaicas

Cada vez mais os fabricantes trabalham com técnicas de produção aprimoradas, visando diminuir perdas individuais e coletivas das células fotovoltaicas, visando alcançar a máxima eficiência, que em 2017 era em torno de 13%, como ilustra a Tabela 1 (BLUE SOL, 2017).

Tabela 1: Eficiência de uma célula fotovoltaica.

100%	Irradiação solar Total
- 3,0%	Reflexão e sombreamento dos contatos frontais
-23,0%	Fótons com energia insuficiente na irradiância de ondas compridas
-32,0%	Fótons com energia excedente na irradiância de ondas curtas
-8,5%	Recombinação de elétrons
-20,0%	Gradiente elétrica, especialmente na região do campo elétrico
-0,5%	Resistência em série (perdas térmicas na condução elétrica)
= 13,0%	Energia elétrica utilizável

Fonte: Blue Sol, 2017

É importante não confundir a eficiência das células solares fotovoltaicas com a eficiência dos módulos fotovoltaicos. A eficiência de um painel solar é baseada em sua área total e na potência-pico que pode fornecer. A eficiência da célula determinará as dimensões de

um módulo, sendo que, quanto maior é a eficiência da célula, menor será o tamanho do módulo. Diferentes tipos de células fotovoltaicas apresentam diferentes eficiências, trabalham em diferentes espectros de radiação solar e tem comportamentos distintos em relação ao aumento da temperatura, como mostra a Tabela 2, onde a eficiência máxima teórica foi obtida à partir de cálculos com relação ao princípio de construção de cada uma das células, a eficiência em laboratório foi obtida através de experimentos reais em laboratório e a eficiência de produção em série foi obtida através de medições em campo (BLUE SOL, 2017).

Tabela 2: Comparativo de eficiência entre células fotovoltaicas fabricadas de diferentes materiais.

Material	Eficiência		
	Máxima teórica	Em laboratório	Produção em série
Silício Monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício Policristalino	19,8%	15%	13%
Silício Amorfo	15%	10,5%	7,5%
CIS/CIGS	18,8%	14%	10%
CdTe	16,4%	10%	9%

Fonte: Blue Sol, 2017

2.1.5 Perdas elétricas em sistemas fotovoltaicos

Perdas ocorrem em todos os tipos de processo de transformação de energia, quando o processo é elétrico a regra se mantém, devemos então considerar as perdas no cálculo do projeto, para não correr o risco do mesmo ficar subdimensionado.

A Sociedade Alemã de Energia Solar – DGS (2013) conduziu um estudo prático para mensurar a quantidade de energia elétrica que se perde durante a conversão de energia solar em elétrica, o resultado pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3: Perdas elétricas em uma estação fotovoltaica.

Fatores de perda	Variação	Exemplo	Gerador de 1 kWp
Sombreamento	0,0 – 5,0 %	2,5 %	1200 kWh
Sujidade	1,0 – 3,0 %	2,0 %	1170 kWh
Reflexão	3,0 – 5,0 %	4,0 %	1147 kWh
Variação do espectro AM 1.5	1,0 – 2,0 %	1,5 %	1101 kWh
<i>Mismatch</i>	0,5 – 2,5 %	1,7 %	1084 kWh
Condições diferentes do padrão de teste	4,0 – 9,0 %	6,0 %	1066 kWh
Perdas CC	0,5 – 1,5 %	0,7 %	1002 kWh
Perdas na conversão	0,5 – 3,0 %	1,5 %	995 kWh
Perdas no inversor	3,0 – 7,5 %	5,0 %	980 kWh
Perdas na fiação elétrica	0,2 – 1,5 %	0,5 %	931 kWh
Energia real gerada			926 kWh

Fonte: Adaptado de: DGS, 2013

Embora o estudo realizado pela DGS (2013) seja relativamente recente, mostrando uma perda de energia elétrica média após a conversão de 25,40%, hoje em dia, devido aos constantes incentivos e avanços tecnológicos nessa área, esse número não ultrapassa os 20%.

Portanto, na fase inicial e teórica de um projeto fotovoltaico, o coeficiente de rendimento elétrico padrão adotado após a conversão da energia solar na construção é de 80%.

2.1.6 Influência da temperatura na eficiência de uma célula fotovoltaica

Com o intuito de medir, em uma célula fotovoltaica de silício monocristalino, a influência da temperatura no mecanismo de absorção de luz, as características espectrais de um circuito aberto, a performance de temperatura trabalhando com uma irradiância constante e a performance de irradiância trabalhando com uma temperatura constante, Radziemska (2003), realizou um experimento em laboratório que determinou a curva de máximo ponto de potência (MPP) para uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.

Para tal, ele usou em seu experimento, uma fonte de luz de halogênio; um esquema de lentes monocromáticas, para que os raios da luz incidissem perpendicularmente a célula em uma determinada frequência; uma célula fotovoltaica de silício monocristalino, ligada em paralelo com um voltímetro digital e em série a um amperímetro digital; uma placa de cobre, composta com uma resistência para variar a temperatura; alguns sensores MOSFET, responsáveis pela medição da temperatura, além de um computador para registrar todos os dados, como ilustra a Figura 13.

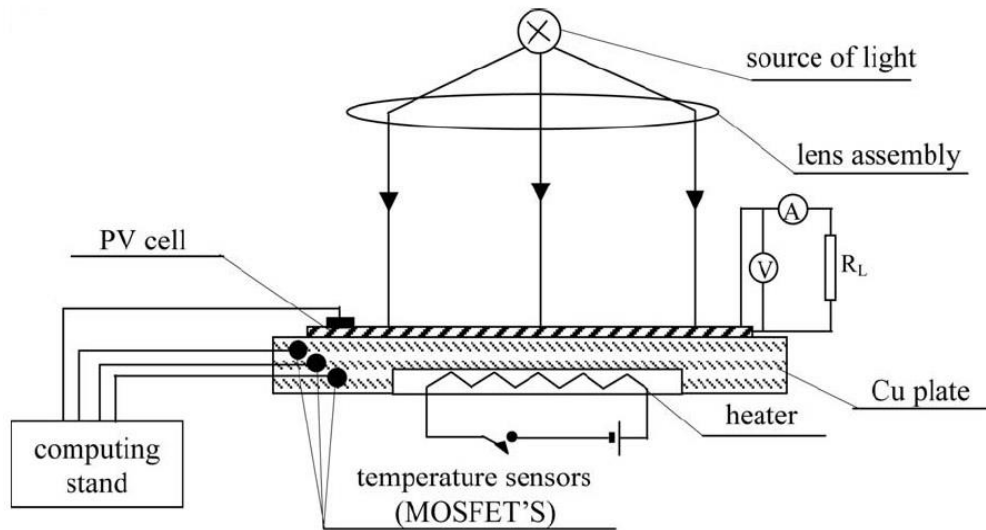


Figura 13: Diagrama esquemático de iluminação e regulação da temperatura de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino.

Fonte: Radziemska, 2003, p. 4

Os resultados obtidos por este experimento, foram registrados por um computador e geraram gráficos, que ajudou a identificar o nível de temperatura e irradiância onde a célula fotovoltaica de silício monocristalino opera em seu MPP, como pode ser observado a seguir.

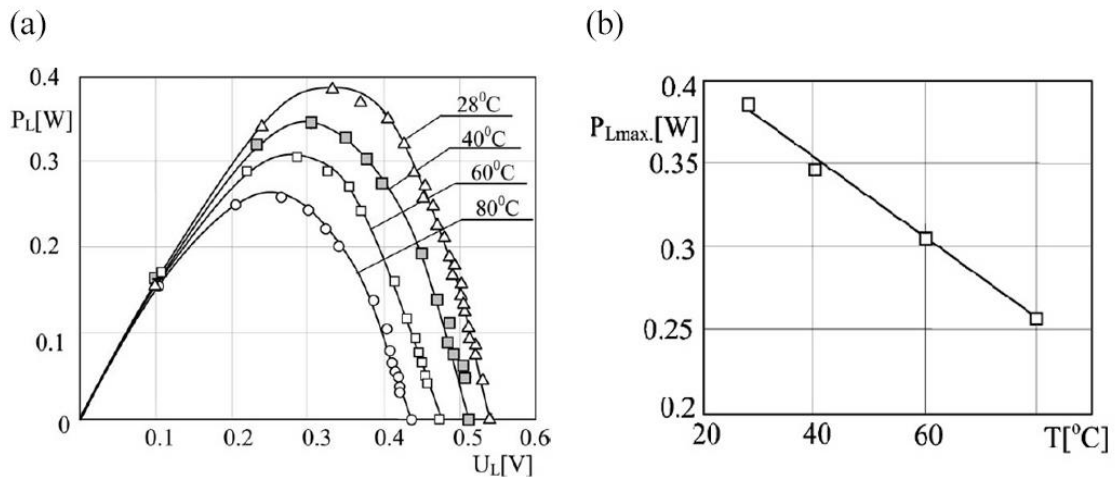


Figura 14: (a) variação da potência e tensão de acordo com a variação da temperatura, para: 28°C, 40°C, 60°C e 80°C, (b) curva característica da potência em função da temperatura, para: 28°C, 40°C, 60°C e 80°C.

Fonte: Radziemska, 2003, p. 4

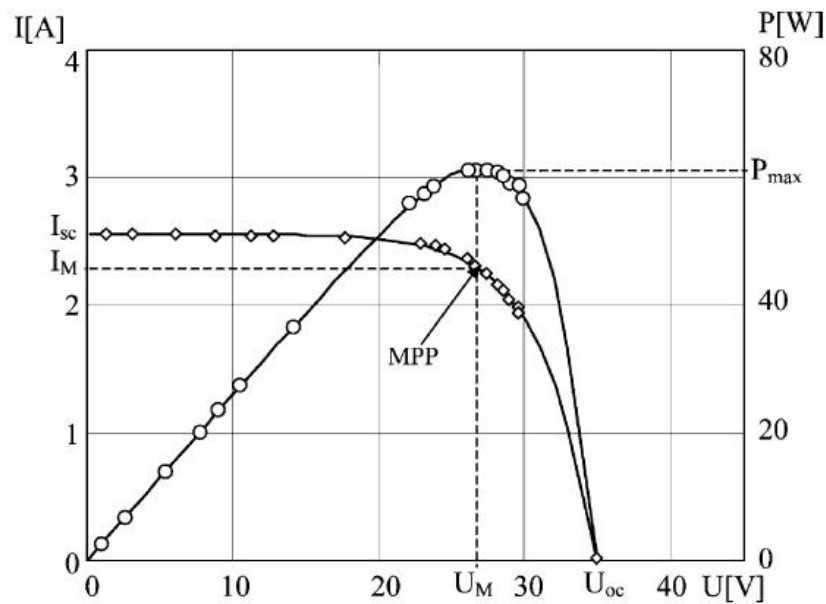


Figura 15: Curva do MPP para uma temperatura de 60°C e uma irradiância de 830 W/m^2 .
Fonte: Radziemska, 2003, p. 4

Através do experimento de Radziemska (2003), pode ser observado a interferência da temperatura e irradiância na eficiência de uma célula fotovoltaica, que tem seu melhor desempenho em torno de 28°C , que é seu ponto de máxima potência (MPP), onde os valores de corrente (I_M), tensão (U_M) e potência (P_{max}) são máximos.

2.1.7 Irradiação solar em diferentes regiões do Brasil

Uma variável de extrema importância em um projeto fotovoltaico são as horas de sol pico (HSP), que também é chamada de horas de brilho do sol ou tempo médio de irradiação solar. Trata-se de um número hipotético, aproximação segundo previsões meteorológicas e simulações de software ou até mesmo valores médios aferidos ao longo dos anos passados. Corresponde ao tempo em horas onde a conversão de energia através do efeito fotoelétrico serão máximos, geralmente entre os horários de 10h e 15h.

O CRESESB, órgão do governo federal, mede, analisa e armazena em um banco de dados valores de irradiação solar diária, ao longo de todo o ano e em todo o território brasileiro (aproximadamente 72000 pontos de coleta). Através do Atlas Solarimétrico do Brasil, na Figura 16 abaixo, podemos observar o nível de insolação diária, média anual, no território nacional (CRESESB, 2021).

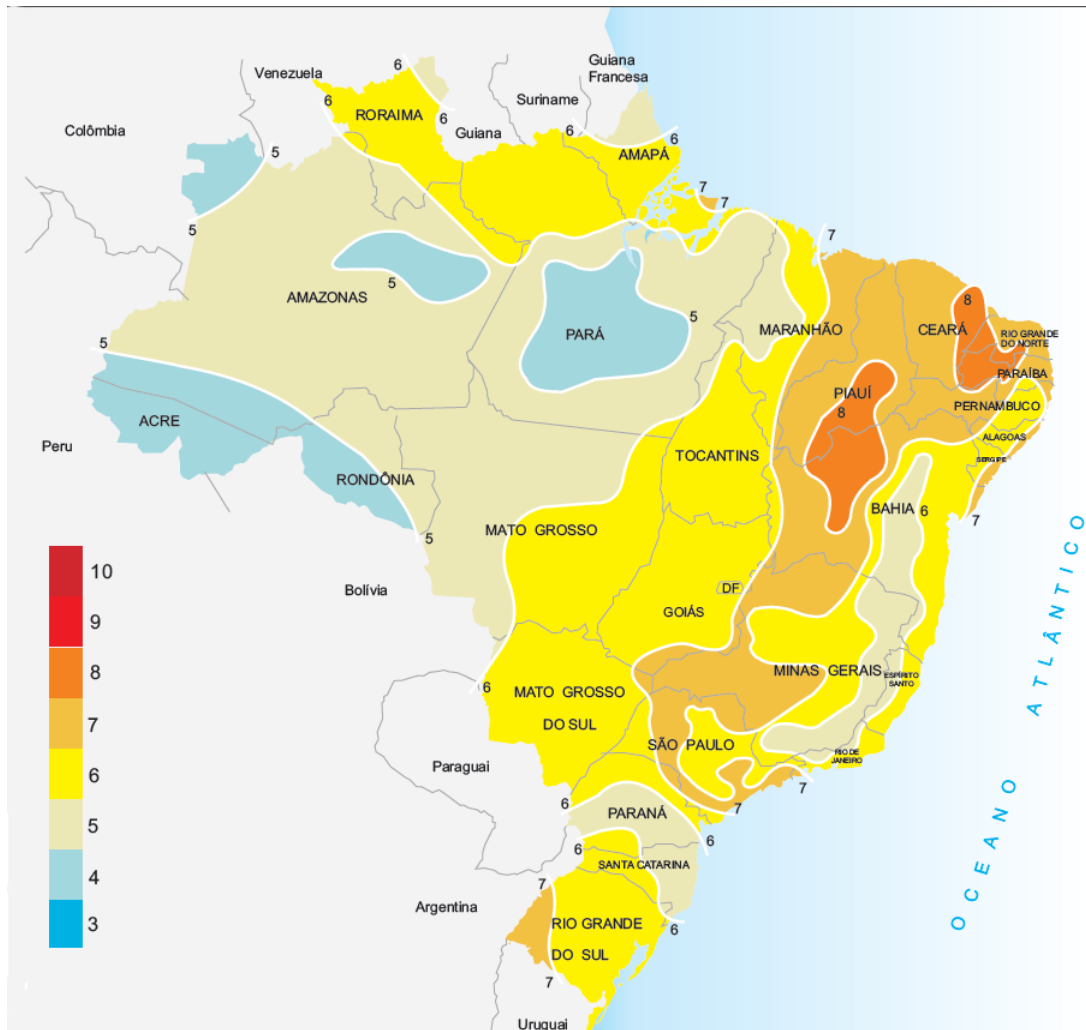


Figura 16: Atlas Solarimétrico do Brasil: irradiação solar diária, média anual (horas).
Adaptado de: CRESESB, 2000, p. 89

2.2 Acionamentos de sistemas mecânicos

A automação dos processos nas mais diversas áreas de atividade do homem deixou de ser uma tendência e tornou-se uma realidade. Com a conceituação da indústria 4.0, atualmente uma empresa só se mantém competitiva com a automatização de seus processos, com a intensão de minimizar erros, otimizar tempo de produção, qualidade, custo e outros muitos fatores.

Neste contexto, sistemas mecânicos têm fundamental papel na automação de atividades que exigem o posicionamento de objetos ou ferramentas. Tais sistemas mecânicos são acionados por atuadores: elétricos, hidráulicos ou pneumáticos (CUNHA, 2001).

2.2.1 Motores elétricos

Motores elétricos são cada vez mais utilizados no acionamento de sistemas mecânicos. Isso acontece pelos constantes avanços tecnológicos da área, melhora no rendimento energético, redução da complexidade de controle, redução nos custos de manutenção, entre outros fatores.

Os motores elétricos podem ser distinguidos de acordo com o tipo de fonte de alimentação: corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), além do princípio de funcionamento de cada um deles.

O motor elétrico CC pode ser de ímã permanente, com ou sem escovas, série, universal, shunt, paralelo ou composto, além de classificações mais recentes e modernas, como motores de passo, servo motores e motores lineares. Apesar do grande avanço da eletrônica, que permitiu o uso de motores CC para controlar pequenas tarefas, sua aplicação na grande maioria dos casos, é exclusivamente experimental, em laboratório, pois sua eficiência e facilidade de implantação em comparação aos motores CA é relativamente menor. Porém, apresenta uma significativa vantagem em relação aos motores CA no quesito facilidade de controle.

Os motores CA podem ser divididos em duas classes: síncronos e assíncronos ou de indução.

Nos motores síncronos, o estator é alimentado em CA, enquanto o rotor é alimentado em CC proveniente de um excitatriz, que nada mais é que um dínamo montado no próprio eixo do motor. Não possuem condições de partida própria, ou seja, necessita de outro motor para auxiliá-lo a atingir sua velocidade síncrona, que geralmente são motores assíncronos, de indução do tipo gaiola ou partida com tensão reduzida, com o auxílio de autotransformadores de partida. Outra característica, é que, antes de submeter o motor síncrono a uma carga em seu eixo, o mesmo deverá primeiro atingir sua velocidade síncrona, retirando-se total ou parcialmente a carga.

O motor síncrono tem velocidade de rotação do eixo proporcional à sua frequência de alimentação, o que originou seu nome, em geral é empregado em atividades onde se deseja uma velocidade baixa e constante, porém com muito torque e potência.

Já nos motores assíncronos, a velocidade de rotação do rotor não é proporcional à sua frequência de alimentação, sendo a velocidade do rotor sempre menor do que a velocidade do campo girante, essa diferença de velocidade entre rotor e campo girante é denominada escorregamento. Pode ser do tipo gaiola ou bobinado, e em sua construção, são colocadas bobinas igualmente defasadas fisicamente, tanto no rotor quanto no estator. Quando o estator é

alimentado com uma corrente contínua, surge uma corrente induzida no rotor, que será defasada no tempo e, conseqüentemente, no espaço, fazendo assim com que o rotor gire. A representação da defasagem entre as correntes e tensões podem ser observadas nas Figuras 17 e 18.

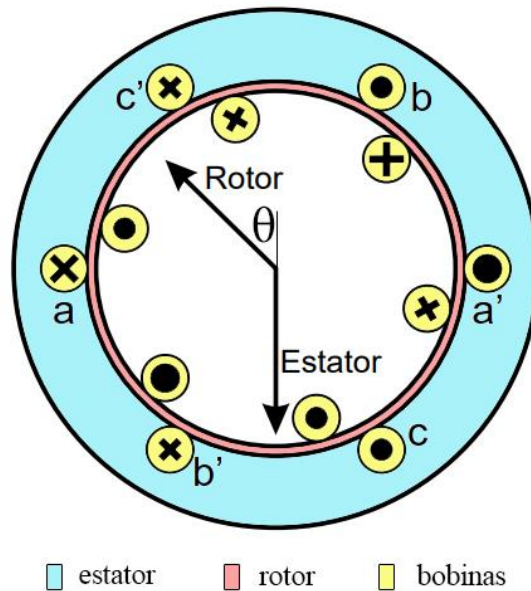


Figura 17: Representação de um motor de indução trifásico, composto de estator, rotor e bobinas, assim como o ângulo de defasagem entre as correntes do estator e rotor (θ).

Fonte: Arquivo pessoal

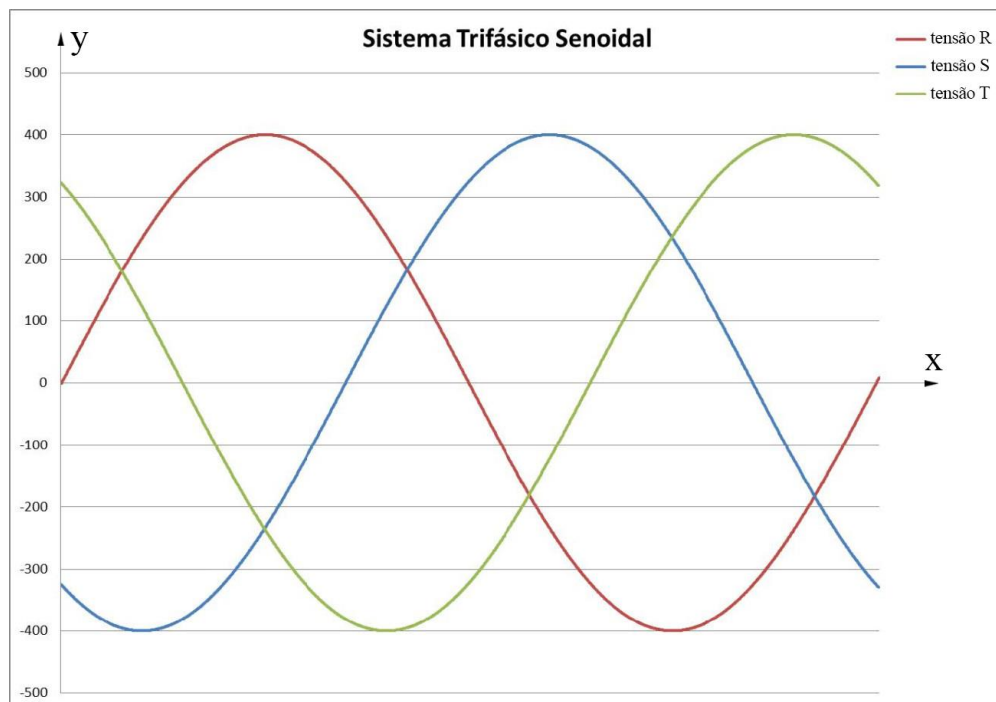


Figura 18: Representação gráfica de uma onda senoidal trifásica, onde a defasagem entre cada tensão é $1/3$ do período e igual a 120° .

Fonte: Arquivo pessoal

A maioria dos motores industriais atualmente são motores de indução, devido a sua robustez, preço acessível e fácil instalação.

2.2.2 Sistemas de acionamento hidráulico

O acionamento de sistemas mecânicos através da hidráulica é feito por um conjunto de componentes, dentre todos, os principais são: unidade hidráulica, composta de bomba hidráulica acionada eletricamente, reservatório, válvula de segurança, trocador de calor, filtro e manômetro, além de válvulas direcionais, cabos de conexão e atuadores. Tem como principal característica o uso de um fluido hidráulico como objeto de transmissão de energia, que também lubrifica os componentes. O fluido hidráulico mais comum usado atualmente é proveniente do petróleo, composto de óleo mineral com adição de aditivos.

Como foi dito por Cunha (2001), uma das principais vantagens dos sistemas hidráulicos é a relação de força/dimensão, sendo amplamente utilizado quando o objetivo é a manipulação de grandes cargas. Porém, apresentam características dinâmicas que dificultam seu controle em malha fechada para atividades que requerem alta precisão.

O princípio de funcionamento dos sistemas hidráulicos é ilustrado na imagem a seguir.

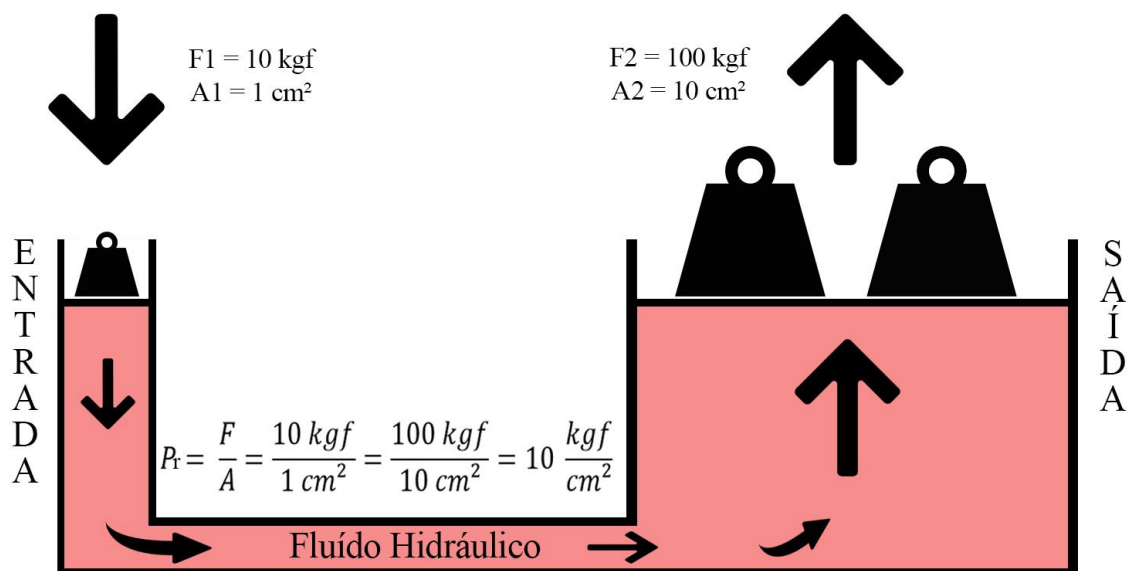


Figura 19: Princípio da prensa hidráulica, onde a força (F) na saída é 10 vezes maior que na entrada simplesmente variando-se a área de seção transversal (A). A pressão (Pr) permanece constante.

Fonte: Arquivo pessoal

Além da característica de força/dimensão dos sistemas hidráulicos em geral, são outras importantes características desse tipo de sistema:

- Possibilidade de operação em condições contínuas, intermitentes, de reversão e parada repentina sem avarias.
- Flexibilidade no projeto, com atuadores tanto lineares quanto rotativos.
- Tempo e velocidade de operação lento e grandes ruídos sonoros, porém com grande precisão de controle de velocidade e posição.

Embora a tecnologia hidráulica seja antiga, continua sendo um sistema dominante na indústria moderna, quando o objetivo é conseguir elevada força ou torque de trabalho para pequenas ou nenhuma variação de velocidade ou pressão, além de flexibilidade, segurança, simplicidade, economia, fácil instalação e grande precisão de controle de posição ou velocidade.

2.2.2.1 Válvula hidráulica proporcional

De acordo com Ke Li et al. (2001), válvulas proporcionais de controle de fluxo atuam como válvulas estranguladoras, restringindo o fluxo a uma única direção. Elas podem dar uma suave e contínua variação no controle do fluxo, desde próximo ao zero (válvula quase totalmente fechada) até a máxima capacidade (válvula totalmente aberta).

Seu funcionamento é bem simples, em sua construção, uma válvula proporcional possui um ou dois solenoides (o número depende da quantidade de posições de operação), que ao ser excitado por uma corrente elétrica, gera um campo eletromagnético, fazendo com que o eixo do carretel da válvula se mova de uma posição de operação para outra, pois possui um material ferromagnético em sua construção.

O controle preciso do carretel e, conseqüentemente, do fluxo de óleo em uma válvula deste tipo é feito através de um acionamento por modulação de largura de pulso, ou PWM, que ajusta em uma alta velocidade, o tempo em que a solenoide recebe corrente elétrica e o tempo em que não recebe, fazendo assim a válvula precisamente operar de 0 a 100% de vazão.

2.2.3 Sistemas pneumáticos

O acionamento de sistemas mecânicos através da pneumática é muito semelhante ao hidráulico, onde a principal diferença entre ambos é com relação ao fluido responsável pela

transmissão de energia, enquanto nos sistemas hidráulicos é utilizado um fluido derivado do petróleo, nos sistemas pneumáticos é utilizado o ar pressurizado.

Durante a etapa de pressurização do ar, feita inicialmente por um compressor, o ar passa por uma série de etapas para garantir que o mesmo fique livre de contaminantes, como óleo, água e sólidos, que podem causar obstrução de orifícios, desgaste de vedações, redução de eficiência, entre outros fatores.

Os componentes de um sistema pneumático, em essência, são os mesmos de um sistema hidráulico, variando apenas a fonte de transmissão de energia e as dimensões de cada componente, com exceção da unidade pneumática que substitui a unidade hidráulica. Os componentes que compõem uma unidade pneumática e descrevem o processo de aquisição e estocagem do ar podem ser facilmente identificados na imagem a seguir:

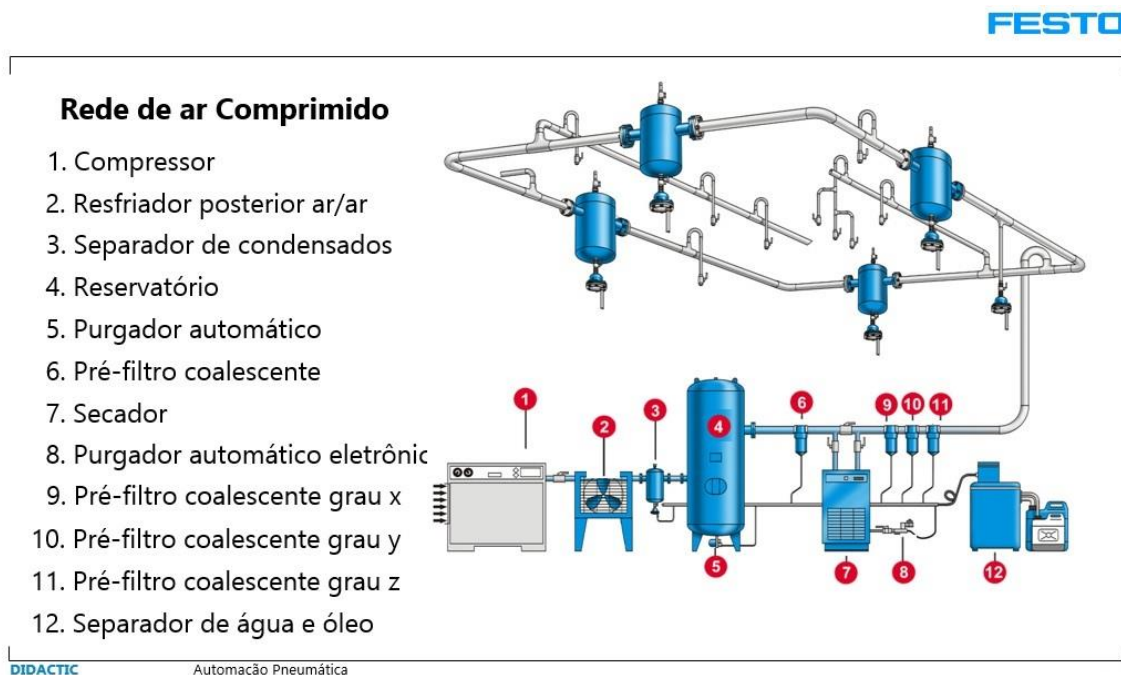


Figura 20: Processo de pressurização e tratamento do ar em uma rede de ar comprimido.
Fonte: FESTO, 2021

As características dos sistemas pneumáticos também são semelhantes às dos sistemas hidráulicos, com exceção da rápida velocidade de operação, baixa precisão de controle de velocidade e posição (devido às particularidades nas propriedades físicas do fluido de transmissão), baixos ruídos sonoros (com exceção do compressor), além da força limitada.

2.2.4 Comparação entre os tipos de acionamentos mecânicos

Aqui é apresentado uma comparação qualitativa entre os tipos de acionamentos mecânicos mencionados anteriormente, com o intuito de descrever precisamente quais métodos são aplicáveis, mais eficientes, mais flexíveis, de mais fácil instalação e controle, bem como o tempo de vida útil e frequência de manutenção, força, torque, velocidade de operação, velocidade de resposta do sistema e custo de aquisição.

Tabela 4: Comparação entre os diferentes tipos de acionamentos mecânicos.

	Tipo de acionamento					
	Elétrico				Mecânico	
	Motor de Passo	Servo motor	Motor de Indução	Motor CC	Hidráulico	Pneumático
Força/Torque	Médio	Médio	Médio	Médio	Muito alto	Baixo
Velocidade de operação	Médio	Médio	Alto	Alto	Muito baixo	Alto
Velocidade de resposta	Alto	Muito alto	Muito alto	Muito Alto	Médio	Alto
Controle de velocidade	Alto	Muito alto	Médio	Alto	Alto	Baixo
Precisão de controle	Alto	Alto	Baixo	Muito Alto	Médio	Baixo
Custo médio total	Alto	Muito alto	Médio	Médio	Alto	Médio
Vida útil média	12 anos	12 anos	5 anos	3 anos	15 anos	12 anos
Frequência de manutenção	Médio	Médio	Alto	Alto	Médio	Baixo
Flexibilidade	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Muito alto	Muito alto
Aplicabilidade	Alto	Alto	Médio	Médio	Alto	Baixo
Eficiência Energética	Alto	Alto	Muito alto	Alto	Alto	Alto
Facilidade de instalação	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Alto
Facilidade de controle	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Médio

Fonte: Arquivo pessoal

Podemos observar que, todos os tipos de acionamentos analisados qualitativamente na tabela acima podem ser utilizados na construção de um seguidor automático do sol, porém

alguns apresentam melhores características para o sistema em questão, que será proposto futuramente neste trabalho, quando comparado aos demais. Por se tratar de um sistema visando a utilização de várias placas para um mesmo sistema mecânico, podemos descartar a utilização do sistema pneumático por causa de sua baixa força/torque e alta velocidade de operação.

2.3 Controle em 1 e 2 eixos

Sabe-se que a posição do sol se altera constantemente a cada minuto, hora e dia do ano, e para produzir sua máxima potência de saída, a posição da placa fotovoltaica em relação a incidência dos raios solares deve ser ajustada e controlada frequentemente.

Além dos sistemas fotovoltaicos convencionais, isto é, estáticos e sem o controle de sua posição em relação ao movimento do sol, existem outras duas classificações para esses sistemas, com relação a quantidade de eixos para controlar a posição do mesmo, são sistemas de eixo único ou duplo. Essa classificação, é brevemente descrita na Figura 21 e será abordada com maiores detalhes ao longo deste trabalho.

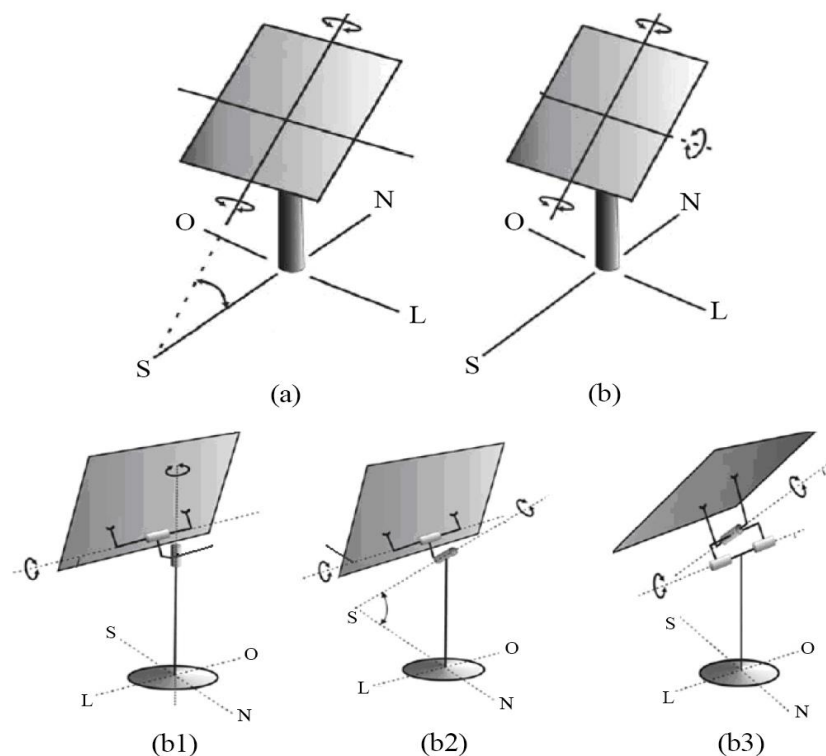


Figura 21: Tipos de sistemas de rastreamento para painéis fotovoltaicos: (a) eixo único, (b) eixo duplo, (b1) azimutal, (b2) equatorial, (b3) pseudo-equatorial.

Adaptado de: Alboteanu, 2015, p. 32 e 33

2.3.1 Sistemas de eixo único

Como disse Abu-Khader, Badran e Abdallah (2008), sistemas de rastreamento do sol de eixo único são consideravelmente mais baratos e mais fáceis de se construir em comparação a sistemas de eixo duplo, porém sua eficiência é inferior.

Isso porque o sistema se limita a apenas uma faixa fixa de rotação, em contrapartida, permite a utilização de apenas um motor para rotacionar o conjunto mecânico, consumindo menor energia, reduzindo-se o custo de manutenção, além de menores complexidades com relação ao controle da posição por parte dos microcontroladores e componentes eletrônicos.

Sistemas que utilizam um único eixo para controle da posição de uma ou mais placas fotovoltaicas em relação ao sol podem ser de três tipos: Norte-Sul, Leste-Oeste ou verticais.

Durante seu experimento, que consiste em analisar a diferença entre esses 3 tipos de sistemas de eixo único (Norte-Sul, Leste-Oeste e vertical) em comparação a um sistema convencional fixo, as características de ganho de potência encontradas por Abu-Khader, Badran e Abdallah (2008) podem ser observadas na Figura 22, que mostra a potência de saída em Watts (W) no eixo Y e o tempo local em horas no eixo X.

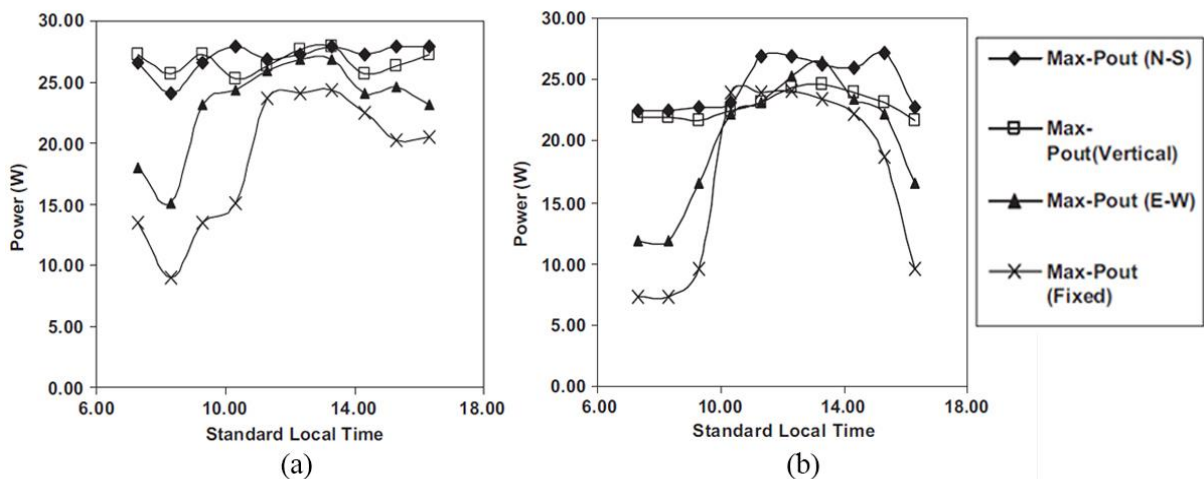


Figura 22: Potência de saída para diferentes sistemas fotovoltaicos de eixo único no país da Jordânia: (a) no dia 07/05/2004, (b) no dia 06/10/2004.

Adaptado de: Abu-Khader; Badran e Abdallah, 2008, p. 871 e 872

Os cientistas concluíram com o experimento que houve um aumento na potência de saída do sistema que varia entre 30 e 45%, dependendo do tipo de eixo utilizado, em comparação com um sistema fixo convencional para o país da Jordânia.

2.3.2 Sistemas de eixo duplo

Sistemas de rastreamento da posição do sol que utilizam duplo eixo são mais eficazes, pois cobrem todas as possíveis áreas onde o sol irradia diariamente, durante todo o ano, porém, a utilização de dois motores responsáveis pela rotação do sistema, além de aumentar o consumo energético do mesmo, ocasiona um aumento significativo na complexidade e dinâmica do sistema, principalmente com relação ao desenvolvimento do controlador.

Trevelin (2014) constatou que, o aumento percentual da potência gerada por um sistema de eixo duplo é de 39,2% em relação a um sistema convencional fixo, e que o aumento percentual da potência gerada por esse mesmo sistema em relação a um sistema de eixo único é de 18,8%. Os dados foram colhidos em dias ensolarados, sem nuvens e com temperatura média de 26 ° C, como mostra a Figura 23.

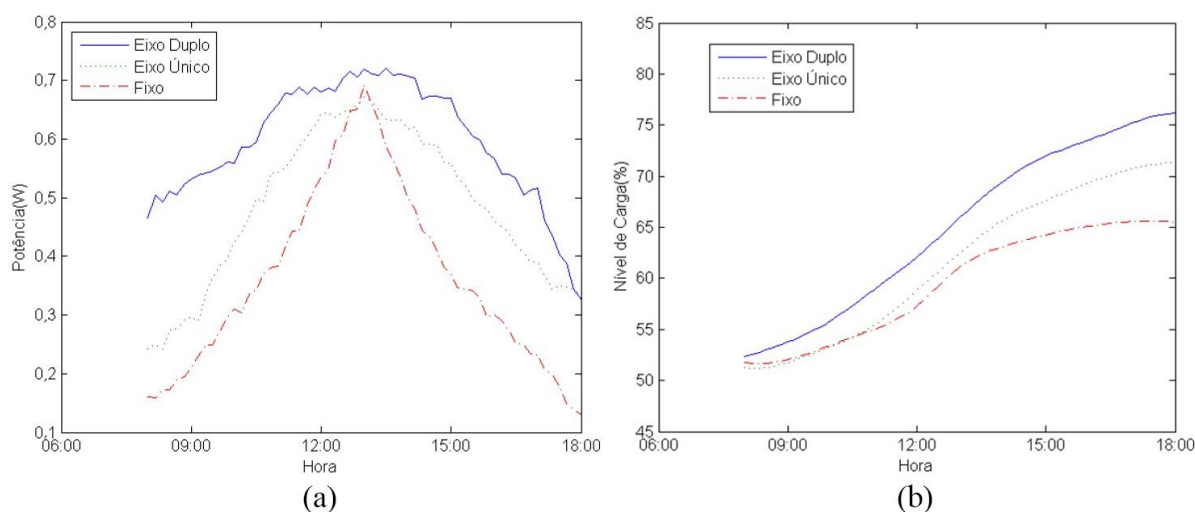


Figura 23: (a) comparativo entre a potência máxima entregue por cada tipo de sistema em relação ao tempo de 10 horas, (b) comparativo entre o nível de carga da bateria carregada por cada tipo de sistema ao longo de 10 horas.

Fonte: Trevelin, 2014, p. 48 e 50

2.4 Sistemas de rastreamento automático da posição do sol

Sabe-se que a potência elétrica gerada por uma placa fotovoltaica está diretamente ligada à radiação solar incidente sobre a mesma. Atualmente é cada vez mais viável a utilização de sistemas mecânicos aliados a dispositivos eletrônicos para controlar a posição de uma placa fotovoltaica, com o intuito de deixá-la sempre perpendicular aos raios solares e otimizar a produção de energia elétrica (ALBOTEANU e MANOLEA, 2016).

A construção de um sistema de rastreamento automático do sol pode ser feita de diversas maneiras, mas sempre será com a associação de um sistema mecânico à um sistema lógico, além da utilização de técnicas para atingir a máxima eficiência possível, como técnicas de seguidores do ponto de máxima potência (MPPT). Os sistemas lógicos mais viáveis de utilização, devido ao custo de aquisição e facilidade de implementação, são através de microcontroladores, CLP e PWM.

2.4.1 Microcontroladores

Segundo Rocha (2016), um microcontrolador é um CI programável, que executa, com um determinado ciclo de tempo, um código gravado em sua memória. Todo microcontrolador conta com um processador, uma memória de leitura e escrita para armazenar dados, memória somente leitura para armazenar o programa a ser executado, EEPROM para armazenamento permanente dos dados, dispositivos como conversores digitais/analógicos (DAC) e analógicos/digitais (ADC) e em alguns casos interface de entrada e saída de dados.

A maioria dos microcontroladores têm sua lógica de programação feita na linguagem C/C++ e plataformas de desenvolvimento disponibilizadas pelas fabricantes. Dois dos microcontroladores mais utilizados atualmente são o Arduino e o μ C/OS.

2.4.2 Controlador lógico programável

Segundo Bolton (2015), um controlador lógico programável (CLP) é uma forma de controlador baseado em microprocessadores que utilizam memória programável para armazenar instruções e implementar funções como lógica, sequenciamento, tempo, contagem e aritmética para controlar máquinas e processos. CLPs são similares a computadores, porém os computadores foram feitos para calcular e exibir tarefas, já os CLPs foram feitos para controlar tarefas e o ambiente industrial como um todo.

A grande diferença entre os CLPs e os microcontroladores está na facilidade de implementação e utilização. O primeiro ganha em relação ao segundo pois somente exige que o operador saiba interpretar comandos elétricos e de lógica booleana, além de um pequeno conhecimento em linguagem *Ladder*, já os microcontroladores exigem do operador o conhecimento de seu sistema de hardware, de uma linguagem de programação compatível, conhecimento em softwares de simulação, como o *Proteus*, além de prática na montagem de circuitos.

2.4.3 PWM

A sigla em inglês que significa *Pulse Width Modulation* ou modulação por largura de pulso (em português), é uma modulação do sinal elétrico amplamente utilizado na indústria, em motores elétricos, resistências, fontes de alimentação, válvulas proporcionais, etc. O que o PWM faz é ajustar, em uma alta velocidade, o tempo em que a carga recebe potência elétrica e o tempo em que não recebe, como ilustra a Figura 24.

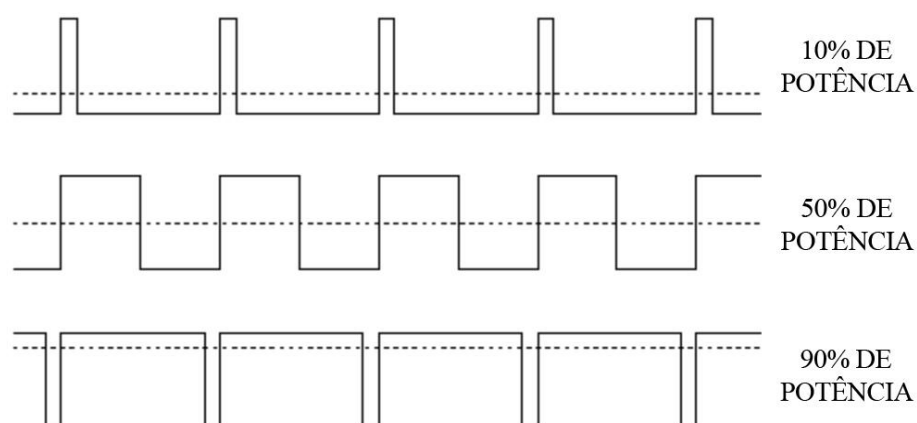


Figura 24: Exemplo de três diferentes ondas de potência genéricas geradas através de um PWM.
Fonte: Arquivo pessoal

2.4.4 Técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência

Segundo Rocha (2016), existem algumas técnicas que aumentam o rendimento energético de placas fotovoltaicas, uma delas utiliza algoritmos para encontrar automaticamente o ponto de operação onde ocorre a máxima produção de energia de saída. A Figura 25 mostra as curvas características de um determinado painel fotovoltaico, onde são ilustrados os valores de I e V para que a potência máxima de saída seja entregue a carga. O algoritmo deve fazer com que o painel somente enxergue o valor de uma carga que extraia a máxima potência do mesmo.

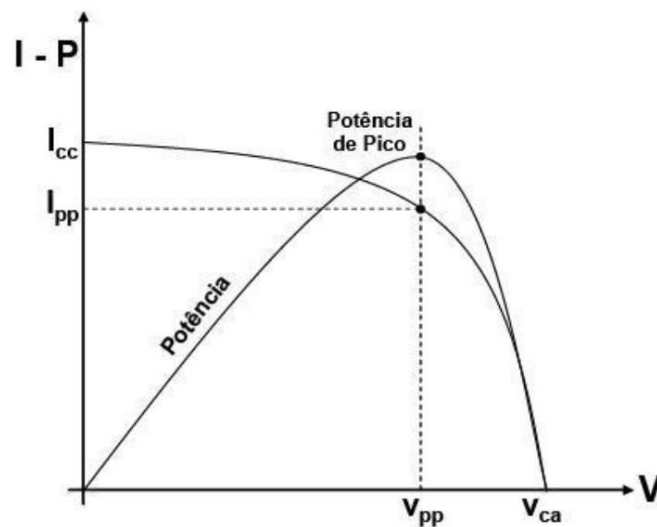


Figura 25: Curva característica de um painel fotovoltaico destacando seu MPP.
Fonte: Rocha, 2016

A localização do MPP não é conhecida, mas pode ser localizada por meio de modelos de cálculo ou por algoritmos de busca. Entretanto, são necessárias técnicas de MPPT para manter o ponto de operação do painel fotovoltaico em seu MPP (FARANDA E LEVA, 2008).

Dentre todas as técnicas de MPPT, as mais conhecidas e utilizadas são: métodos de inteligência artificial, voltagem constante, condutância incremental, perturbe & observe (comumente chamado de P&O), entre outras. Neste trabalho iremos focar apenas na técnica de perturbe & observe, devido a sua fácil implementação, fator este que o torna o método de MPPT mais utilizado. Este método tem como ponto negativo uma certa oscilação em torno do ponto de máxima potência, e em consequência, uma certa quantidade de potência perdida.

Brito et al. (2010) observou que o método P&O pode ser melhorado variando o passo de incremento da razão cíclica do conversor, otimizando a busca pelo MPP. Quando o passo é variável o método é chamado de P&O modificado. Um fluxograma básico deste método é apresentado na Figura 26. Vale ressaltar que ele necessita de sensores de tensão e corrente para funcionar.

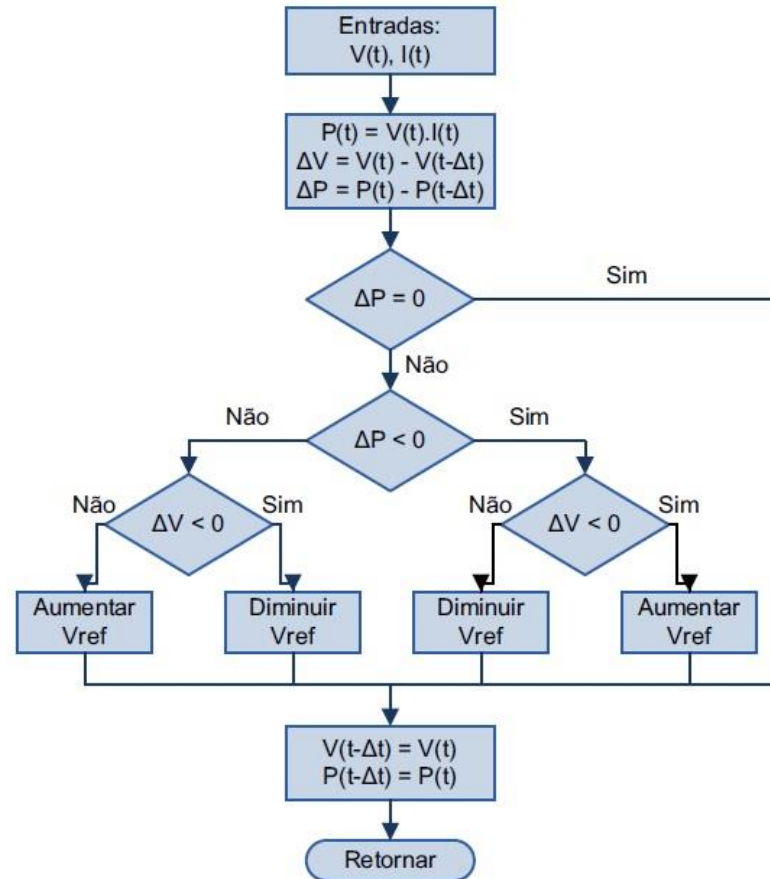


Figura 26: Fluxograma do método P&O.
Fonte: Brito et al., 2010

2.4.5 Sensores

Neste trabalho, não será utilizado um sensor específico para medir a potência total gerada pelo sistema, devido aos altos valores de corrente e tensão, mas para todos os casos, é possível contar com a precisa captação de dados do sistema de monitoramento presente nos mais recentes inversores de potência, que em alguns casos, além da captação, também controlam processos dentro de uma mesma planta fotovoltaica. Isso é possível pois as grandes empresas de inversores de potência, como a Fronius, enxergaram uma grande demanda de construção de seguidores automáticos do sol e passaram a disponibilizar para venda inversores de potência que comportam CLPs, sensores e diversos outros sistemas lógicos para facilitar sua construção.

2.4.6 Força do vento em diferentes partes do Brasil

Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, a região com maior potencial eólico é a Nordeste, onde os ventos chegam a velocidades médias de 6 a 9 m/s em condições normais do ambiente e em uma altura de 50 metros da superfície terrestre. Seu potencial é tão grande que representa mais que o dobro do potencial de qualquer outra região do Brasil.

A região Sudeste fica em segundo lugar no ranking do potencial eólico brasileiro, com regiões onde a média de velocidade do vento ao longo do ano pode variar de 6 a 8 m/s, como podemos observar na Figura 27.

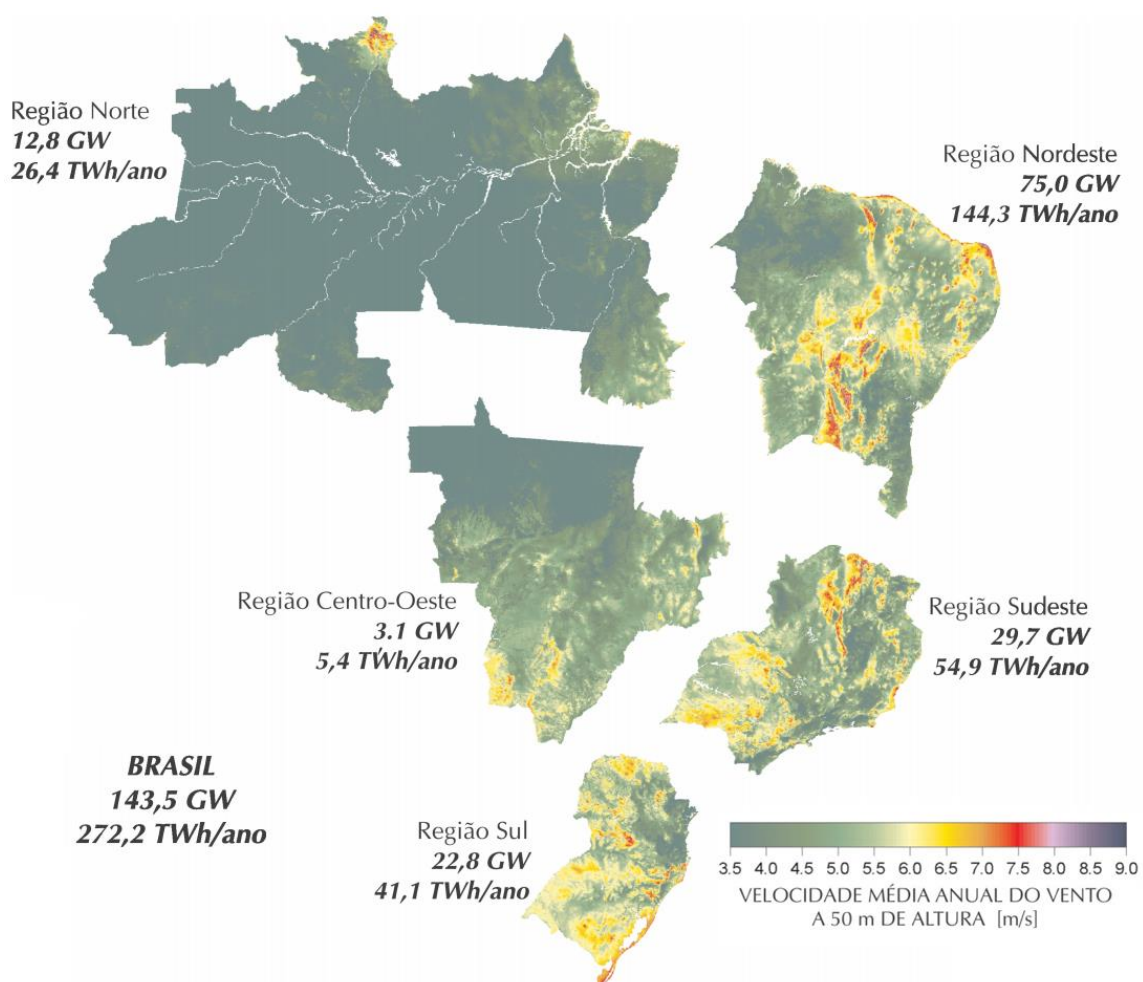


Figura 27: Potencial eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7 m/s.
Adaptado de: CRESESB, 2001, p. 44

Em alguns casos raros, como em fortes tempestades, os ventos na região Nordeste podem ultrapassar os 25 m/s.

3 DESENVOLVIMENTO

Com o auxílio de um software de elaboração de projetos 3D, um esboço da estrutura mecânica final foi projetada e pode ser observada na Figura 28.

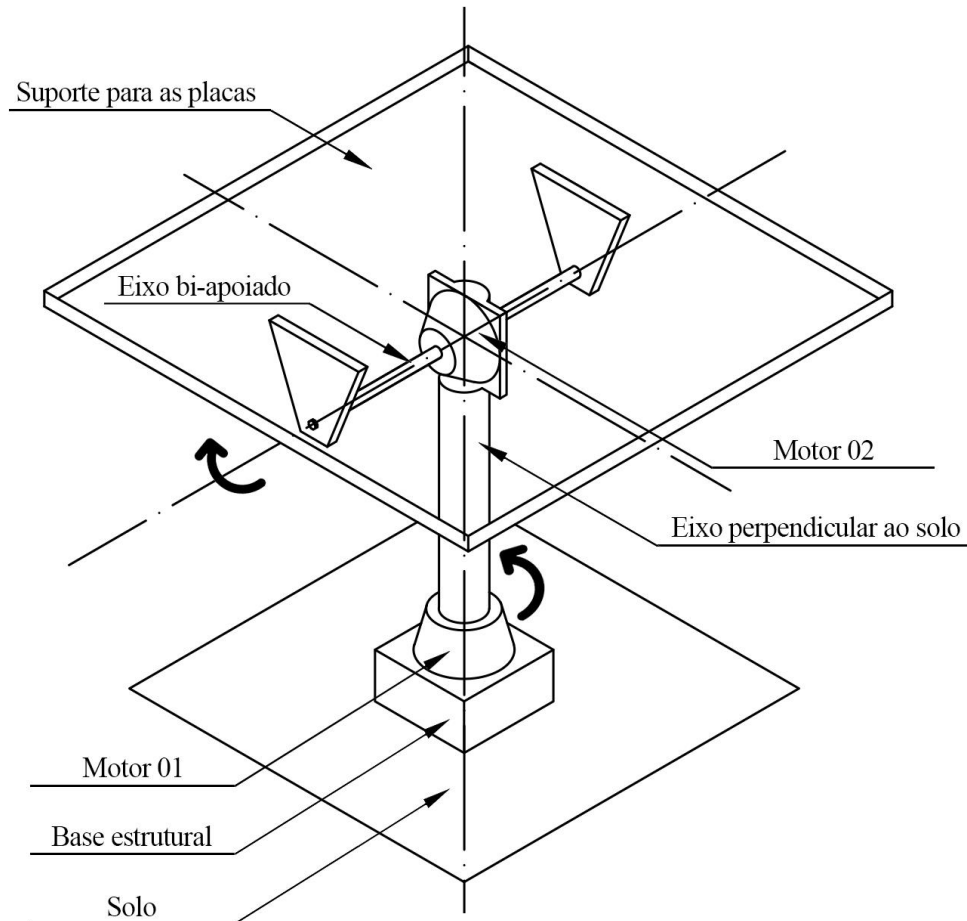


Figura 28: Estrutura mecânica proposta.
Fonte: Arquivo pessoal

O desenvolvimento deste trabalho será feito da seguinte maneira:

- Todos os cálculos serão feitos visando a construção teórica de dois sistemas hidráulicos com motores e número de placas fotovoltaicas diferentes.
- Definir um número de placas fotovoltaicas a serem utilizadas para os dois sistemas.
- Dimensionar as grandezas necessárias para cada acionamento (torque ou conjugado nominal, torque ou conjugado de partida, potência, etc.).
- Especificar os motores que se adequam ao funcionamento nominal do sistema, comparando o preço de aquisição de cada um.

- Calcular o tempo de retorno de investimento (payback) do sistema escolhido, comparando a energia gerada, energia consumida e o custo total do sistema.

3.1 Dimensionamento

3.1.1 Cálculo do conjugado de partida

Primeiro, foi dimensionado o motor 02, responsável pela rotação do conjunto que suportará todas as placas fotovoltaicas. As Figuras 29 e 30 exemplificam a parte superior do sistema proposto durante as posições onde seu momento, torque ou conjugado de partida é máximo e mínimo, respectivamente.

Vale ressaltar que tanto o motor 02 quanto o motor 01 trabalharão de maneira intermitente, isto é, somente irão rotacionar quando o algoritmo de MPPT verificar que a posição atual não é a de maior potência de saída.

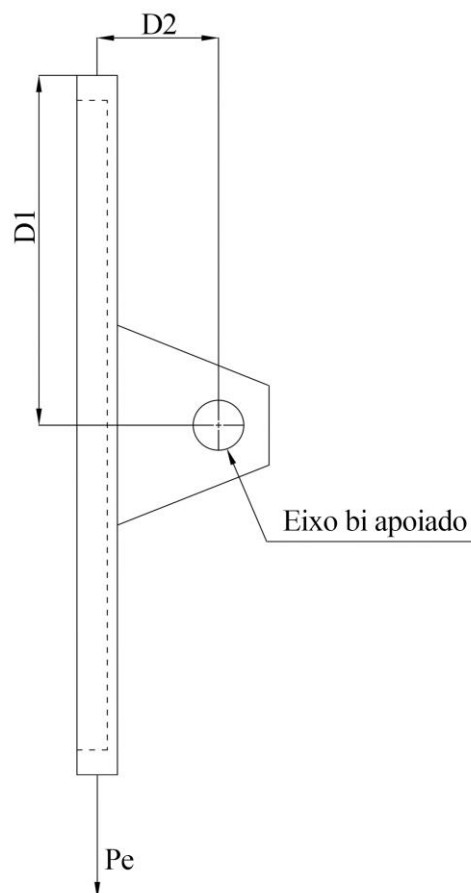


Figura 29: Sistema teoricamente com momento, torque ou conjugado de partida máximo (operação próxima aos horários de 07:00 e 17:00 horas)

Fonte: Arquivo pessoal

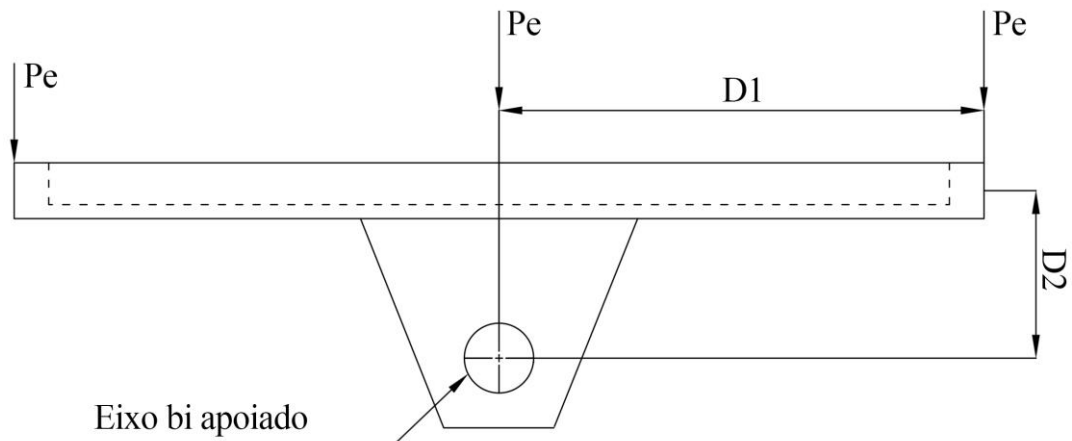


Figura 30: Sistema teoricamente com momento, torque ou conjugado de partida igual a zero (operação próxima ao horário de 12:00 horas)
Fonte: Arquivo pessoal

Para o dimensionamento do sistema mecânico supracitado, consideremos as seguintes informações:

- Será desprezado o peso da estrutura, considerando apenas o peso das placas.
- O número de placas foi definido com base em um arranjo geométrico retangular, visando uma estrutura final mais próxima possível de um quadrado, para diminuir o valor de $D1$ (distância entre o centro de gravidade e a extremidade do conjunto de placas no sentido de rotação) e, conseqüentemente, a altura mínima em que o sistema deve estar em relação ao solo. Além de melhor distribuir o peso das placas no sistema e não superdimensionar os motores, conforme ilustra a Figura 31.
- Serão feitos dois dimensionamentos de maneira separada, um com 78 e outro com 198 placas fotovoltaicas de 330 Wp de potência da marca *Canadian Solar*, feitas de silício policristalino, composta de 72 células e eficiência média de 16,97%.
- A massa de cada placa é igual a 22,40 kg.
- As dimensões de cada placa são iguais a 1960x992x35 mm.
- $D2$ será um valor sempre fixo (distância entre o eixo bi apoiado e o centro de gravidade de todas as placas fotovoltaicas) e igual a 50 centímetros.

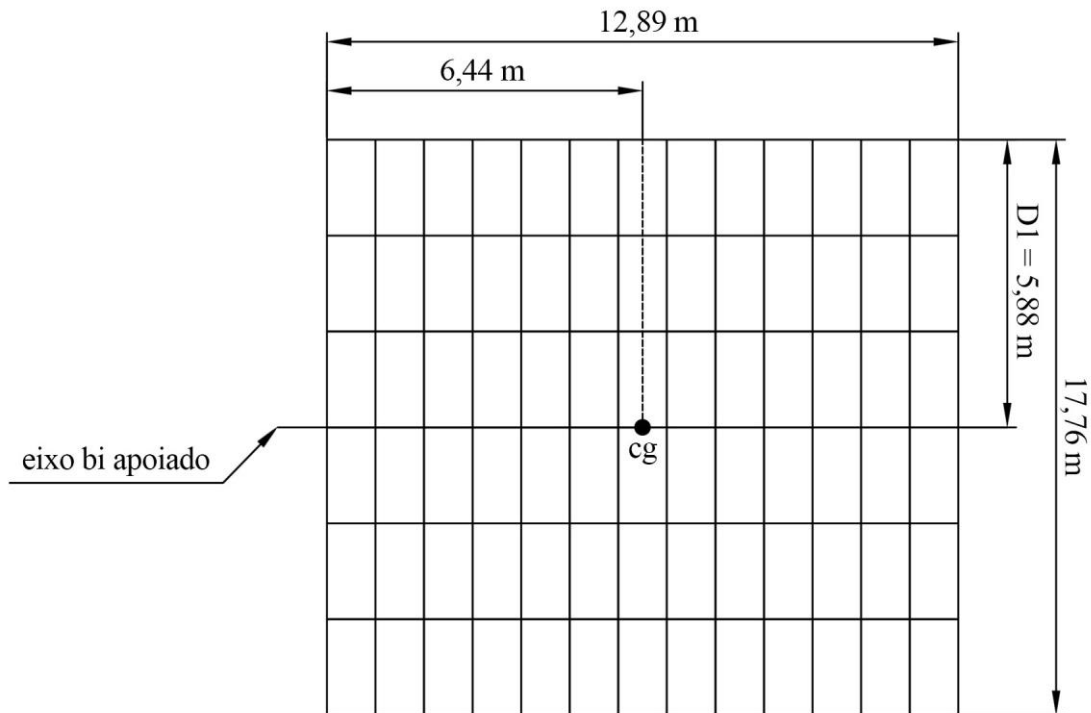


Figura 31: Vista superior da estrutura mecânica comportando 78 placas fotovoltaicas com centro de gravidade em “cg”.

Fonte: Arquivo pessoal

Tendo em vista todas as informações ditas anteriormente, o dimensionamento do motor será:

Para 78 placas fotovoltaicas:

$$C_p = M = F \cdot D2 \cdot \sin(\theta) = 78 \cdot 22,4 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,5 \text{ m} \cdot \sin(90^\circ)$$

$$C_p = 17140,03 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 1; \quad C_p = 8570,02 \text{ Nm} = 8,57 \text{ kNm}$$

Para 198 placas fotovoltaicas:

$$C_p = M = F \cdot D2 \cdot \sin(\theta) = 198 \cdot 22,4 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,5 \text{ m} \cdot \sin(90^\circ)$$

$$C_p = 43509,31 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 1; \quad C_p = 21754,65 \text{ Nm} = 21,75 \text{ kNm}$$

Onde:

- C_p = Conjugado de partida [Nm]
- M = Momento [Nm]
- F = Força [N]

- $D2$ = Distância do braço de alavanca [m]
- $\sin(\theta)$ = Ângulo formado entre os vetores força e distância

3.1.2 Cálculo da força do vento

Para calcular a influência da força do vento no sistema como um todo, consideremos em nosso dimensionamento a pior condição possível, ou seja, ventos de 9 m/s incidindo no sistema mecânico quando o mesmo está na posição de conjugado de partida máximo, com ambas as forças contribuindo para o mesmo sentido do momento de rotação, como mostra a Figura 32.

Consideremos ainda que a toda a força do vento será resumida em um único vetor que incide exatamente no centro de massa da metade superior das placas.

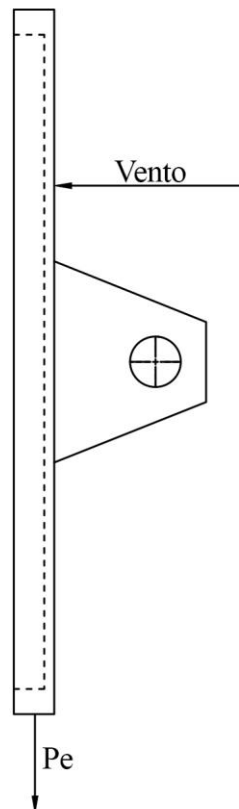


Figura 32: Influência da força do vento no sistema.
Fonte: Arquivo pessoal

Note que o vento somente incide na metade superior da placa e em somente um sentido, caso contrário poderíamos desprezá-la.

Tabela 5: Características físicas de cada sistema.

Quantidade de placas	Dimensões (m)	Área total (m ²)	Área crítica (m ²)	D1/2 (m)
78	12,89 x 11,76	151,58	75,79	2,94
198	17,85 x 21,56	384,85	192,42	5,39

Fonte: Arquivo pessoal

Onde área crítica é definida como a área de contato com o vento na pior das condições. Portanto, o cálculo da força do vento que influenciará no dimensionamento dos motores, será:

Para 78 placas fotovoltaicas:

$$F_v = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A = 1,23 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{\left(9 \frac{m}{s}\right)^2}{2} \cdot 75,79 m^2 = 3775,48 N$$

Para 198 placas fotovoltaicas:

$$F_v = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \cdot A = 1,23 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{\left(9 \frac{m}{s}\right)^2}{2} \cdot 192,42 m^2 = 9585,40 N$$

Onde:

- F_v = Força do vento [N]
- ρ = Densidade do ar [kg/m³]
- v = Velocidade do ar [m/s]
- A = Área da superfície de contato [m²]

Sendo assim, o real conjugado de partida do motor, considerando agora a influência que o sistema sofre do vento no pior dos casos, será:

Para 78 placas fotovoltaicas:

$$C_p = 8,57 kNm + F_v \cdot \frac{D1}{2} ; C_p = 8,57 kNm + 3,77 kN \cdot 2,94 m = 19,65 kNm$$

Para 198 placas fotovoltaicas:

$$C_p = 21,75 kNm + F_v \cdot \frac{D1}{2} ; C_p = 21,75 kNm + 9,58 kN \cdot 5,39 m = 73,38 kNm$$

3.2 Escolha dos motores

Considerando o motor 02, responsável por rotacionar o eixo paralelo ao solo e, consequentemente, o conjunto contendo todas as placas fotovoltaicas:

Foram orçados motores hidráulicos de 2 marcas, Bosch Rexroth e Parker. Os motores hidráulicos da marca Bosch Rexroth são da linha de motores de pistão radial Hägglunds CA full displacement. Mais especificamente, os motores foram o Hägglunds CA 70, cujo preço é de R\$129011,39, e o Hägglunds CA 210, que custa R\$300738,41, que como mostram as Figuras 33 e 34, se adequam ao bom funcionamento do sistema para as cargas de 78 e 198 placas solares fotovoltaicas dimensionadas anteriormente.

MOTOR DATA, HÄGGLUNDS CA

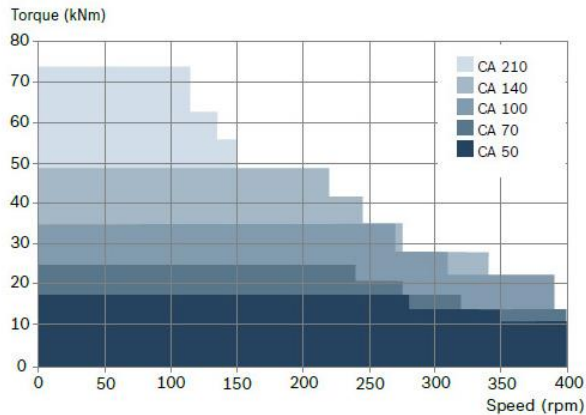
Motor Type ¹⁾	Full displacement					Displacement shift				Ratio
	Displacement (cm ³ /rev)	Specific Torque (Nm/bar)	Rated Speed (rev/min) ²⁾	Max Speed (rev/min)	Max Pressure (bar) ³⁾	Displacement (cm ³ /rev)	Specific Torque (Nm/bar)	Rated Speed** (rev/min)	Max Speed (rev/min)	
CA 50 20	1 256	20	400	400	350	-	-	-	-	-
CA 50 25	1 570	25	350	400	350	-	-	-	-	-
CA 50 32	2 010	32	280	400	350	-	-	-	-	-
CA 50 40	2 512	40	230	350	350	-	-	-	-	-
CA 50	3 140	50	200	280	350	1 570	25	200	280	1:2
CA 70 40	2 512	40	270	400	350	-	-	-	-	-
CA 70 50	3 140	50	225	320	350	1 570	25	225	320	1:2
CA 70 60	3 771	60	195	275	350	1 886	30	195	275	1:2
CA 70	4 400	70	180	240	350	2 200	35	180	240	1:2
CA 100 40	2 512	40	390	400	350	-	-	-	-	-
CA 100 50	3 140	50	320	400	350	-	-	-	-	-
CA 100 64	4 020	64	260	390	350	-	-	-	-	-
CA 100 80	5 024	80	220	310	350	2 512	40	220	310	1:2
CA 100	6 280	100	190	270	350	3 140	50	190	270	1:2
CA 140 80	5 024	80	245	340	350	-	-	-	-	-
CA 140 100	6 280	100	205	275	350	3 140	50	205	275	1:2
CA 140 120	7 543	120	180	245	350	3 771	60	180	245	1:2
CA 140	8 800	140	170	220	350	4 400	70	170	220	1:2
CA 210 160	10 051	160	105	150	350	5 026	80	105	150	1:2
CA 210 180	11 314	180	100	135	350	5 675	90	100	135	1:2
CA 210	13 200	210	85	115	350	6 600	105	85	115	1:2

Figura 33: Especificações técnicas da linha de motores *Hägglunds CA*.

Fonte: Bosch Rexroth, 2021

Wide operating range

Max intermittent torque and speed.



DIMENSIONS, MOTORS WITH SPLINES

Motor Type	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	Weight (kg)	Main Conn.	Drain Conn.
CA 50	464	312.5	390	46.5	N120x5x30x22x9H	175	SAE 1 1/4 "	BSP 3/4 "
CA 70	495	312.5	435	46.5	N120x5x30x22x9H	205	SAE 1 1/4 "	BSP 3/4 "
CA 100	560	399.5	470	135.5	N140x5x30x26x9H	265	SAE 1 1/4 "	BSP 3/4 "
CA 140	600	399.5	510	135	N140x5x30x26x9H	305	SAE 1 1/4 "	BSP 3/4 "
CA 210	600	501	510	156.5	N150x5x30x28x9H	395	SAE 1 1/4 "	BSP 3/4 "

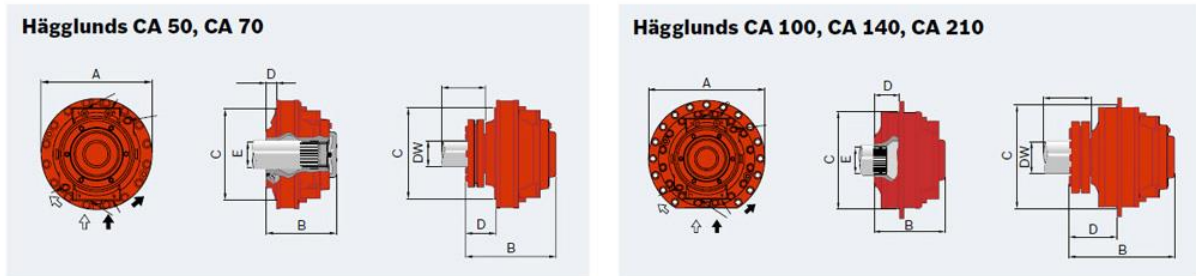


Figura 34: Especificações técnicas da linha de motores *Hägglunds CA*.

Fonte: Bosch Rexroth, 2021

Os motores hidráulicos da marca Parker são da linha de motores Calzoni de pistão radial MR e MRT. Mais especificamente, os motores foram o Calzoni MR6500, cujo valor é de R\$48437,00, e Calzoni MRT14000R, que custa R\$192640,00, que como mostram as Figuras 35 e 36, se adequam ao bom funcionamento do sistema para as cargas de 78 e 198 placas solares fotovoltaicas dimensionadas anteriormente.

Size Motor version	Displace- ment	Moment inertia of rotating parts	Theore- tical specific torque	Min. start. torque / Theore- tical torque	Maximum Pressure					Speed range		Maximum output power		Weight	
					input			A+B *	Drain	flushing		flushing			
					cont.	int.	peak			without	with	without	with		
					V	J		%	p	p	p	p	p		n
cm ³	kg cm ²	Nm/bar		bar	bar	bar	bar	bar	rpm	rpm	kW	kW	kg		
M R	33	32,1	4,32	0,50	90	250	300	420	400	5 (15 bar with "F1" shaft seal)	1-1400	1-1400	6,6	10	30
	57	56,4	4,76	0,90	90						1-1300	1-1300	11	17	30
	73	72,6	14,03	1,20	90						1-1200	1-1200	15	20	38
	93	92,6	15,11	1,50	90						1-1150	1-1150	17	25	38
	110	109,0	16,19	1,70	90						1-1100	1-1100	18	28	38
	125	124,7	56,88	2,00	90						1-900	1-900	17	25	46
	160	159,7	57,50	2,54	90						1-900	1-900	20	30	46
	190	191,6	58,20	3,05	90						1-850	1-850	24	36	46
	200	199,2	57,15	3,20	90						1-800	1-800	25	38	50
	250	250,9	60,80	4,00	90						1-800	1-800	32	48	50
	300	304,1	65,43	4,80	90						1-750	1-750	35	53	50
	350	349,5	225,90	5,57	90						1-640	1-640	41	62	77
	450	451,6	229,80	7,20	90						1-600	1-600	46	75	77
	600	607,9	265,07	9,70	90						1-520	1-520	56	84	97
	700	706,9	358,40	11,30	90						1-500	1-500	65	97	97
	1100	1125,8	451,50	17,90	90						0,5-330	0,5-330	77	119	140
	1600	1598,4	666,43	25,40	90						0,5-260	0,5-260	96	144	209
	1800	1809,6	854,10	28,80	90						0,5-250	0,5-250	103	153	209
	2400	2393,0	2835,40	38,10	90						0,5-220	0,5-220	120	183	322
	2800	2792,0	2975,70	44,50	90						0,5-215	0,5-215	127	194	322
3600	3636,8	4851,40	57,90	90					0,5-150	0,5-180	123	185	505		
4500	4502,7	5015,10	71,70	91					0,5-130	0,5-170	140	210	505		
6500	6460,5	11376,6	103,57	91					0,5-110	0,5-130	165	240	797		
7000	6967,2	11376,6	111,39	91					0,5-100	0,5-130	170	250	797		

Figura 35: Especificações técnicas da linha de motores *Calzoni MR*.
Fonte: Representante comercial Parker, 2021

MOTOR TYPE	DISPLACEMENT	SPECIFIC TORQUE	MAXIMUM PRESSURE				MAXIMUM SPEED		MAXIMUM OUTPUT POWER		WEIGHT
			CONT.	INTER.	PEAK	A+B	flushing		flushing		
							without*	with	without*	with	
			cc/rev	Nm/bar	bar	bar	bar	bar	rpm	rpm	
MRT 7100 P	7100	113	250	300	420	400	75	150	200	330	920
MRTF 7800 P	7809	124	210	250	350		70	130	174	280	
MRTE 8500 P	8517	136					60	120	164	290	
MRT 9000 P	9005	143	250	300	420		70	130	235	370	
MRTF 9900 P	9904	158	210	250	350		60	120	185	300	
MRTE 10800 P	10802	172					65	110	216	310	
MRTA 12000 P	12012	191	190	230	330		60	105	203	290	
MRT 13000 R	12921	206	250	300	420	400	65	110	220	355	1490
MRT 14000 R	13935	222					60	105	220	365	
MRTF 15200 R	15194	242					55	95	220	365	
MRTE 16400 R	16453	262					50	85	220	365	
MRTA 17500 R	17488	278					230	280	400	40	

Figura 36: Especificações técnicas da linha de motores *Calzoni MRT*.

Fonte: Representante comercial Parker, 2021

Considerando o motor 01, responsável por rotacionar o eixo perpendicular ao solo e, conseqüentemente, todo o conjunto mecânico:

Para o dimensionamento e escolha do motor 01, notemos que toda a força que atua no mesmo é axial ao seu eixo e, portanto, podemos desprezar a força do vento na estrutura, assim como novamente iremos desprezar também o peso da estrutura que comportará as placas fotovoltaicas, considerando somente o peso das placas somadas ao peso do motor 02 escolhido anteriormente. Tendo em vista essas informações, podemos escolher o mesmo motor sem sobrecarregar o sistema.

Como os motores das duas marcas são similares em relação a todos os parâmetros de operação, variando-se drasticamente apenas em relação ao preço e peso, iremos escolher os motores Calzoni MR6500 e Calzoni MRT14000R, para 78 e 198 placas fotovoltaicas, respectivamente, devido ao menor custo de aquisição.

Com relação a unidade hidráulica, mais especificamente com relação aos motores elétricos que irão acionar as bombas hidráulicas, foram escolhidos motores da marca WEG, da

linha W22 IR3 Premium de 15 CV para o sistema que comportará 78 placas e 20 CV para o sistema que comportará 198 placas, ambos com rendimento mecânico de 91%.

3.3 Gasto energético do sistema

Para calcular a quantidade de energia elétrica que o sistema necessitará para operar ao longo de um dia, em ambos os casos (78 e 198 placas fotovoltaicas), consideremos as duas situações descritas abaixo:

- No primeiro caso, consideremos que o sistema irá operar de maneira contínua, isto é, durante 100% do tempo de operação ao longo de um dia, o algoritmo de P&O, e consequentemente os motores e válvulas proporcionais, irão trabalhar sem interrupções, o que acarretará em um maior gasto energético.
- No segundo caso, iremos considerar que o sistema irá operar de maneira intermitente com um tempo pré-estabelecido durante a programação do algoritmo, ou seja, a cada intervalo de tempo o algoritmo de P&O irá determinar se o sistema está na posição de maior conversão de energia elétrica ou não, caso esteja, o sistema irá permanecer na mesma posição por mais um intervalo de tempo, sem nenhum acionamento, caso não esteja os motores irão se acionar até chegar na posição ideal, o que acarretará em um menor gasto energético. Para a execução deste trabalho, com a finalidade de facilitar os cálculos de consumo do sistema intermitente, iremos considerar que o intervalo de tempo do algoritmo P&O é de 10 minutos e que a cada intervalo os motores obrigatoriamente irão se ativar e permanecerão ativados por 01 minuto até chegarem na posição ideal.

Consideremos ainda que o sistema irá funcionar durante 10 horas/dia, das 07:00h até as 17:00h. Horário mais utilizado em plantas fotovoltaicas no Brasil pelo fato de ser o de maior nível médio de irradiância, em W/m², ao longo do ano. E também que o único gasto energético significativo será com relação ao motor que acionará a bomba hidráulica, os demais componentes são eletrônicos.

Sistema contínuo com 78 placas fotovoltaicas:

$$EA = \frac{PU}{\eta} \cdot h = \frac{(15 \cdot 0,736)}{0,91} \cdot 10 = 121,32 \text{ kWh/dia}$$

Sistema intermitente com 78 placas fotovoltaicas:

$$EA = \frac{PU}{\eta} \cdot h = \frac{(15 \cdot 0,736)}{0,91} \cdot 1 = 12,132 \text{ kWh/dia}$$

Sistema contínuo com 198 placas fotovoltaicas:

$$EA = \frac{PU}{\eta} \cdot h = \frac{(20 \cdot 0,736)}{0,91} \cdot 10 = 161,76 \text{ kWh/dia}$$

Sistema intermitente com 198 placas fotovoltaicas:

$$EA = \frac{PU}{\eta} \cdot h = \frac{(20 \cdot 0,736)}{0,91} \cdot 1 = 16,176 \text{ kWh/dia}$$

Onde:

- EA = Energia absorvida pela rede [kWh/dia]
- PU = Potência útil do motor [kW]
- η = Rendimento mecânico do motor [%]
- h = Horas de operação do motor em um dia

3.4 Geração de energia

Para o cálculo da conversão de energia elétrica por cada um dos dois sistemas, iremos considerar o nível de irradiância médio anual do município de Ouro Preto, próximo aos laboratórios da Escola de Minas (Latitude: 20.397886 Sul / Longitude: 43.508709 Oeste), obtidos através do aplicativo Google Maps (2021), para o plano inclinado ao norte, onde ângulo é igual a Latitude, realizar todos os cálculos para este sistema convencional e depois multiplicar pelo ganho obtido por Trevelin (2014) para sistemas com eixo duplo.

Note que o valor de energia elétrica gerada pelos sistemas contínuo e intermitente nos dois casos serão teoricamente iguais.

Os valores de irradiação solar média no plano inclinado, que também podem ser interpretados como horas de sol pico (HSP) ou tempo médio de irradiação solar, no município de Ouro Preto foram obtidos através do site CRESESB SunData (2021), e estão descritos no gráfico abaixo:

Latitude: 20,301° S
 Longitude: 43,549° O
 Distância do ponto de ref. (20,397886° S; 43,508709° O) : 11,6 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,46	5,73	4,82	4,45	3,96	3,84	4,07	4,96	5,15	5,18	4,83	5,32	4,81	1,89
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	20° N	4,99	5,48	4,92	4,92	4,74	4,82	5,02	5,75	5,44	5,05	4,48	4,82	5,04	1,27
<input type="checkbox"/>	Maior média anual	20° N	4,99	5,48	4,92	4,92	4,74	4,82	5,02	5,75	5,44	5,05	4,48	4,82	5,04	1,27
<input type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	15° N	5,15	5,59	4,93	4,85	4,58	4,62	4,82	5,60	5,41	5,13	4,60	4,98	5,02	1,02



Figura 37: Irradiação solar em diferentes planos para o município de Ouro Preto.
 Fonte: CRESESB, 2021

Energia elétrica gerada pelo sistema convencional contendo 78 placas:

$$E_g = P \cdot N \cdot T \cdot \eta = 330 \cdot 78 \cdot 5,04 \cdot 0,80 = 103,783 \text{ kWh/dia}$$

Energia elétrica gerada pelo sistema convencional contendo 198 placas:

$$E_g = P \cdot N \cdot T \cdot \eta = 330 \cdot 198 \cdot 5,04 \cdot 0,80 = 263,451 \text{ kWh/dia}$$

Energia elétrica gerada pelo sistema intermitente de eixo duplo contendo 78 placas:

$$E_g = 103,783 \cdot 1,392 = 144,466 \text{ kWh/dia}$$

Energia elétrica gerada pelo sistema intermitente de eixo duplo contendo 198 placas:

$$E_g = 263,451 \cdot 1,392 = 366,724 \text{ kWh/dia}$$

Onde:

- E_g = Energia elétrica convertida pelo sistema ao longo de um dia de operação [kWh/dia]
- P = Potência de cada placa fotovoltaica [Wp]
- N = Quantidade de placas fotovoltaicas
- T = Tempo médio de irradiação solar [horas]
- η = Coeficiente de rendimento elétrico em um sistema fotovoltaico [%]

3.5 Cálculo do tempo de retorno de investimento

Antes da realização do cálculo do tempo de retorno de investimento (payback) propriamente dito, precisamos antes detalhar cada uma das peças que irão compor os dois sistemas, assim como suas quantidades e preços.

Tabela 6: Discriminação dos componentes do sistema de 78 placas.

Item	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Total (R\$)
Placa Fotovoltaica	78	668,99	52181,22
Motor <i>Calzoni MR6500</i>	2	48437,00	96874,00
Unidade Hidráulica	1	148750,00	148750,00
Inversor <i>Fronius 20 kWp</i>	1	23249,07	23249,07
Total			321054,29

Fonte: Minha Casa Solar e representante Parker, 2021

Tabela 7: Discriminação dos componentes do sistema de 198 placas.

Item	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Total (R\$)
Placa Fotovoltaica	198	668,99	132460,02
Motor <i>Calzoni MRT14000R</i>	2	192640,00	385280,00
Unidade Hidráulica	1	156400,00	156400,00
Inversor <i>Fronius 50 kWp</i>	1	48583,92	48583,92
Total			722723,94

Fonte: Solius Energia Solar e representante Parker, 2021

Por causa da magnitude dos dois sistemas, os demais componentes, como tubos de conexão hidráulica e elétrica, válvulas hidráulicas, sensores de tensão e corrente, etc, serão desprezados para o cálculo do custo total do sistema.

Por causa da grande variação ao longo do tempo do preço da energia por parte da *CEMIG*, será considerado o valor do kWh como sendo R\$1,00 (valor médio aproximado ao longo do ano de 2020, já contendo os impostos, considerando uma instalação do tipo B3, onde as bandeiras variaram de verde à vermelho II).

Tendo em vista as informações acima, o tempo de retorno de investimento destes projetos serão:

Para o sistema intermitente de eixo duplo com 78 placas fotovoltaicas:

$$\text{Payback} = \frac{T_o}{([Eg - EA].C.D)} = \frac{321054,29}{([144,466 - 12,132] . 1 . 365)} = 6,65 \text{ anos}$$

Para o sistema intermitente de eixo duplo com 198 placas fotovoltaicas:

$$Payback = \frac{To}{([Eg - EA] \cdot C \cdot D)} = \frac{722723,94}{([366,724 - 16,176] \cdot 1 \cdot 365)} = 5,65 \text{ anos}$$

Para o sistema contínuo de eixo duplo com 78 placas fotovoltaicas:

$$Payback = \frac{To}{([Eg - EA] \cdot C \cdot D)} = \frac{321054,29}{([144,466 - 121,32] \cdot 1 \cdot 365)} = 38,00 \text{ anos}$$

Para o sistema contínuo de eixo duplo com 198 placas fotovoltaicas:

$$Payback = \frac{To}{([Eg - EA] \cdot C \cdot D)} = \frac{722723,94}{([366,724 - 161,76] \cdot 1 \cdot 365)} = 9,66 \text{ anos}$$

Onde:

- *Payback* = Tempo de retorno de investimento em anos
- *To* = Valor total do projeto [R\$]
- *Eg* = Energia gerada pelo sistema [kWh/dia]
- *EA* = Energia gasta pelo sistema [kWh/dia]
- *C* = Custo da energia elétrica [R\$]
- *D* = Quantidade de dias em um ano

4 CONCLUSÃO

4.1 Resultados

Os cálculos dos gastos extras de energia elétrica, realizados na seção 3.3, proporcionados pela introdução dos motores no sistema em comparação a um sistema fotovoltaico convencional, se mostrou muito relevante no sistema que contém 78 placas fotovoltaicas e trabalha de maneira contínua, pouco relevante para o sistema que contém 198 placas e trabalha de maneira contínua e quase irrelevante para os dois sistemas quando trabalham de maneira intermitente. O que mostra o quão importante é incluir na lógica de programação do sistema um mecanismo que evite que os motores fiquem em funcionamento sem muita ou nenhuma necessidade.

Com relação aos dados de energia elétrica gerada pelos sistemas, seção 3.4, é notável que a utilização do seguidor automático do sol é extremamente interessante e vantajosa do ponto de vista energético, pois aumenta consideravelmente a quantidade de energia produzida em um dia, mês ou ano.

A análise dos cálculos, obtidos na seção 3.5, nos permite analisar a diferença de investimento em cada um dos quatro sistemas, onde podemos observar que somente um dos sistemas, que contém 78 módulos e trabalha de maneira contínua, não possui viabilidade de implantação, pois possui um tempo de retorno de investimento maior que o tempo de vida útil de um sistema hidráulico, que é de 15 anos em média. Os demais sistemas são, não apenas possíveis de implantação, mas também investimentos muito atrativos para geração de energia em larga escala, pois possuem um *payback* competitivo no mercado de geração de energia solar.

A conclusão deste trabalho permitiu a observação de aspectos teóricos e da realidade na execução de um projeto, seja no cálculo do dimensionamento e tempo de retorno de investimento ou em todo o processo orçamentário dos motores hidráulicos, que por ser uma forma de energia de acionamento pouco utilizada em comparação a outras, possui um número limitado de empresas especializadas no ramo, acarretando no atraso do projeto, dificuldade de comunicação e preços elevados.

O trabalho também cumpriu seu objetivo de investigar teoricamente a viabilidade de usar a tecnologia hidráulica para um seguidor automático do sol em sistemas fotovoltaicos. Possibilitando também a aplicação de uma vasta gama de conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia de Controle e Automação. Outra experiência adquirida foi a de redigir um trabalho textual seguindo normas especificadas por um órgão competente.

4.2 Sugestões para futuros trabalhos

Uma das principais opções para futuros trabalhos, que fazia parte do escopo inicial deste projeto, é a comparação de sistemas com a mesma quantidade de placas e diferentes tipos de acionamento, isto é, uma comparação dos sistemas deste trabalho com sistemas idênticos, porém substituindo-se os motores hidráulicos por motores elétricos de corrente contínua e/ou alternada, motores de passo e servo motores, com o intuito de comparar quantitativamente a eficiência de cada um e descobrir qual é o melhor tipo de acionamento.

Uma outra possível evolução deste trabalho é a construção ou elaboração do código ou algoritmo lógico de controle do sistema hidráulico, seja através de CLPs ou Microcontroladores.

Um outro fator que merece uma futura averiguação é com relação a utilização de sensores para medir a velocidade do vento, ou ainda, integrar ao sistema uma pequena estação metrológica. A utilização de tais sensores possibilita que o sistema trabalhe de maneira mais segura, evitando que a força do vento na estrutura das placas ou módulos fotovoltaicos contribua tanto com o conjugado de partida ou torque dos motores hidráulicos. Com isso, todo o sistema hidráulico poderia ser redimensionado, obtendo ao fim motores menores e mais baratos, diminuindo o tempo de retorno de investimento e deixando o projeto ainda mais atrativo.

Outro possível avanço é com relação a comparação do sistema deste trabalho com sistemas convencionais de mesmo porte, ou seja, sistemas fixos, sem seguidores automáticos do sol. Além de calcular ao longo dos anos quando o investimento do seguidor solar se torna mais atrativo, isto é, quando o valor total em Reais de energia elétrica gerada, menos o custo de implantação do projeto somado aos custos de operação serão maiores comparados ao sistema convencional.

Uma outra opção de estudo interessante seria com o redimensionamento dos sistemas para a utilização de um conjunto de motores hidráulicos ao invés de apenas um motor para rotacionar cada eixo, com o intuito de dizer se tal prática torna o projeto mais barato e atrativo.

Por fim, seria interessante estipular os custos de manutenção do sistema deste trabalho ao longo de um mês ou ano, para deixar ainda mais preciso os cálculos de tempo de retorno de investimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-KHADER, M. M., BADRAN, O. O. e ABDALLAH, S. (2008) **Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan.** *Renewable and Sustainable Energy Reviewst.* 3rd Edition. p. 864–873.
- ALBOTEANU, L. (2015) **Pneumatic Tracking System for Photovoltaic Panel.** *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics.* 1st Edition. p. 32-39.
- ALBOTEANU, L. e MANOLEA, G. (2016) **Automatic Tracking System for Photovoltaic Panel based on Programmable Logic Controller.** *18th National Conference on Electrical Drives “CNAE”. ACTA Electrotechnica.* Volume 57, Special Edition. p. 394-398.
- Blue Sol Energia Solar (2017) **Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo.** [Online] Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo>. [Último acesso em: 20 de Janeiro de 2021].
- BOLTON, W. (2015) **Programmable Logic Controllers.** 6th Edition. USA: Newnes. p. 424.
- Bosch Rexroth (2021) **Catálogo de Produtos.** [Online] Disponível em: <https://www.boschrexroth.com/pt/br/produtos/grupos-de-produtos/hidraulica-industrial/motors/radial-piston-motors>. [Último acesso em: 27 de Janeiro de 2021].
- BRITO, M. A. G. et al. (2010) **Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos.** *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. INDUSCON.* 9th Edition. p. 6.
- Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – CRESESB (2001) **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** [Online] Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf. [Último acesso em: 24 de Janeiro de 2021]
- Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – CRESESB (2000) **Atlas Solarimétrico do Brasil.** [Online] Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf. [Último acesso em: 24 de Janeiro de 2021]
- Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – CRESESB (2021) **SunData v 3.0.** [Online] Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>. [Último acesso em: 17 de Março de 2021].

CUNHA, M. A. B. (2001) **Controle em Cascata de um Atuador Hidráulico: Contribuições Teóricas e Experimentais**. Tese apresentada em cumprimento parcial dos requisitos da Universidade Federal de Santa Catarina para o grau de Doutor em Engenharia Elétrica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie – DGS – German Solar Energy Society (2013) **Planning and installing photovoltaic system: a guide for installers, architects and engineers**. *Routledge, Oxfordshire*. 3rd Edition. p. 524.

Empresa de Pesquisa Energética do Governo Federal – EPE (2017) **Matriz energética do Brasil e do Mundo**. [Online] Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. [Último acesso em: 06 de Outubro de 2019].

FARANDA, R. e LEVA, S. (2008) **Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems**. *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*. 6th Edition. p. 446-455.

FESTO (2021) **Tratamento de ar comprimido**. [Online] Disponível em: https://www.festo.com/cms/pt-br_br/13543.htm. [Último acesso em: 20 de Janeiro de 2021].

Google (2021) **Maps**. [Online] Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/20%C2%B023'52.4%22S+43%C2%B030'31.4%22W/@-20.3978847,-43.5092562,19z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d-20.397886!4d-43.508709?hl=pt-BR>. [Último acesso em: 17 de Março de 2021].

JACOBSON, M. Z. (2009) **Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security**. *Energy & Environmental Science*. 2nd Edition. p. 148–173.

KE LI, et al. (2001) **Electro-hydraulic proportional control of twin-cylinder hydraulic elevators**. *Control Engineering Practice*. 4th Edition. p. 367-373.

Minha Casa Solar (2021) **Catálogo de Produtos**. [Online] Disponível em: <https://www.minhacasasolar.com.br/painel-solar/painel-de-285w-a-350w>. [Último acesso em: 19 de Janeiro de 2021].

Mundo Educação (2019) **Como funcionam as usinas solares?** [Online] Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/como-funcionam-as-usinas-solares.htm>. [Último acesso em: 19 de Janeiro de 2021].

OLIVEIRA, M. D. (2008) **Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal**. Dissertação apresentada em cumprimento parcial dos requisitos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para o grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Parker (2021) **Catálogo de Produtos**. [Online] Disponível em: <https://ph.parker.com/br/pt/products>. [Último acesso em: 19 de Dezembro de 2020].

Portal Solar (2018) **Tipos de painel solar fotovoltaico**. [Online] Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>. [Último acesso em: 20 de Janeiro de 2021].

RADZIEMSKA, E. (2003) **The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells**. *Renewable Energy*. 28th Edition. p. 1-12.

ROCHA, R. (2016). **Desenvolvimento de uma unidade de controle de potência para satélites artificiais utilizando simultaneamente as estratégias MPPT e DET para o controle da energia transferida dos painéis fotovoltaicos para a carga útil e baterias**. Relatório técnico científico. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.

RUSTEMLI, S. e DINCER, F. (2011) **Modeling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in Matlab/Simulink**. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 3rd Edition. p. 35-40.

Solius Energia Solar (2021) **Catálogo de Produtos**. [Online] Disponível em: <https://solius.com.br/>. [Último acesso em: 19 de Janeiro de 2021].

THOMAZ, R. A. (2017) **Demanda de Energia Elétrica no Brasil: 1995-2015**. Dissertação apresentada em cumprimento parcial dos requisitos da Universidade Federal do Paraná para o grau de Mestre em Ciências. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

TREVELIN, F. C. (2014) **Estudo Comparativo entre Métodos de Rastramento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos**. Monografia apresentada em cumprimento parcial dos requisitos da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo para o grau de Engenheiro Elétrico com ênfase em Eletrônica. São Carlos: Universidade de São Paulo.

WEG (2021) **Catálogo de Produtos**. [Online] Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/c/BR_MT. [Último acesso em: 15 de Janeiro de 2021].