



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS QUIXADÁ**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

**JOÃO MATEUS DIAS DO CARMO**

**OTIMIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR POR MEIO DA  
AUTOMAÇÃO DOS PAINÉIS SOLARES**

**QUIXADÁ**

**2021**

JOÃO MATEUS DIAS DO CARMO

OTIMIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR POR MEIO DA AUTOMAÇÃO DOS  
PAINÉIS SOLARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do CAMPUS QUIXADÁ da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Me. Francisco Helder Candido dos Santos Filho

QUIXADÁ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C285o Carmo, João Mateus Dias do.  
Otimização da captação de energia solar por meio da automação dos painéis solares / João Mateus Dias do Carmo. – 2021.  
80 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Engenharia de Computação, Quixadá, 2021.  
Orientação: Prof. Me. Francisco Helder Candido dos Santos Filho.

1. Energia solar. 2. Painel solar fotovoltaico. 3. Automação. I. Título.

CDD 621.39

---

JOÃO MATEUS DIAS DO CARMO

OTIMIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO DE ENERGIA SOLAR POR MEIO DA AUTOMAÇÃO DOS  
PAINÉIS SOLARES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do CAMPUS QUIXADÁ da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Francisco Helder Candido dos Santos  
Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Armando Cavalcante Aguilár  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Thiago Werley Bandeira da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus pais e meu irmão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por sempre estarem ao meu lado e me apoiarem em todas minhas decisões, e o mais importante, por sempre serem meu verdadeiro motivo de ter passado o que passei longe de casa, todas as dificuldades não foram em vão, foram para fazerem eles terem uma vida melhor do que sempre tiveram.

Agradeço ao meu pai, José Francisco Araújo do Carmo, por sempre ter me dado apoio, por todos seus esforços em sempre colocar sua família acima de tudo e todos. Agradeço também pelos pequenos atos que me faziam lembrar que tenho um grande Homem que posso chamar de Pai.

Agradeço à minha mãe, Francisca Serra Dias, por sempre ter me dado o apoio necessário para conseguir ficar sozinho em uma cidade nova e longe dela. Agradeço também pelo seu amor e carinho que sempre me fazia chorar quando lembrava da grande pessoa que Deus colocou para eu chamar de Mãe.

Agradeço ao meu irmão, Guilherme Augusto Dias do Carmo, por sempre ter me ajudado no que estava ao seu alcance e por tudo que fez por mim nesses anos em que estive longe de casa. Agradeço pelas ligações de vídeo que fazia sempre que sentia com saudade, pelas noites jogando comigo, pelos trabalhos que me ajudava a testar. Por tudo.

Agradeço aos meus avós, Titico, Laete, Luisa e meu falecido avô Raimundo, por sempre serem uma referência do que é ser uma pessoa sábia e me ajudarem nos momentos em que precisava tomar uma decisão importante.

Agradeço a todos meus tios e tias por sempre estarem ao meu lado, por sempre terem me ajudado no que eu precisava, sempre terem me dado todo apoio com a motivação necessária para continuar e saber que era pela minha família que eu estava passando pelas dificuldades.

Agradeço aos meus primos, Richarles Uermesson, Rayssa Duarte, Pedro Henrique, Maria Clara Dias, Patrício Farias, Ismael Aquiles, Letizia Kiefer, Leonardo Kiefer, Leonardo Araújo, Levi Araújo, Maria Cristina e Maria Clara por sempre estarem ao meu lado, me motivando nos momentos em que precisei para continuar estudando e me fazer lembrar do verdadeiro motivo de passar esse tempo longe da minha família. Agradeço também pelos momentos descontraídos que me fizeram esquecer dos problemas e me deram mais energia para prosseguir com essa jornada de cinco anos.

Agradeço também às minhas primas que conheci nesse último ano de faculdade, Maria Tatiane e Maria Taina, principalmente Tatiane por ter sido uma pessoa muito importante e

ter me ajudado nos momentos difíceis e por ser uma pessoa maravilhosa e compreensiva.

Agradeço a Jonas e Yvone por terem se tornados grandes amigos e por terem me dado o apoio que eu precisava para seguir meu sonho de morar na Alemanha. Agradeço também ao Jonas por ter me auxiliado no estudo do idioma Inglês no período em que estava presente no Brasil.

Agradeço aos restantes membros da minha família por me ajudarem nos momentos de necessidade enquanto estava longe de casa.

Agradeço ao meu orientador Me. Francisco Helder Candido dos Santos, por confiar em mim a realização deste trabalho e pelas orientações que precisei.

Agradeço ao professor Dr. Antônio Joel Ramiro de Castro por ter sido mais que um professor neste período, um grande amigo que me aconselhou nos momentos em que precisei de norteamento e conselhos de uma pessoa mais sábia.

Agradeço ao engenheiro do laboratório Abdul-Hamid, por ter me dado o apoio no desenvolvimento teórico e prático.

Agradeço ao professor das disciplinas de Inglês instrumental I e II, José Maria Rabelo Junior, por sempre ter me ajudado nessa tarefa árdua para mim que é o aprendizado de um idioma novo.

Agradeço a todos os funcionários da Secretaria, Venício Gleison Chaves de Oliveira, Gilmário da Silva Moura e Gerlyson Girão Borges por sempre terem me ajudado não apenas com seus trabalhos, com documentações e papelada burocráticas, mas sim por sempre ajudarem com pequenas ações que eu sabia que sempre que precisasse eu poderia ir falar com eles que iriam dar seu melhor para ajudar.

Agradeço ao funcionário Dias por sempre ter me recebido com um sorriso no rosto e conversado comigo sempre que podia, agradeço pela simpatia que saltava daquele homem e me fazia se sentir mais feliz.

Agradeço a todos os funcionários da Universidade Federal do Ceará por sempre terem se esforçado para deixar o melhor ambiente para os alunos.

Meus agradecimentos a todos que eu conheci nessa etapa da minha vida que passei na cidade de Quixadá que somaram na minha vida, alguns amigos de verdade que levarei para toda minha vida.

*"Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim."*

(Nikola Tesla)

## RESUMO

A captação da energia solar tem várias abordagens, as quais vem sofrendo mudanças durante o decorrer dos anos com o surgimento de novas tecnologias e conceitos. A captação via painéis solares é um método bastante conhecido pois é uma tecnologia em ascensão nos dias atuais, tanto pela facilidade de implantação, pois a instalação e configuração dos painéis solares são simples, quanto pela sua característica ambiental, pois os danos à natureza é insignificantes em relação a outras formas de gerações energéticas, sendo considerada uma energia limpa, diferente de tecnologias que usam a queima de combustíveis fósseis e hidrelétricas. Neste trabalho será abordado a fundamentação teórica sobre a movimentação de painéis solares, com objetivo de alcançar uma maior eficiência energética do sistema, sendo comparado com cenários tendo painéis fixos, mostrando que o ganho energético é superior ao custo de se movimentar os painéis solares. Tendo como principal contribuição deste trabalho, o desenvolvimento de um sistema capaz fazer captação solar a partir da movimentação de atuadores, com objetivo de otimizar o ângulo de inclinação do painel solar com o ângulo de incidência dos raios solares. E por último será realizado uma análise em cima dos resultados obtidos da implementação, mostrando-se promissora a estratégia de movimentação dos painéis solares. Além de sugestões de integração do sistema com conceitos como internet das coisas.

**Palavras-chave:** Energia solar. Painel solar fotovoltaico. Automação.

## ABSTRACT

The capture of solar energy has several approaches, which have undergone changes over the years with the emergence of new technologies and concepts. The capture via solar panels is a well known method because it is a technology on the rise nowadays, both because of the ease of implantation, because the installation and configuration of the solar panels are simple, and because of their environmental characteristics, as the damage to nature is negligible in relation to other forms of energy generations, being considered a clean energy, different from technologies that use the burning of fossil and hydroelectric fuels. In this work, the theoretical basis on the movement of solar panels will be addressed, with the objective of achieving greater energy efficiency of the system, being compared with scenarios having fixed panels, showing that the energy gain is higher than the cost of moving the solar panels. With the main contribution of this work, the development of a system capable of making solar capitation from the movement of actuators, in order to optimize the angle of inclination of the solar panel with the angle of incidence of the sun's rays. Finally, an analysis will be carried out based on the results obtained from the implementation, showing a promising strategy for moving solar panels. In addition to suggestions for integrating the system with concepts such as internet of things.

**Keywords:** Solar energy. Photovoltaic solar panel. Automation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo desenvolvido . . . . .	21
Figura 2 – Diagrama Esquemático . . . . .	22
Figura 3 – Configuração Proposta . . . . .	22
Figura 4 – Horário Local Solar . . . . .	24
Figura 5 – Sistema de controle do posicionamento solar . . . . .	24
Figura 6 – Dados medidos do painel fixo . . . . .	25
Figura 7 – Dados laboratoriais obtidos do painel móvel . . . . .	25
Figura 8 – Comparação do painel fixo com o painel móvel . . . . .	26
Figura 9 – Relação Terra-Sol . . . . .	27
Figura 10 – Equation of Time <i>Equation of Time</i> (ET) . . . . .	29
Figura 11 – Declinação solar durante o ano . . . . .	31
Figura 12 – Gráfico <i>Day Light</i> . . . . .	32
Figura 13 – Ângulos solares e caminho solar do nascente ao poente . . . . .	34
Figura 14 – Definição da massa de ar . . . . .	36
Figura 15 – Radiação direta no painel horizontal e inclinado. . . . .	37
Figura 16 – Níveis de energia . . . . .	40
Figura 17 – Efeito da impureza inserida . . . . .	40
Figura 18 – Curva característica do diodo de silício . . . . .	41
Figura 19 – Funcionamento da célula fotovoltaica . . . . .	42
Figura 20 – Circuito equivalente a uma célula solar única . . . . .	42
Figura 21 – Curva característica Tensão x Corrente . . . . .	43
Figura 22 – Curva característica Tensão x Potência . . . . .	44
Figura 23 – Curva característica <i>Light Dependent Resistor</i> (LDR) série GL5516 . . . . .	46
Figura 24 – Circuito LDR . . . . .	46
Figura 25 – <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM) . . . . .	47
Figura 26 – Distribuições dos sensores . . . . .	48
Figura 27 – Ângulo entre feixe incidente e o vetor normal a face do painel solar 2D . . . . .	49
Figura 28 – Malha do controle PID genérico . . . . .	50
Figura 29 – Disposição dos elementos para cálculo do ganho . . . . .	50
Figura 30 – Curva dos modelos em série . . . . .	51
Figura 31 – Curva dos modelos em paralelo . . . . .	52

Figura 32 – Modelo matricial com $N_{PM}$ ramos paralelos, como cada ramo $N_{SM}$ células em série . . . . .	53
Figura 33 – Modelagem do ambiente inicial . . . . .	54
Figura 34 – Fluxograma da metodologia . . . . .	55
Figura 35 – Relação entre a luminosidade real e a regressão . . . . .	60
Figura 36 – Máquina de estado do sistema desenvolvido . . . . .	62
Figura 37 – Obtenção do ângulo de inclinação $\beta$ via ângulo obtido pelo sistema $\theta$ e via ângulo horário $h$ . . . . .	63
Figura 38 – Simulador usado para captação dos ângulos solares . . . . .	64
Figura 39 – Hardware desenvolvido no simulador . . . . .	65
Figura 40 – Painel solar usado no simulador . . . . .	65
Figura 41 – Fluxograma com os passos para um sistema ideal . . . . .	66
Figura 42 – Fluxograma com os passos para o sistema desenvolvido . . . . .	66
Figura 43 – Relação do ângulo azimute durante o dia . . . . .	69
Figura 44 – Relação do ângulo altitude durante o dia . . . . .	69
Figura 45 – Relação enter a radiação por metro quadrado com o horário do dia . . . . .	70
Figura 46 – Precisão de inclinação no eixo Norte-Sul . . . . .	70
Figura 47 – Precisão de inclinação no eixo Leste-Oeste . . . . .	71
Figura 48 – Precisão do ângulo $\beta$ inclinação no eixo Norte-Sul . . . . .	71
Figura 49 – Precisão do ângulo $\beta$ inclinação no eixo Leste-Oeste . . . . .	72
Figura 50 – Precisão do ângulo $\beta$ geral . . . . .	72
Figura 51 – Relação da radiação captada ideal com a radiação captada obtida . . . . .	76
Figura 52 – Gráfico de tensão x corrente para os valores ideais e obtidos . . . . .	76
Figura 53 – Relação da potência obtida com a potência ideal durante o intervalo de tempo . . . . .	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados com o trabalho proposto . . . . .	26
Tabela 2 – Comportamento dos ângulos solares e da potência em relação ao horário do dia	68
Tabela 3 – Dados do painel fixo . . . . .	74
Tabela 4 – Dados do painel móvel ideal . . . . .	74
Tabela 5 – Dados do painel móvel obtido . . . . .	74
Tabela 6 – Relação entre os dados obtidos . . . . .	74
Tabela 7 – Dados finais do painel móvel ideal . . . . .	75
Tabela 8 – Dados finais do painel móvel obtido . . . . .	75
Tabela 9 – Cronograma do Trabalho de conclusão de curso I . . . . .	78
Tabela 10 – Cronograma do Trabalho de conclusão de curso II . . . . .	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternative Current</i>
AST	<i>Apparent Solar Time</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DS	<i>Daylight Saving</i>
EQ	<i>Equinócio</i>
ET	<i>Equation of Time</i>
FF	<i>Fill Factor</i>
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
LED	<i>Light-Emitter Diode</i>
LL	<i>Local Longitude</i>
LST	<i>Local Standard Time</i>
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
PID	<i>Proporcional Integral Derivativo</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SI	<i>Solstício de Inverso</i>
SL	<i>Standard Longitude</i>
SoC	<i>System-on-a-chip</i>
SV	<i>Solstício de Verão</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V$	Tensão elétrica
$A$	Corrente elétrica
$W$	Potência elétrica
$\Omega$	<i>ohm</i>
$G_{sc}$	Constante Solar
$G_{on}$	Radiação solar recebida em uma área unitária por uma unidade de tempo fora da atmosfera
$G_t$	Radiação total na superfície inclinada
$G_{Bt}$	Radiação absorvida pelos feixes diretos na superfície inclinada
$G_{Dt}$	Radiação absorvida pelos feixes difusos
$G_{Gt}$	Radiação absorvida pelos feixes refletidos pelo chão
$G_B$	Radiação absorvida pelos feixes diretos na superfície horizontal
$R_B$	Fator de inclinação da radiação do feixe
$G_{Bn}$	Radiação do feixe de incidência
$G_D$	Radiação difusa na superfície horizontal
$G_{GR}$	Radiação difusa do Céu
$G_{Gr}$	Radiação refletida pelo solo isotrópico
$h$	Constante de Planck ( $6.62607004 \times 10^{-34} m^2 kg/s$ )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	18
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	18
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	18
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	18
<b>2</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	20
<b>2.1</b>	<b>Sistema automático de rastreamento solar</b>	20
<b>2.2</b>	<b>Projeto e execução experimental de um sistema de rastreamento solar automático de eixo duplo inteligente baseado em microcontrolador (<math>\mu C</math>)</b>	21
<b>2.3</b>	<b>Sistema de rastreamento solar multi-eixo automático de baixo custo para melhoria de desempenho em painéis solares de suporte vertical usando placa Arduino</b>	23
<b>2.4</b>	<b>Relação entre implementações e a implementação proposta</b>	26
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	27
<b>3.1</b>	<b>Sol</b>	27
<b>3.2</b>	<b>Solarimetria</b>	28
<i>3.2.1</i>	<i>Equacionamento do tempo</i>	28
<i>3.2.2</i>	<i>Horário padrão local (Local Standard Time (LST))</i>	29
<i>3.2.3</i>	<i>Horário solar aparente (Apparent Solar Time (AST))</i>	29
<i>3.2.4</i>	<i>Ângulos solares</i>	30
<i>3.2.4.1</i>	<i>Declinação <math>\delta</math></i>	31
<i>3.2.4.2</i>	<i>Ângulo Horário <math>h</math></i>	32
<i>3.2.4.3</i>	<i>Ângulo de altitude solar <math>\alpha</math></i>	33
<i>3.2.4.4</i>	<i>Ângulo solar azimute <math>z</math> e horário solar do meio-dia</i>	33
<i>3.2.5</i>	<i>Radiação</i>	33
<i>3.2.5.1</i>	<i>Radiação solar extraterrestre</i>	34
<i>3.2.5.2</i>	<i>Atenuação Atmosférica</i>	35
<i>3.2.5.3</i>	<i>Radiação total em superfícies inclinadas</i>	36
<b>3.3</b>	<b>Hardware</b>	39
<i>3.3.1</i>	<i>Painéis fotovoltaicos</i>	39
<i>3.3.1.1</i>	<i>Semicondutores</i>	39

3.3.1.2	<i>Diodos e polarizações</i>	41
3.3.1.3	<i>Funcionamento das células fotovoltaicas</i>	41
3.3.1.4	<i>Fator de preenchimento</i>	44
3.3.1.5	<i>Potência máxima, corrente máxima e tensão máxima</i>	44
3.3.2	<i>Sensor LDR a curva característica</i>	46
3.3.3	<i>Sistema integrado</i>	47
3.3.4	<i>Motores</i>	47
3.4	<i>Software</i>	48
3.4.1	<i>Rastreamento solar via software</i>	48
3.4.2	<i>Controle dos motores via parâmetros de rastreamento</i>	49
3.4.2.1	<i>Controle Proporcional Integral Derivativo (PID)</i>	49
3.4.3	<i>Comparação de sinais para análise de eficiência</i>	50
3.5	<i>Associação de painéis solares (Matriz de painéis)</i>	51
3.5.1	<i>Associação em série</i>	51
3.5.2	<i>Associação em paralelo</i>	51
3.5.3	<i>Associação em matriz</i>	52
3.6	<i>Modelagem inicial do ambiente dos painéis solares</i>	53
4	<b>PROCEDIMENTO METODOLÓGICO</b>	55
4.1	<b>Mensurar variáveis do suporte fixo</b>	55
4.2	<b>Definição inicial do modo de operação padrão</b>	56
4.3	<b>Mensurar variáveis do suporte móvel</b>	56
4.4	<b>Cálculo comparativo da eficiência entre o modelo fixo e móvel</b>	56
4.5	<b>Armazenamento das variáveis da configuração mais eficiente</b>	57
4.6	<b>Alterar o modo de operação</b>	57
4.7	<b>Buscar o modo de operação mais eficiente na base de dados</b>	57
4.8	<b>Define o modo mais eficiente como modo de operação padrão</b>	58
5	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	59
5.1	<b>Sensores</b>	59
5.1.1	<i>Captação da luminosidade</i>	59
5.1.2	<i>rastreamento solar</i>	60
5.2	<b>Atuadores</b>	61
5.2.1	<i>Definição do ponto de operação</i>	61

5.2.2	<i>Controles dos atuadores</i> . . . . .	61
5.3	<b>Máquina de estado do sistema</b> . . . . .	62
5.4	$\beta$ - <b>ângulo de inclinação</b> . . . . .	63
5.5	<b>Simuladores</b> . . . . .	64
5.5.1	<i>Simulação da posição solar</i> . . . . .	64
5.5.2	<i>Simulação dos circuitos elétrico e painel solar</i> . . . . .	64
5.5.3	<i>Obtenção dos dados via simulação</i> . . . . .	65
5.5.3.1	<i>Fluxograma para o sistema ideal</i> . . . . .	66
5.5.3.2	<i>Fluxograma para o sistema desenvolvido</i> . . . . .	66
6	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	68
6.1	<b>Comportamento do ângulos solares e radiação</b> . . . . .	68
6.1.1	<i>Ângulos solares</i> . . . . .	69
6.1.2	<i>Radiação solar</i> . . . . .	69
6.2	<b>Precisão do sistema na determinação da posição solar</b> . . . . .	70
6.3	<b>Comparação pontual entre um painel fixo, móvel ideal e o desenvolvido</b>	73
6.4	<b>Comparação diária entre a movimentação ideal e a desenvolvida</b> . . . .	74
7	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	77
8	<b>CRONOGRAMA DO PROJETO</b> . . . . .	78
8.1	<b>Cronograma do Trabalho de conclusão de curso I</b> . . . . .	78
8.2	<b>Cronograma do Trabalho de conclusão de curso II</b> . . . . .	78
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	79

# 1 INTRODUÇÃO

A captação de energia solar em usinas é feita pelos painéis fotovoltaicos que são responsáveis pela conversão da radiação solar captada em energia elétrica, desta forma podemos associar diretamente que a eficiência desde desde processo está diretamente relacionado a quantidade de radiação que se é capaz de captar, ou seja, quanto maior a área de contado e o ângulo de incidência solar. Atualmente em usinas solares estes painéis ficam fixos em uma plataforma e com um ângulo fixo, desta forma em certos horários do dia o painel terá seu rendimento afetado pois por decorrência da movimentação solar o ângulo de incidência não estará alinhado com o ângulo do painel solar.

Tendo em vista um melhor rendimento na geração da energia solar pelas usinas, se faz necessário uma melhor maneira de captar esse recurso, como o modelo de Painéis Móveis, que são modelos capaz de fazer uma rotações para acompanhar o ângulo de incidência solar, desta forma é possível ter uma melhoria no rendimento e maximizar os ganhos.

O conceito de mover o painel solar não é algo novo, mas a forma que esse procedimento é realizado impacta diretamente no rendimento, pois nos dias atuais temos desde implementações completamente mecânica até implementações de modelos eletrônicos com uma maior precisão. Sabendo disso podemos afirmar que cada modelo tem suas vantagens e desvantagens entre si, assim é desejável pelas usinas sempre fazer uso do modelo mais eficiente nas suas estações de captação solar.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 *Objetivo Geral*

O principal objetivo é fazer a relação entre as diversas formas do comportamento dos painéis solares durante o dia, ou seja, montar uma relação entre as abordagens de modelos fixos e modelos móveis, assim ser capaz de mensurar numericamente a eficiência de cada modelo e inferir qual modelo torna viável o ganho energético positivo e com qual configuração esse modelo se torna mais eficiente.

### 1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar a construção do modelos fixo.

- Realizar a construção dos modelos móveis.
- Fazer a comparação entre os modelos para inferir qual modelo é viável para o ganho energético em termos de consumo e geração de energia.
- Otimizar o modelo mais eficiente encontrado no tópico anterior.

## 2 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção serão abordados trabalhos relacionados que foram usados como base teórica e metodológica para o desenvolvimento dos modelos que serão implementados como solução da problemática proposta na seção 1.1.1, desde a base do *Hardware* até o *Software* nele contido.

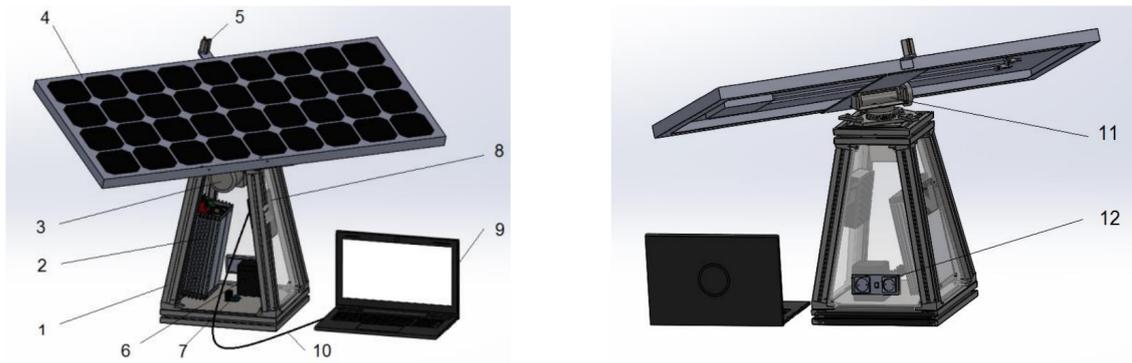
### 2.1 Sistema automático de rastreamento solar

Na implementação proposta no trabalho (CANALE *et al.*, 2019) foi desenvolvido um sistema autônomo capaz de fazer o rastreamento solar via sensoriamento e fazer a rotação do painel solar com auxílio de uma base centralizada de dados, na implementação (CANALE *et al.*, 2019) foi usado um *laptop* para fazer o rastreamento de pontos para o uso do inversor de sinal, equipamento usado em sistemas de geração elétrica, pode ser encontrado mais comumente em usinas eólicas e solares. A energia solar pela forma que é captada tem como resultado uma *Direct Current* (DC). Desta forma, se faz necessário um tratamento deste sinal para um sinal *Alternative Current* (AC).

Fazendo uma visualização prévia da lista de equipamentos usados e sua modelagem respectivamente, temos os materiais listados abaixo:

1. Gabinete para o controlador *Maximum power point tracking* (MPPT), inversor, bateria para microcontrolador e Ponte-H;
2. Inversor;
3. Motor *Pan*;
4. Painel Solar;
5. Sensor foto-resistivo no suporte em forma de cruz;
6. Bateria de 12V DC gel;
7. O sistema de comando e controle, a ponte-H e o microcontrolador;
8. Controlador de carga MPPT;
9. Laptop para traçar a quantidade de energia produzida em um dado instante;
10. Cabo *Universal Serial Bus* (USB) para conexão entre o *laptop* e o controlador de carregamento MPPT;
11. Motor *Tilt*;
12. Tomada do inversor 230V AC;

Figura 1 – Modelo desenvolvido



Fonte: Canale *et al.* (2019)

Quando é feita a análise da figura 1 referente ao modelo desenvolvido, nota-se a finalidade do equipamento desenvolvido como o uso doméstico, pois temos todo um aparato técnico de um inversor de sinal diretamente associado a um painel solar integrado ao modelo, desta forma torna-se financeiramente inviável em termos de usinas solares, pois o aparato de um conjunto de sensores e um inversor de sinal por um painel solar se torna inviável quando falamos em larga escala, pois exige uma grande quantia financeira para tal implementação, desta maneira o objetivo deste trabalho é fazer o estudo de como fazer alterações e otimizações nos modelos encontrados para adaptá-los para uma usina de captação solar em larga escala.

## 2.2 Projeto e execução experimental de um sistema de rastreamento solar automático de eixo duplo inteligente baseado em microcontrolador ( $\mu C$ )

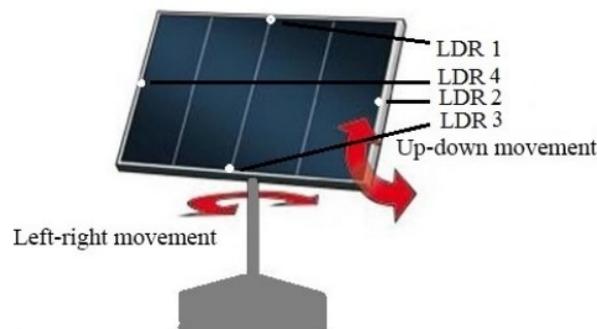
A implementação desenvolvida no trabalho (DAS *et al.*, 2015) tem como proposta fazer um sistema de rastreamento solar via sensoriamento usando quatro LDR e um microcontrolador, na qual foi usado o Atmega-8L (Atmel Corporation, 2013). O sistema consiste em uma fonte de energia alimentando o sistema de rastreamento, o microcontrolador e os motores de rotação do painel solar, logo após a energia ser captada no painel solar ela é injetada na rede elétrica via inversor de sinal ou é inserida em uma bateria para o armazenamento, como mostrado na figura 3.

O esquemático do projeto demonstrado na figura 2 deixa bem claro como é a disposição dos sensores LDR para o sistema de rastreamento solar, e como será rotacionado o painel solar em torno do seus próprios eixos em relação a movimentação solar durante o dia.

Quando é feita a disposição dos sensores LDR responsáveis pelo rastreamento solar desta maneira se faz necessário um requisitos importantes para seu correto funcionamento,

o painel solar deve ter uma área relativamente alta, pois como os sensores LDR estão nas extremidades, caso o painel solar tenha uma área pequena a probabilidade de haver leituras iguais ou tão próximas que a granularidade da representação numérica não consiga representar se torna alta, desta forma o controlador não é capaz de fazer o rastreamento de forma correta e, conseqüentemente, não consiga posicionar o painel com o ângulo de incidência solar da forma mais eficiente.

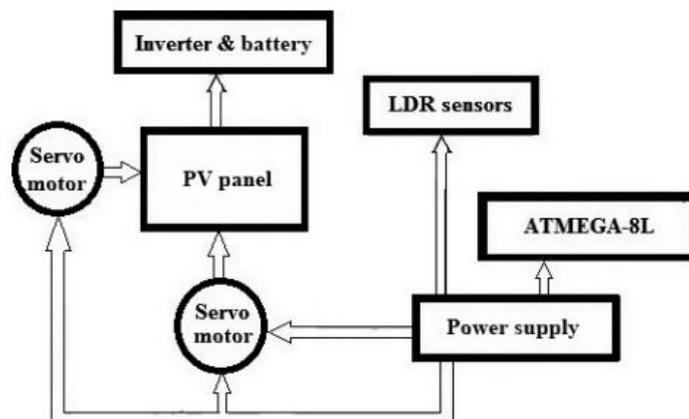
Figura 2 – Diagrama Esquemático



Fonte: Das *et al.* (2015)

A configuração proposta pelo autor (DAS *et al.*, 2015) como foi descrito acima consiste em uma fonte energética alimentando todo o sistema de rastreamento e movimentação do painel solar, tendo como resultado final um valor de saída que poderá ser injetado na rede elétrica ou armazenado em uma bateria. Mas o ponto que é desejado trabalhar nesta seção é a relação da tensão de entrada ( $V_0$ ) e a tensão de saída ( $V_f$ ), sendo a  $V_0$  a fonte de energia e  $V_f$  como a tensão gerada pelo painel solar, como é mostrado na figura 3.

Figura 3 – Configuração Proposta



Fonte: Das *et al.* (2015)

Fazendo uma breve análise das tensões  $V_0$  e  $V_f$  podemos fazer uma relação entre elas

da forma a constar numericamente se o sistema está tendo ganho ou perda em um determinado tempo, esta representação pode ser facilmente equacionada 2.1. Desta forma sendo o ganho ( $G$ ) do sistema pode ser calculado em função das duas variáveis  $V_0$  e  $V_f$ .

$$G = \frac{V_f}{V_0} \quad (2.1)$$

Quando é feito arranjo na equação via esta razão entre as tensões de saída e de entrada, temos três casos práticos que é necessário avaliar.

- $G > 1$ : Ganho, pois a tensão gerada é maior do que a tensão que está sendo fornecida.
- $G < 1$ : Perda, pois a tensão gerada é menor do que a tensão que está sendo fornecida.
- $G = 1$ : Contínuo, pois a tensão de gerada é a mesma que a tensão fornecida.

Quando se trata de dispositivos com finalidade de geração de energia o caso em que  $G > 0$  é o caso desejado, pois está havendo um ganho energético no sistema, desta forma o foco principal desta discussão neste seção é como alterar esta implementação para que possamos aumentar a probabilidade de ter um ganho positivo para o sistema.

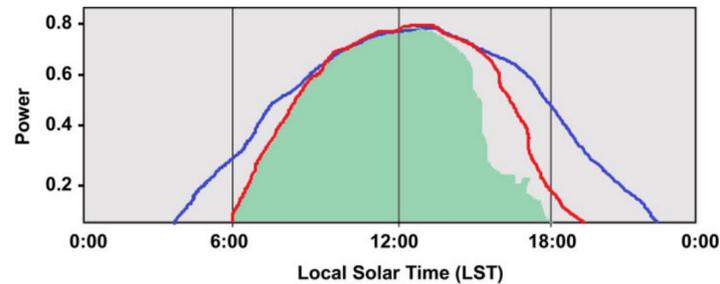
### **2.3 Sistema de rastreamento solar multi-eixo automático de baixo custo para melhoria de desempenho em painéis solares de suporte vertical usando placa Arduino**

O terceiro trabalho usado como referência (LASEINDE; RAMERE, 2019) há várias semelhanças com o trabalho proposto na seção 2.2 com algumas diferenças sutis, como a substituição de apenas um microcontrolador por um componente mais robusto Arduino Uno Rev3 (SA, 2019) baseado no microcontrolador (Atmel Corporation, 2015), já quando é abordado as semelhanças entre os trabalhos assim como na implementação (DAS *et al.*, 2015) há uma política de buscar custo energético reduzido assim um foco maior em aumentar os ganhos neste trabalho também temos este fator e outra semelhança que é possível notar é a disposição dos sensores LDR posicionados nas extremidades do painel solar. Fazendo uma descrição do sistema proposto (LASEINDE; RAMERE, 2019) que é constituído por um sistema de rastreamento solar composto por quatro sensores LDR, um sistema controlador para ajustar a movimentação do painel solar.

Quando é feito uma visualização gráfica da distribuição dos raios solares durante o dia em um determinado ponto com longitude e latitude desejados para a observação, é notado uma importante característica que foi abordada como justificativa na implementação Laseinde e

Ramere (2019), como é mostrado na figura 4. Com esta representação gráfica da luminosidade solar no decorrer do dia é perceptível a necessidade de ter um sistema capaz de capturar o máximo possível desta fonte luminosa.

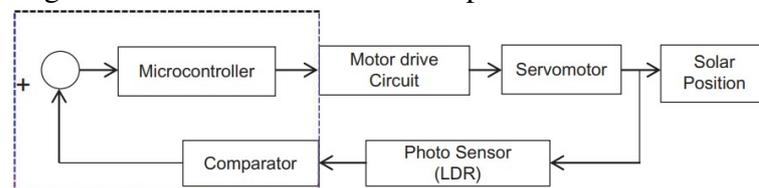
Figura 4 – Horário Local Solar



Fonte: Laseinde e Ramere (2019)

O sistema de controle proposto consiste em uma malha 5 capaz de fazer a leitura provinda do sistema de monitoramento solar via sensoriamento usando os dispositivos LDR de forma a ajustar via *software* baseado no Arduíno (SA, 2019). Desta forma este dispositivo fica sendo responsável por enviar sinais de ajuste para os motores de suporte do painel solar e assim fazer sua devida rotação e também enviar os sinais de saída para o *Light-Emitter Diode* (LED) que será usado como carga externa ao sistema para a medição dos valores de tensão, corrente e potência do sistema. A malha proposta deve ser capaz de ter uma responsividade suficiente para fazer os ajustes do painel solar durante o dia, pois essas informações irão ser usadas no cálculo da eficiência que é o ponto chave, se o modelo móvel é capaz de superar o modelo fixo em termos de ganho energético.

Figura 5 – Sistema de controle do posicionamento solar



Fonte: Laseinde e Ramere (2019)

O autor (LASEINDE; RAMERE, 2019) na coleta de dados para fazer a representação gráfica dos seus resultados faz associação das variáveis de entrada, tensão, corrente e potência, e faz uma associação com a medição em um LED de saída, assim calculando as mesmas variáveis da entrada na saída, assim gerando uma tabela que consta essas variáveis durante o dia. Desta forma é capaz de mensurar a relação da energia injetada no sistema e a energia que está sendo

gerada no mesmo sistema durante o dia. É feito este levantamento de dados para um painel fixo 6 e para um painel móvel 7, assim no final podendo ser visualizado os valores graficamente.

Figura 6 – Dados medidos do painel fixo

Data collected from fixed positioned solar panel						
Time	Input (Photovoltaic panel)			Output (LEDs connected to the Battery)		
	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)
05:00	0	0	0	0	0	0
06:00	21.5	0.122	2.621	5.4	0.003	0.0162
07:00	21.4	0.19	4.066	10.1	0.23	2.323
08:00	18.6	0.27	5.022	11.4	0.33	3.762
09:00	17.6	0.36	6.336	12.4	0.36	4.464
10:00	17.7	0.44	7.788	13	0.38	4.94
11:00	17.8	0.48	8.544	13.2	0.39	5.148
12:00	17.9	0.48	8.592	13.5	0.39	5.265
13:00	17.4	0.47	8.187	13.4	0.39	5.226
14:00	17.4	0.41	7.134	13.3	0.38	5.054
15:00	17.7	0.37	6.549	12.9	0.34	4.386
16:00	16.9	0.25	4.225	12.2	0.34	4.148
17:00	16.9	0.12	2.028	11.6	0.34	3.944
18:00	13.9	0.024	0.3336	6.7	0.002	0.0134
19:00	3.6	0.011	0.0396	3.4	0	0

Fonte: Laseinde e Ramere (2019)

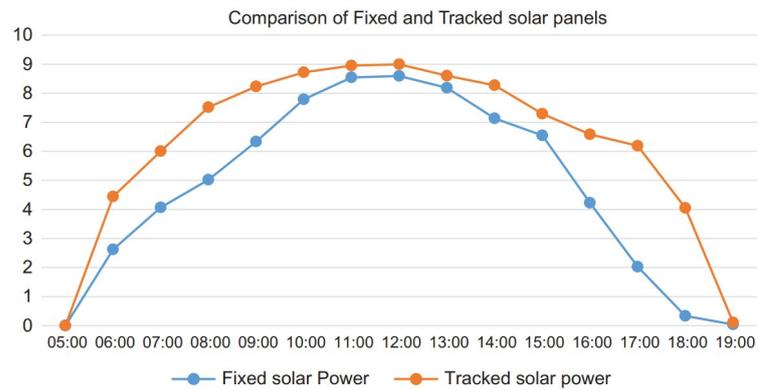
Figura 7 – Dados laboratoriais obtidos do painel móvel

Data collected from tracked solar panel						
Time	Input (Photovoltaic panel)			Output (LEDs connected to the Battery)		
	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)
05:00	0	0	0	0	0	0
06:00	20.2	0.22	4.444	11.2	0.289	3.2368
07:00	18.2	0.33	6.006	12.2	0.36	4.392
08:00	17.9	0.42	7.518	12.9	0.37	4.773
09:00	17.9	0.46	8.234	13.3	0.37	4.921
10:00	17.1	0.51	8.721	13.8	0.39	5.382
11:00	17.9	0.5	8.95	13.9	0.4	5.56
12:00	17.3	0.52	8.996	13.7	0.39	5.343
13:00	18.7	0.46	8.602	13.7	0.39	5.343
14:00	17.6	0.47	8.272	13.6	0.39	5.304
15:00	18.7	0.39	7.293	13.1	0.34	4.454
16:00	17.8	0.37	6.586	13.7	0.4	5.48
17:00	17.2	0.36	6.192	13.1	0.38	4.978
18:00	18.4	0.22	4.048	12.5	0.37	4.625
19:00	17.4	0.006	0.1044	10.1	0.09	0.909

Fonte: Laseinde e Ramere (2019)

O gráfico gerado, pode ser visto na figura 8, pelas tabelas acima corresponde a quantidade de energia gerada pelo painel fixo e pelo painel móvel durante o decorrer do dia, desta forma é capaz de visualizar e mensurar numericamente o quão eficiente é a implementação proposta pelo autor (LASEINDE; RAMERE, 2019) com este desenvolvimento. Podemos notar que há um ganho considerável do painel móvel em relação ao painel fixo quando o sol se encontra próximo às extremidades do gráfico, ou seja, horários onde o sol não está no pico, desta forma o rastreamento é uma ferramenta otimizadora fazendo o painel solar captar uma maior quantidade de luminosidade, e conseqüentemente um ganho mais efetivo.

Figura 8 – Comparação do painel fixo com o painel móvel



Fonte: Laseinde e Ramere (2019)

## 2.4 Relação entre implementações e a implementação proposta

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados com o trabalho proposto

	Trabalho [2.1]	Trabalho [2.2]	Trabalho [2.3]	Trabalho Proposto
Painel fixo	x	x	x	x
Painel móvel	x	x	x	x
Rastreamento solar	x	x	x	x
Inversor ou bateria embutido	x			
Suporte otimizado para vários painéis solares				x
Intervalo entre rastreamentos solar				x
Intervalo entre movimentação dos painéis				x
Modo Stand By				x

Fonte: Autor

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção serão abordados conceitos que irão ser utilizados no desenvolvimento do projeto proposto neste trabalho com a proposta de contextualizar e mostrar como esses conceitos serão aplicados na implementação.

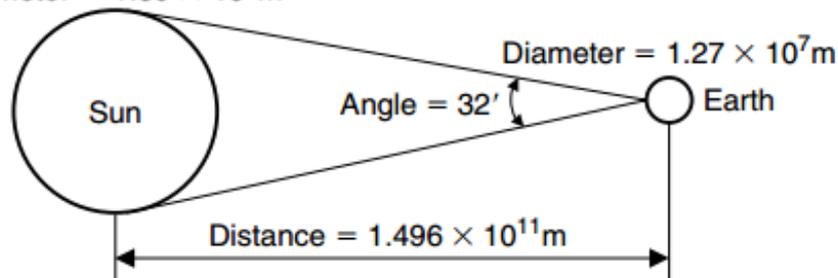
#### 3.1 Sol

Como já é de conhecimento o Sol ocupa o centro do nosso Sistema Solar, e ao mesmo tempo ocupando um dos centros da órbita elíptica formada entre o sistema binário Terra-Sol.

O Sol é uma estrela composta por gases em alta temperatura, segundo o livro (KALOGIROU, 2013) podemos descrever algumas informações do sol, alguns dados importantes sobre o Sol podem ser visualizados na figura 9 é que numericamente o seu diâmetro é de  $1,39 \times 10^9$  m, tendo uma distância da terra de aproximadamente de  $1,496 \times 10^{11}$  m dessa forma sabendo a velocidade de luz no vácuo podemos calcular o tempo que a radiação produzida pelo sol leva para chegar à superfície da Terra, sendo esse valor 8 minutos.

Figura 9 – Relação Terra-Sol

Diameter =  $1.39 \times 10^9$  m



Fonte: Kalogirou (2013)

Quando analisamos o Sol em termos energéticos podemos notar seu grande valor para a vida na Terra, mas não apenas isso, podemos notar uma grande fonte de energia que pode ser aproveitada via painéis solares. O interior do Sol pode ser comparado a um corpo negro pois a temperatura produzida pela fusão nuclear, transformando hidrogênio em hélio, é aproximadamente 5760 K. A energia total produzida pelo Sol com a fusão nuclear é estimada em  $3,8 \times 10^{20}$  MW sendo a potência da superfície aproximadamente igual a  $63 \text{ MW}/\text{m}^2$ , dessa forma como toda essa energia é emitida em todas as direções a Terra recebe apenas uma pequena fração dessa energia sendo  $1,7 \times 10^{12}$  kW. Neste ponto o autor (KALOGIROU, 2013) faz uma abordagem interessante, pois quando olhamos essa pequena fração durante uma parte de tempo,

podemos notar que por 84 minutos essa pequena fração emitida pelo sol é igual a demanda mundial energética durante uma ano.

### 3.2 Solarimetria

Como foi abordado superficialmente na seção anterior já podemos ter uma breve noção dos números que a radiação solar proporciona, nesta seção será feita uma abordagem de comparação dos ganhos energéticos da energia solar com as outras fontes que são usadas atualmente na geração de energia elétrica. Alguns pontos positivos e negativos da energia solar em comparação às demais fontes de energia renováveis e não renováveis são: primeiramente como sabemos é uma fonte de energia muito abundante ou seja, de fácil acesso, a distribuição da energia solar é centralizada nos pontos próximos a linha do equador, ou seja, quanto mais próximo da linha do equador maior a quantidade de incidência dos raios solares, outro fator positivo nessa fonte energética é sua durabilidade, para a medição escala de grandeza do tempo que estamos acostumado pode ser considerado uma fonte que terá sua durabilidade para sempre.

Ao analisar os pontos negativos da energia solar temos como principal fator a alta variação com o tempo, pois o seu rendimento varia de acordo com a taxa de incidência dos raios solares, dessa forma, todo o sistema de captação fica desativado quando chega a noite. Outro fator que deve ser levado em conta atualmente é o custo de conversão, pois nos tempos atuais a forma de captação é um fator que torna essa captação cara e de difícil captação.

#### 3.2.1 Equacionamento do tempo

Normalmente o horário usado corresponde ao horário diário, ou seja, o horário que é mostrado no relógio, mas apenas esse sistema de mapeamento diário do movimento solar no céu não é o suficiente para fazer uma representação completa da medição solar durante o decorrer do ano, ou seja, segundo o autor (KALOGIROU, 2013) podemos representar a equação 3.1 que é capaz de aproximar o mapeamento solar durante o decorrer do ano fazendo uma relação do dia do ano e a saída da equação em minutos no decorrer do ano.

$$ET = 9,8 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (3.1)$$

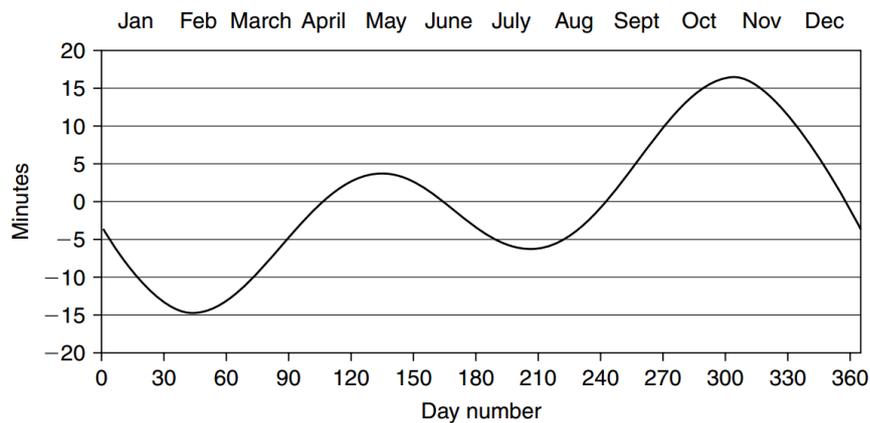
Sabendo que  $N$  corresponde ao número do dia no decorrer do ano, podemos calcular

B da seguinte forma:

$$B = (N - 81) \cdot \frac{360}{364} \quad (3.2)$$

O gráfico gerado pela equação 3.1 pode ser obtido diretamente via recursos computacionais. Graficamente pode ser visto a resposta da equação na figura 10.

Figura 10 – Equation of Time ET



Fonte: Kalogirou (2013)

### 3.2.2 Horário padrão local (LST)

O Horário padrão local, traduzido do inglês *Local Standard Time (LST)*, é o horário que estamos acostumados no relógio, este horário se torna bastante importante pois mesmo que não seja suficiente para representar o movimento anual da Terra em relação ao Sol se torna essencial pois é um fator importante para calcular o Horário solar aparente, como irei demonstrar na seção 3.2.3.

### 3.2.3 Horário solar aparente (AST)

O Horário solar aparente, traduzido do inglês *Apparent Solar Time (AST)*, representa o equacionamento do sistema de rastreamento entre Terra-Sol com as correções longitudinais que são necessárias para uma representação fidedigna do mapeamento temporal do sol em relação a não apenas o dia do ano como é feito na seção 3.2.1.

- AST: Horário aparente solar que é desejado encontrar na equação.
- LST: Horário mostrado no relógio.
- ET: Resultado obtido na equação 3.1.

- *Standard Longitude* (SL): Longitude que será usado como referencial padrão.
- *Local Longitude* (LL): Longitude atual.
- *Daylight Saving* (DS): Horário de verão.

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad (3.3)$$

Segundo o autor (KALOGIROU, 2013) algumas informações devem ser levadas em conta para o melhor entendimento da equação 3.3:

- Se o local desejado for ao leste do meridiano de Greenwich o sinal no termo  $\pm$  será positivo(+), caso o ponto desejado esteja ao oeste do meridiano de Greenwich o sinal será negativo(-).
- DS: Esse termo é responsável por fazer o ajuste em termos de horário de verão, ou seja, se esse termo for usado esse horário deverá ser subtraído do termo LST. Normalmente esse período se está entre o final de março ao final de outubro.

A equação 3.3 é responsável por equacionar as variáveis que devem ser consideradas na hora de fazer o cálculo do AST em um determinado ponto da superfície global em uma determinada hora do dia, ou seja, quando queremos fazer um rastreamento solar em um determinado ponto do globo durante o ano, as informações de latitude e longitude não mudarão, logo o restante das variáveis são apenas valores que são conseguidos facilmente, restando apenas a o dia do ano, dessa forma com toda essa equação predefinido e apenas o dia do ano como incógnita o mapeamento do AST se torna mais fácil de realizar.

#### 3.2.4 Ângulos solares

Como sabemos que a Terra tem uma órbita levemente elíptica ao redor do sol, podemos listar uma pequena equação para aproximar os valores de distância em determinados pontos da sua trajetória durante o ciclo anual que a Terra percorre ao redor do Sol.

$$R = a(1 \pm e) \quad (3.4)$$

Sendo respectivamente as variáveis  $R$  como a distância entre Sol e Terra,  $a$  como a distância média entre o Sol e a terra e a variável  $e$  sendo a excentricidade da órbita entre da Terra ao redor do sol que vale 0,01673. Dessa forma quando a Terra se encontra no ponto da órbita

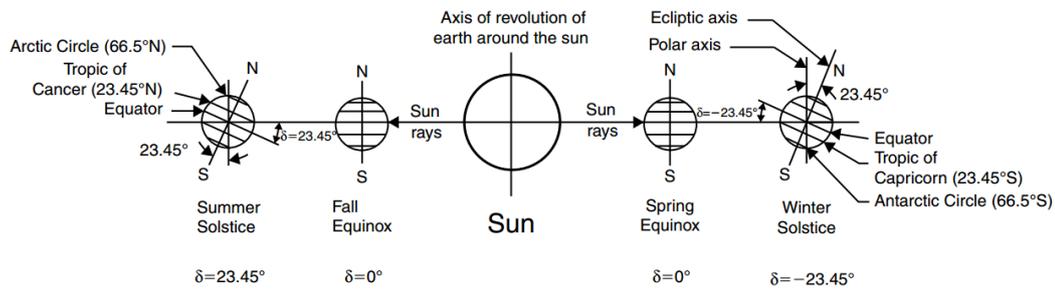
mais próxima do Sol, chamado de periélio, a equação tem como resposta  $147,1 \times 10^6$  km, já no ponto mais afastado do sol, chamado de afélio, a equação tem como resposta  $152,1 \times 10^6$  km.

Quando olhamos para o céu durante o dia podemos ver uma movimentação do Sol, ou seja, tendo todo o embasamento teórico até o momento foi desenvolvido um sistema capaz de fazer o rastreamento e previsão do caminho solar durante o ano em relação aos dias do ano. Foi usado o sistema de coordenadas esféricas, nas seções abaixo iremos fazer uma análise mais aprofundada dos ângulos que devem ser levados em conta quando falamos desse mapeamento solar.

### 3.2.4.1 Declinação $\delta$

O ângulo de declinação é o ângulo que a terra tem de desvio com os eixos polares, ou seja, é o ângulo de inclinação que a Terra tem no seu próprio eixo vertical, mas quando fazemos uma comparação com o Sol e os feixes de incidência temos uma representação visual chamada de ângulo diário.

Figura 11 – Declinação solar durante o ano



Fonte: Kalogirou (2013)

Matematicamente é possível fazer essa representação de duas formas, sendo a primeira uma equação mais genérica tendo como resposta o seno do ângulo de declinação da Terra em um determinado dia, e na segunda representação é feito uma abordagem mais prática, ou seja, a resposta é dada em radianos do ângulo de inclinação da Terra em relação ao dia do ano.

$$\delta = 23,45 \sin \left( \frac{360}{365} (248 + N) \right) \quad (3.5)$$

Na segunda forma de fazer o cálculo de  $\delta$  temos:

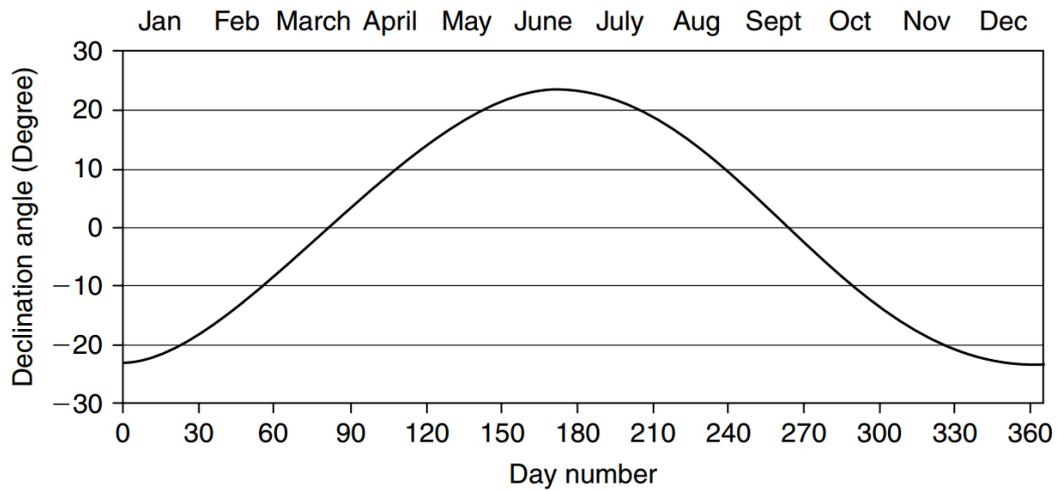
$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos(\Gamma) + 0,070257 \sin(\Gamma) \\ & - 0,006758 \cos(2 \cdot \Gamma) + 0,000907 \sin(2 \cdot \Gamma) \\ & - 0,002697 \cos(3 \cdot \Gamma) + 0,00148 \sin(3 \cdot \Gamma) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Sendo  $\Gamma$

$$\Gamma = \frac{2\pi(N-1)}{365} \quad (3.7)$$

Em ambos os casos a variável  $N$  corresponde ao dia do ano. E a resposta visual dessas implementações pode ser visualizada na figura 12.

Figura 12 – Gráfico *Day Light*



Fonte: Kalogirou (2013)

#### 3.2.4.2 Ângulo Horário $h$

O ângulo horário também conhecido como Ângulo solar horário é um valor referente ao deslocamento longitudinal de acordo com o deslocamento no AST, ou seja, é uma informação que podemos calcular usando duas formas, a primeira forma é baseada no horário de meio-dia local e a segunda forma é baseada no AST do ponto desejado em um determinado momento do ano.

A primeira forma de calcular a variável  $h$  é via a variável denominada de  $\sigma$  que representa a diferença do horário atual com o horário do meio dia solar, ou seja, caso o horário local tenha passado do meio dia o sinal será positivo (+) caso contrário o sinal será negativo (-).

$$h = \pm 0,25 \cdot (\sigma) \quad (3.8)$$

A segunda forma de fazer esse cálculo é via AST como consta na equação abaixo:

$$h = (AST - 12)15 \quad (3.9)$$

#### 3.2.4.3 Ângulo de altitude solar $\alpha$

Outro ângulo importante para o estudo é o ângulo da altitude solar, ou seja, essa informação é obtida com a relação do feixe solar incidente com o plano horizontal como pode ser visto na figura 13, ou seja, com ele temos uma informação da altitude os feixes solares estão no momento. Matematicamente podemos calcular essa ângulo da seguinte maneira:

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (3.10)$$

Sendo  $L$  a latitude local, ou seja, ângulo formado entre o segmento de reta e o plano equatorial e o valor  $\Phi$  como sendo o ângulo formado entre o feixe de luz com eixo vertical chamado de eixo zênite. Dessa forma temos uma relação entre os ângulos  $\alpha$  e  $\Phi$ :

$$\alpha + \Phi = \frac{\pi}{2} \quad (3.11)$$

#### 3.2.4.4 Ângulo solar azimute $z$ e horário solar do meio-dia

O ângulo solar azimute é o deslocamento horizontal que o sol percorre no seu caminho durante o dia, ou seja, como é mostrado na figura 13 podemos ver todo o percorrer do sol do nascente ao poente. Para o melhor entendimento foi realizado algumas definições como o meio dia solar, essa definição é feita para determinar a variação que o sol teve em relação ao referencial adotado que é a linha do hemisfério sul 13.

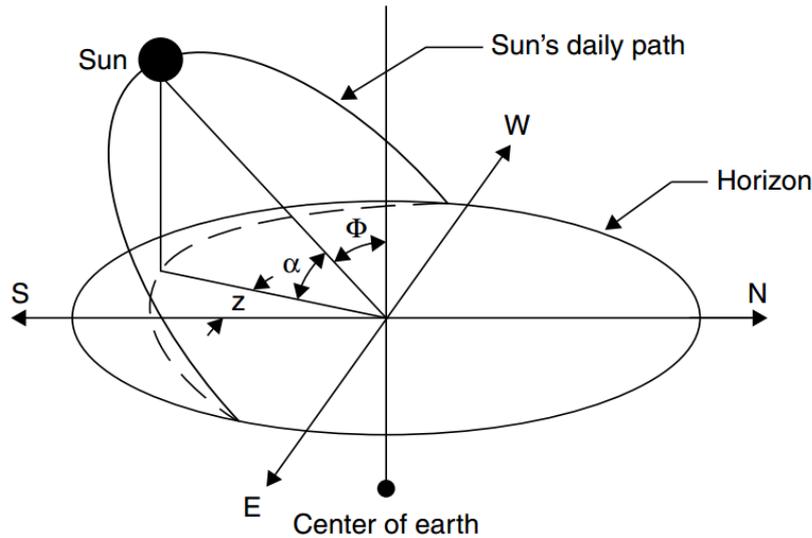
Matematicamente a equação que corresponde ao deslocamento horizontal realizado que é desejável calcular pode ser equacionada como:

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta) \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (3.12)$$

#### 3.2.5 Radiação

Nas seções anteriores foram abordadas maneiras de fazer o rastreamento solar durante o dia no decorrer do ano em qualquer longitude e latitude, ou seja, sabendo a sua localização no céu temos uma boa base para continuar nos estudos da Solarimetria. O segundo ponto que

Figura 13 – Ângulos solares e caminho solar do nascente ao poente



Fonte: Kalogirou (2013)

será abordado algumas maneiras de fazer o cálculo das radiações solares que estão sendo interceptadas pelo globo em um determinado ponto da terra, ou seja, em termos de captação solar é um ponto crucial pois é a partir dessa radiação que os painéis solares fazem a conversão para energia elétrica.

### 3.2.5.1 Radiação solar extraterrestre

A primeira abordagem que é feita pelo autor (KALOGIROU, 2013) é fazer um estudo das radiações provindas do sol sem abordar a atmosfera como um fator que influencia, ou seja, foi denominado uma constante chamada de  $G_{sc}$  que tem a principal função de numerar os dados de radiação solar fora da atmosfera e a segunda variável  $G_{on}$  que representa a radiação provinda do sol no dia. Matematicamente temos:

$$G_{on} = G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360N}{365} \right) \right] \quad (3.13)$$

O valor de  $G_{sc}$  foi definido no ano de 2000 pela *American Society* e vale  $1366.1 \text{ W/m}^2$ , e a segunda variável da equação é  $N$  é responsável pelo dia do ano.

Quando fazemos esse valor de energia solar calculado para um painel com uma inclinação temos que matematicamente essa representação a equação abaixo:

$$G_{oH} = G_{on} \cos(\Phi) = G_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360N}{365} \right) \right] [\cos(L) \cos(\delta) \cos(h) + \sin(L) \sin(\delta)] \quad (3.14)$$

Sabendo o valor da energia solar diário em um determinado dia o autor apresenta duas equações que podem ser obtida via integração da equação acima. A primeira equação é referente a energia total que uma superfície inclinada com um ângulo  $\Phi$  terá durante o período do nascer do sol ao pôr do sol 3.15. Já a segunda equação é para o cálculo dessa energia em um determinado intervalo de tempo 3.16.

Equação da energia total de um dia em uma superfície inclinada:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360N}{365} \right) \right] \times \left[ \cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + \left( \frac{\pi h_{ss}}{180} \right) \sin(L) \sin(\delta) \right] \quad (3.15)$$

Equação de energia da energia de um intervalo de tempo definido como  $(h_2 - h_1)$ .

$$I_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360N}{365} \right) \right] \times \left[ \cos(L) \cos(\delta) \sin(h_2 - h_1) + \left( \frac{\pi(h_2 - h_1)}{180} \right) \sin(L) \sin(\delta) \right] \quad (3.16)$$

### 3.2.5.2 Atenuação Atmosférica

Na seção anterior foi tratado o caso em que a atenuação atmosférica não era considerada, ou seja, para casos onde se deseja calcular valores de energia em planos inclinados fora da área atmosférica, nessa seção será tratado uma abordagem explicativa de como podemos fazer uma modelagem matemática de como a atmosfera pode interferir na energia resultante que poderá chegar em um painel solar na Terra.

Como já é de conhecimento a atmosfera terrestre é responsável por fazer a atenuação das radiações que chegam no planeta Terra, desta forma ela é responsável refletir e absorver feixes de radiação providas do Sol. Quando olhamos para um feixe de luz incidente na atmosfera é capaz notar que uma fração desse feixe é refletido e outra fração é absorvido.

Dessa maneira quando analisamos o feixe absorvido podemos notar que essa fração que foi absorvida pelo Sol alguns feixes terão o contato direto com o solo e já outros encontrarão obstáculos no caminho, como nuvens por exemplo. Essa parcela de feixes de incidência direta é denominada de **Radiação de feixe** e a segunda parcela que foi atenuada pelos obstáculos é chamada de **radiação difusa**. Assim podemos concluir que a radiação total que chegará na superfície da Terra é a soma das radiações diretas e as radiações difusas.

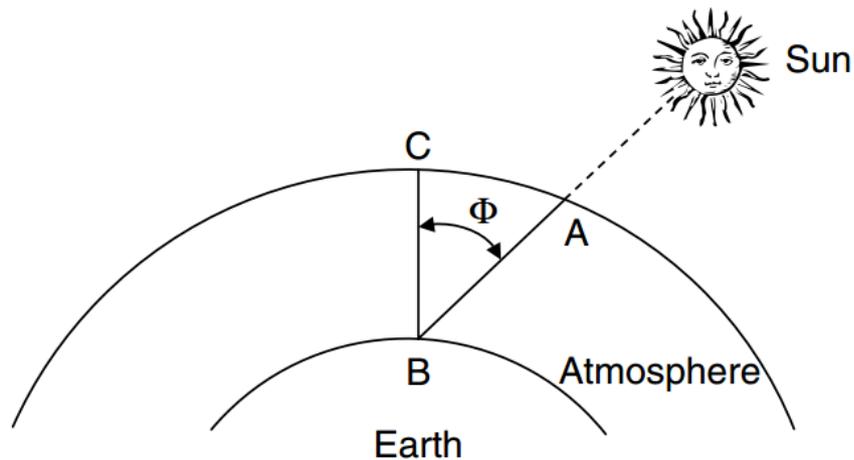
Quando analisamos a inclinação que os feixes em relação ao vértice vertical, chamado de zênite, podemos criar a seguinte relação matemática para poder calcular a **massa de ar padrão**

denominada na equação 3.17 como  $m$ .

$$m = \frac{AB}{BC} = \frac{1}{\cos(\Phi)} \quad (3.17)$$

Quando o Sol se encontra exatamente no ponto máximo do vértice zênite temos que  $\Phi = 0$  logo  $m = 1$ ; e quando  $\Phi = 60^\circ$  logo  $m = 2$ .

Figura 14 – Definição da massa de ar



Fonte: Kalogirou (2013)

### 3.2.5.3 Radiação total em superfícies inclinadas

O cálculo da radiação em uma superfície inclinada é essencial para o desenvolvimento deste projeto pois o foco é fazer com que essa taxa de radiação chegue o mais próximo da radiação máxima possível no dia, ou seja, o mais próximo da radiação máxima encontrada no vácuo sobre uma superfície inclinada.

A Radiação total que chega em uma superfície inclinada ( $G_T$ ) é dividida em três radiações diferentes, sendo elas a radiação direta ( $G_{BT}$ ), a radiação difusa ( $G_{DT}$ ) e a radiação refletida pelo solo ( $G_{GT}$ ). A soma dessas três radiações é igual a radiação em uma superfície inclinada.

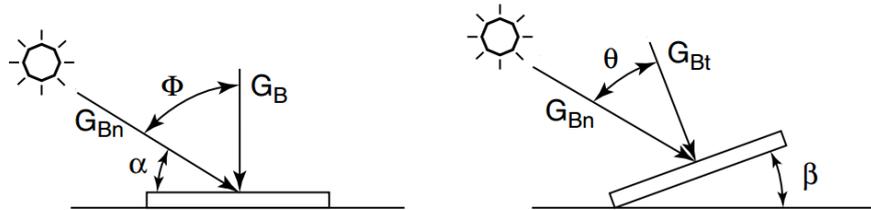
$$G_T = G_{BT} + G_{DT} + G_{GT} \quad (3.18)$$

Para um melhor entendimento irei fazer uma abordagem separada de como é feito numericamente a modelagem de cada radiação e no fim da seção com todas as partes para concluir a equação final para encontrar a radiação total no painel inclinado.

- $G_{BT}$ : Radiação dos feixes diretos

Para deduzir essa radiação matematicamente é necessário fazer uma relação com o ângulo de inclinação da plataforma em relação com o plano horizontal, esse ângulo de inclinação é denominado  $\beta$  como mostrado na figura 15. Uma segunda variável é importante para o desenvolvimento que é o fator de inclinação da radiação do feixe, ou seja, é um valor que vai mensurar o quão inclinado está o painel em relação ao painel na horizontal.

Figura 15 – Radiação direta no painel horizontal e inclinado.



Fonte: Kalogirou (2013)

Numericamente temos que o cálculo da variável  $G_{GB}$  que representa os feixes de radiação na superfície horizontal como:

$$G_B = G_{Bn} \cos(\Phi) \quad (3.19)$$

E para o plano inclinado temos:

$$G_{BT} = G_{Bn} \cos(\theta) \quad (3.20)$$

Fazendo uma relação simples entre os valores acima com as equações 3.19 e 3.20 é possível encontrar  $R_B$  que representa o fator de inclinação da radiação do feixe.

$$R_B = \frac{G_{BT}}{G_B} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\Phi)} = \frac{\sin(L - \beta) \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cos(\delta) \cos(h)}{\sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h)} \quad (3.21)$$

Finalizando podemos calcular  $G_{BT}$  em função de  $R_B$  da seguinte forma:

$$G_{BT} = G_B R_B \quad (3.22)$$

- $G_{DT}$ : Radiação absorvida pelos feixes difusos

A radiação em uma superfície horizontal pode ser definida como:

$$G_D = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} G_R \cos(\Phi) d\Phi = 2G_R \quad (3.23)$$

Sendo a variável  $G_D$  radiação difusa do céu. Assim podemos calcular diretamente a radiação em um painel inclinado com um ângulo  $\beta$  como foi mostrado na figura 15.

$$G_{DT} = \int_0^{\frac{\pi}{2}-\beta} G_R \cos(\Phi) d\Phi + \int_0^{\frac{\pi}{2}} G_R \cos(\Phi) d\Phi \quad (3.24)$$

Aplicando as relações das equações 3.23 e 3.24 e resolvendo as integrais temos a forma simplificada que é apenas dependente do valor do ângulo  $\beta$ .

$$G_{DT} = G_D \left[ \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] \quad (3.25)$$

- $G_{GT}$ : Radiação absorvida dos feixes refletidos do solo

Similar ao desenvolvimento na seção anterior a mesma lógica se aplica para a radiação refletida pelo solo, apenas um detalhe que é necessário uma mudança, que corresponde ao percurso que o feixe fez até chegar ao painel, ou seja, quando foi as equações dos feixes difusos o único meio que o feixe entrou em contato foi o ar, ou seja, nesse caso há mais um meio que o raio de luz entra em contato, o solo, dessa forma se faz necessário a definição de uma constante capaz de representar o quanto de feixe de radiação o solo irá refletir e absorver. Essa constante é chamada de  $\rho$ . Com essa definição feita o desenvolvimento se torna similar.

$$\rho_G(G_B + G) = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} G_r \cos(\Phi) d\Phi = 2G_r \quad (3.26)$$

Definindo  $G_r$  como constante de radiação refletida pelo solo isotrópico do local.

$$G_{GT} = \int_{\frac{\pi}{2}-\beta}^{\frac{\pi}{2}} G_r \cos(\Phi) d\Phi \quad (3.27)$$

Aplicando a equação 3.26 na equação 3.27 e resolvendo a integral chegamos na equação final da radiação refletida:

$$G_{GT} = \rho_G(G_B + G_D) \left[ \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (3.28)$$

- $G_T$ : Radiação total no painel inclinado

Neste ponto com a equação proposta 3.18 cada termo foi devidamente representado matematicamente, podemos substituir os termos genéricos da equação proposta pelos termos encontrados nas equações 3.22, 3.25 e 3.28.

$$G_T = G_B R_B + G_D \left[ \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + \rho_G (G_B + G_D) \left[ \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (3.29)$$

### 3.3 Hardware

Nesta seção irei fazer a abordagem dos tópicos da fundamentação teórica referentes a construção do *hardware* do sistema, pois o embasamento teórico desse projeto é composto por três vertentes, a primeira é o estudo do movimento e radiação do sol como foi falado na seção 3.2, a segunda é o desenvolvimento do *hardware* onde o sistema será embarcado e por último é o *software* que será abordado na seção 3.4.

#### 3.3.1 Painéis fotovoltaicos

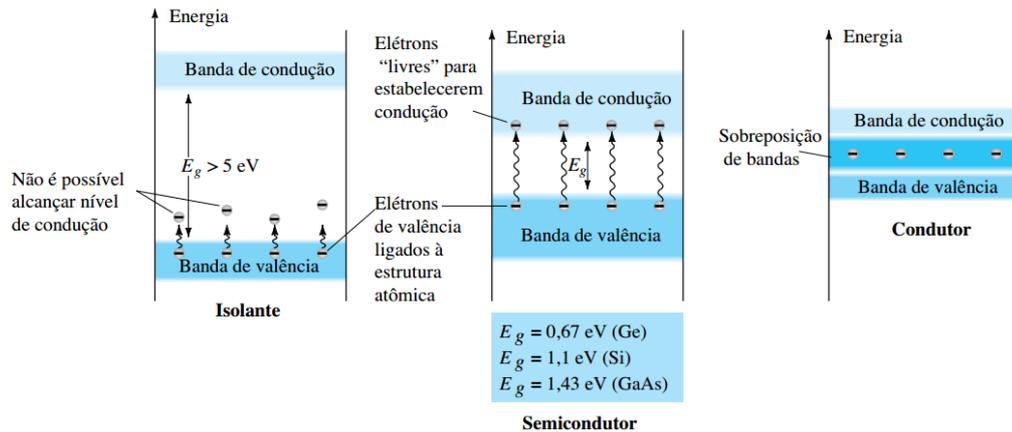
Todo sistema de captação solar é baseado no componente fundamental que são os painéis solares. Primeiramente será feita uma abordagem do seu funcionamento e as suas aplicações como poderá ser utilizado no sistema de captação.

##### 3.3.1.1 Semicondutores

Todo material é composto por átomos, ou seja, todo eles tem características de condução, isolantes ou semi-condução de corrente elétrica, ou seja, alguns materiais têm a capacidade de conduzir melhor correntes elétricas como por exemplo o cobre, já outro material como a borracha tem a capacidade de isolar melhor essa passagem de corrente, ou seja, qual a origem dessa característica e como foi usado esses materiais para desenvolver os semicondutores que se encontra no mercado atualmente.

Seguindo a explicação dada pelos autores no livro (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013) visualizar melhor o motivo da qual alguns materiais têm a facilidade no aspecto da condução ou no isolamento como pode ser visto na figura 16.

Figura 16 – Níveis de energia



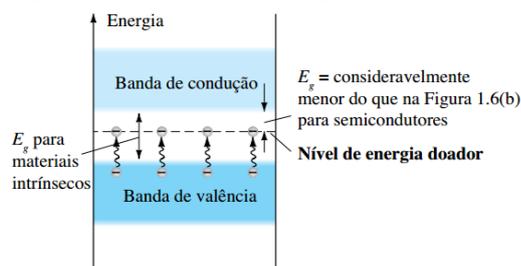
Fonte: BOYLESTAD e NASHELSKY (2013)

Dessa forma quando o material em si é composto por uma composição em qual suas bandas, de valência e de condução estão distantes acima de 5 eV esse material é considerado um isolante, pois é necessário uma energia elevada para tirar os elétrons que estão na banda de valência para a banda de condução. Já no caso dos condutores essas bandas estão próximas o bastante que apenas uma pequena energia fornecida ao sistema é capaz de fazer a movimentação dos elétrons da banda de valência para a banda de condução.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-9} \text{ J} \quad (3.30)$$

Já quando analisamos os semicondutores que tem como diferencial a distância entre as bandas de valência e condução não estão próximas o suficiente para ser considerado um condutor nem estão distantes o suficiente para ser considerado um isolante. Dessa maneira foi desenvolvido uma técnica de dopagem do material para que entre a banda de valência e a banda de condução seja criado um novo nível, ou seja, é inserido impurezas no material semicondutor para que faça os elétrons se moverem da banda de valência para a nova, e da banda de condução para a nova banda, como é mostrado na figura 17.

Figura 17 – Efeito da impureza inserida



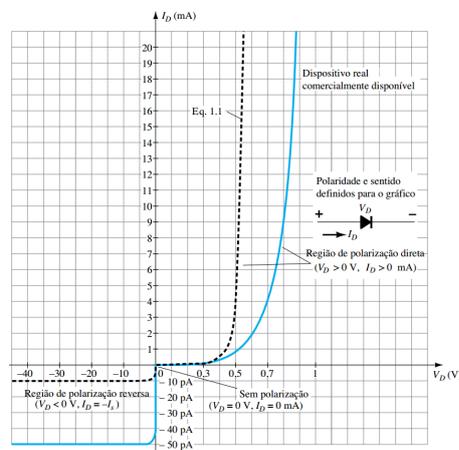
Fonte: BOYLESTAD e NASHELSKY (2013)

### 3.3.1.2 Diodos e polarizações

A criação dos materiais dopados como mostrado na figura 17 foi uma invenção muito importante para o desenvolvimento da eletrônica como conhecemos hoje em dia, mas outro passo tão importante quanto foi a junção de dois materiais dopados, pois essa junção tem comportamentos interessantes quando analisamos sua resposta quando é inserido em um circuito elétrico tendo características de um circuito aberto quando é feita uma ligação e quando é feita essa ligação de outra maneira essa junção tem propriedades de um fio com resistência baixa. Essa junção é chamada de Diodo.

O comportamento de um diodo em um circuito é baseado na movimentação do fluxo de portadores majoritários(+) e portadores minoritários(-), dessa forma como pode ser visto no gráfico 18 quando um diodo é polarizado (A tensão entre seus terminais positivo e negativo ultrapassa sua tensão de polarização) ele tem um comportamento de um fio com uma resistência baixa, caso essa tensão não seja aplicada nos terminais o diodo tem o comportamento de um circuito aberto.

Figura 18 – Curva característica do diodo de silício



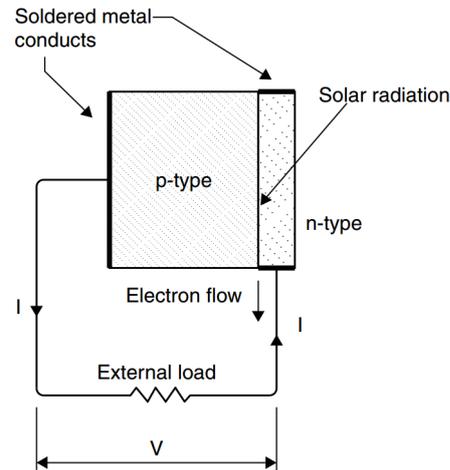
Fonte: BOYLESTAD e NASHELSKY (2013)

### 3.3.1.3 Funcionamento das células fotovoltaicas

Uma célula solar é composta basicamente por junções de materiais dopados que serão excitados não por meios elétricos como acontece em um circuito eletrônico, mas sim via radiação solar, via efeito fotoelétrico (KLEPPNER, 2005), assim fazendo com que os fótons que incidem os painéis solares sejam capazes de excitar esses elétrons e criar uma diferença de

potencial movimentando os portadores majoritários e minoritários, dessa forma nos terminais de saída a célula solar consegue fazer com que a luminosidade captada pelo painel solar gere uma diferença de potencial, ou seja, uma tensão de saída, como pode ser visto na figura 19.

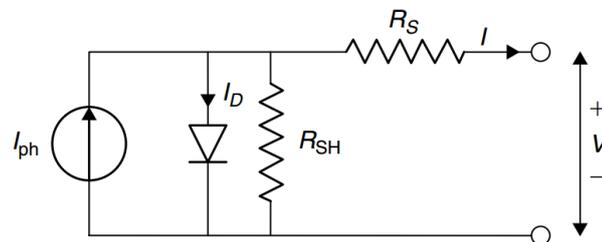
Figura 19 – Funcionamento da célula fotovoltaica



Fonte: Kalogirou (2013)

Uma célula fotovoltaica pode ser representada como um circuito elétrico onde é adicionada algumas resistências que resultam dos fatores de resistência dos materiais nas junções. Um célula fotovoltaica em contato com a radiação gera uma corrente chamada de fotocorrente da célula solar  $I_{ph}$ ,  $I_d$  no diodo, resistência *shunt* devido a heterogeneidade dos materiais e a perda de corrente nas extremidades solares  $R_{SH}$ , resistência em série devido a resistência do silício e dos materiais de junção nos contatos e por último a tensão de saída do circuito  $V$ .

Figura 20 – Circuito equivalente a uma célula solar única



Fonte: Kalogirou (2013)

Após os cálculos matemáticos para encontrar a equação resultante que corresponde

a corrente final  $I$  é encontrado a seguinte equação:

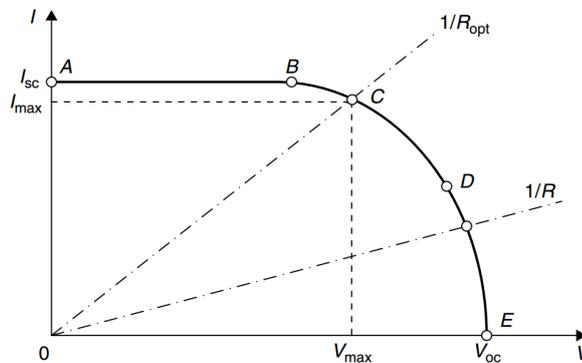
$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left[ \exp \left( \frac{eV}{kT_c} \right) - 1 \right] \quad (3.31)$$

Onde

- $k$  = constante de Boltzmann =  $1.381 \times 10^{-23}$  J/K.
- $T_c$  = Temperatura absoluta da célula (K).
- $e$  = Carga elétrica =  $1.602 \times 10^{-19}$  J/V.
- $V$  = Tensão elétrica imposta na célula (V).
- $I_o$  = Corrente de saturação dependente da temperatura (A).

Com essa equação é capaz de traçar dois gráficos que são essenciais no estudo da eficiência das células solares. A primeira análise que deve ser feita é o gráfico característico Tensão-Corrente 21, dessa forma podemos analisar o comportamento da célula solar. Primeiramente definimos  $I_{sc}$  como a corrente de curto circuito e  $V_{oc}$  a tensão máxima, ou seja, a tensão nos terminais da célula.

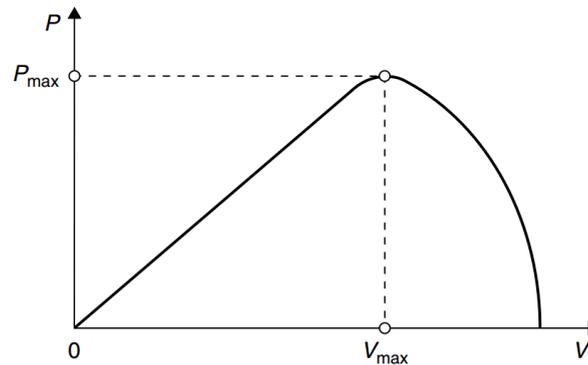
Figura 21 – Curva característica Tensão x Corrente



Fonte: Kalogirou (2013)

Quando colocamos uma carga ligada nos terminais podemos montar a curva característica da potência 22 em relação a carga que está sendo aplicada, ou seja, podemos afirmar que o rendimento de um painel solar está ligado diretamente a tensão aplicada, a carga que está sendo usada e quantidade de radiação que está incidindo na face. Dessa forma o resistor ideal onde o ganho de potência é maior é chamado de  $R_{opt}$ .

Figura 22 – Curva característica Tensão x Potência



Fonte: Kalogirou (2013)

#### 3.3.1.4 Fator de preenchimento

O fator de preenchimento é uma variável que sinaliza a eficiência do funcionamento de uma célula solar.

$$P_{max} = V_{max}I_{max} \quad (3.32)$$

O Ponto C na curva da figura 21 representa onde está os maiores pontos para potência, tensão e corrente, logo podemos substituir na equação 3.32 pelos valores da curva característica e adicionar o termo *Fill Factor* (FF).

$$P_{max} = V_{oc}I_{sc}FF \quad (3.33)$$

Logo para saber o valor de FF temos:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{max}I_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (3.34)$$

Segundo o autor (KALOGIROU, 2013) algumas informações sobre FF:

- Boas células solares tem essa constante maior que 0,7.
- O seu valor é inversamente proporcional a temperatura, ou seja, para altas temperaturas esse valor tende a decair.

#### 3.3.1.5 Potência máxima, corrente máxima e tensão máxima

Para o desenvolvimento das constantes máximas é necessário fazer uma análise da figura 21 ou seja, é necessário encontrar a corrente máxima que o circuito é capaz de gerar e a tensão máxima. A corrente máxima podemos encontrar quando fazemos o curto-circuito entre os terminais, ou seja,  $V = 0$ , dessa forma a corrente de curto-circuito  $I_{sc}$  é igual a fotocorrente

gerada  $I_{ph}$ . Já para o circuito aberto onde a corrente de saída é 0  $I = 0$ , a tensão de saída corresponde a queda de tensão no diodo atravessada pela corrente  $I_D$ , dessa forma a tensão da célula durante o período da noite será obtida da seguinte forma:

$$\exp\left(\frac{eV_{oc}}{kT_c}\right) - 1 = \frac{I_{sc}}{I_o} \quad (3.35)$$

Isolando  $V_{oc}$ :

$$V_{oc} = \frac{kT_c}{e} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) = V_t \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) \quad (3.36)$$

Como sabemos a definição de potência elétrica como  $P = VI$  ou  $P = I^2R$  podemos essa fórmula e aplicar o termos encontrados anteriormente para desenvolver a potência elétrica:

$$P = \left\{ I_{sc} - I_o \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT_c}\right) - 1 \right] \right\} V \quad (3.37)$$

Neste ponto o autor (KALOGIROU, 2013) faz uso de um método de derivação da equação 3.37 em função do V e iguala o resultado a 0 para encontrar o ponto máximo da equação, com esse passo é encontrado a equação explícita correspondente a tensão máxima:

$$\exp\left(\frac{eV_{max}}{kT_c}\right) \left(\frac{eV_{max}}{kT_c} + 1\right) = \frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \quad (3.38)$$

De forma similar podemos deduzir a equação da corrente máxima:

$$I_{max} = I_{sc} - I_o \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT_c}\right) - 1 \right] = I_{sc} - I_o \left[ \frac{1 + \frac{I_{sc}}{I_o}}{1 + \frac{eV_{max}}{kT_c}} - 1 \right] \quad (3.39)$$

De forma simplificada temos que a corrente máxima vale:

$$I_{max} = \frac{eV_{max}}{kT_c + eV_{max}} (I_{sc} + I_o) \quad (3.40)$$

E finalmente aplicando os resultados para encontrar a potência máxima temos:

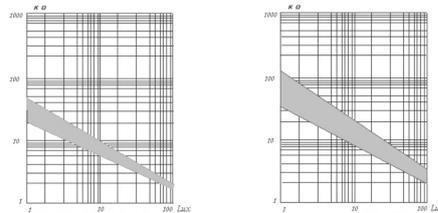
$$P_{max} = \frac{eV_{max}^2}{kT_c + eV_{max}} (I_{sc} + I_o) \quad (3.41)$$

### 3.3.2 Sensor LDR a curva característica

O sensoriamento da luminosidade é algo necessário para o desenvolvimento do projeto, pois com ele podemos fazer o rastreamento solar e a predição do caminho solar. Este trabalho tem como uma fundamentação base o rastreamento o solar para que se torne possível realizar a rotação dos painéis solares na grade da usina de geração.

A curva característica de um sensor de luminosidade pode ser vista na figura 23, essa curva representa a característica da resposta dada pelo sensor quando é submetido a luminosidade. Como pode ser visto a curva tem uma tendência de queda que é referente a quantidade de luminosidade, dessa maneira quanto maior a luminosidade a resistência tende a diminuir.

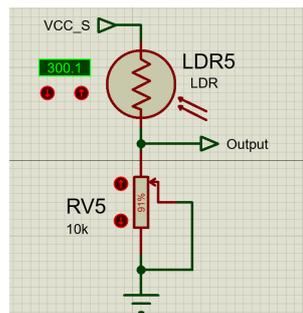
Figura 23 – Curva característica  
LDR série GL5516



Fonte: SENBA (2014)

O circuito desenvolvido para a captação da luminosidade consiste em um divisor de tensão de forma que para o maior valor de luminosidade previsto no intervalo previsto [0.1 lux,1000 lux] a tensão de saída seja uma representação da luminosidade que está sendo captada pelo sensor, dessa forma a resposta do divisor de tensão obedece a seguinte lógica, para valores de luminosidade muito baixas a tensão entre os componentes tende a 0, quando a luminosidade cresce o valor de tensão cresce, assim configurando o potenciômetro na porcentagem descrita na figura 24 a tensão de saída será de aproximadamente 3.6 V.

Figura 24 – Circuito  
LDR



Fonte: Autor

### 3.3.3 Sistema integrado

Os *System-on-a-chip* (SoC)'s serão utilizados de forma a facilitar o desenvolvimento e melhorar o desempenho energético do sistema, pois muitos deles já são desenvolvidos com propósitos específicos como SoC's com ênfase em desempenho oferecendo vários recursos predefinidos no seu *hardware* que possibilitam ao desenvolvedor fazer uso desses recursos para maximizar o uso desse componente.

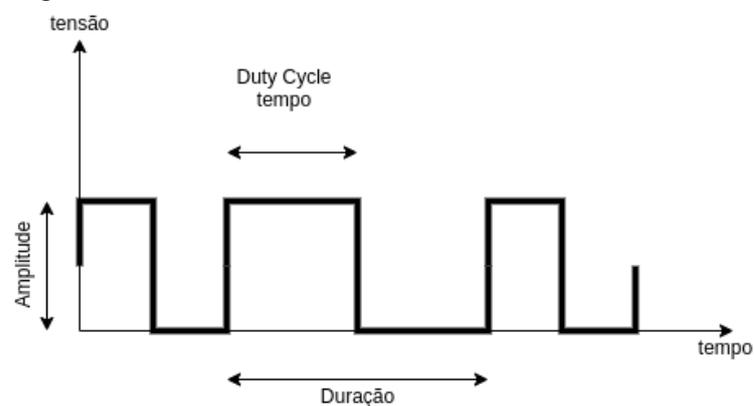
O SoC que será usado neste trabalho terá como principal característica a economia de energia, pois ele deve ser capaz de fazer cálculos matemáticos, capturar dados dos sensores LDR e de acordo com a interpretação dada para os valores de cada sensor o SoC deverá emitir sinais de controle para os motores que serão os atuadores do sistema.

### 3.3.4 Motores

Os motores serão usados para fazer a movimentação dos painéis solares, fazendo o ajuste para que aumente a taxa de incidência dos raios solares na face do painel solar. O protótipo do suporte móvel solar seguirá baseado na implementação de dois motores um responsável pela rotação no eixo horizontal e outro para o eixo vertical. Assim a movimentação do suporte será baseado em dois servo motores sendo cada motor responsável por fazer a rotação do painel em um eixo.

O funcionamento dos motores em individual é baseado em sinais de PWM, como pode ser visto na figura 25, dessa forma podemos regular o ângulo de cada motor individualmente gerando assim um novo ângulo do painel solar.

Figura 25 – PWM



Fonte: Autor

### 3.4 Software

Nas seções anteriores foram abordados a base teórica referente ao posicionamento solar durante o céu e foi feito um estudo das energias em um sistema com um plano inclinado, também foi abordado paralelamente a maneira de realizar o cálculo de eficiência do painel solar.

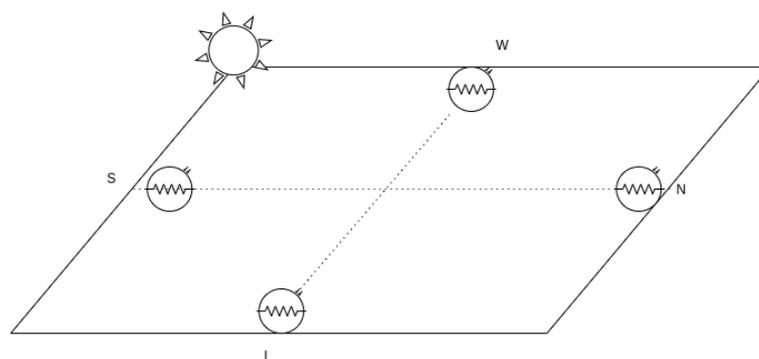
Logo após de criar a base teórica sobre Sol, foi feito uma breve explicação de cada tópico que será usado na implementação do *hardware*, desde os painéis solares até o SoC, quais serão os parâmetros que serão usados para escolha do SoC. Dessa forma o *software* deve ser capaz de fazer a leitura dos sistema de sensoriamento solar, ser capaz de gerar sinais *PWM* para cada motor da grade de sistemas solares e por fim deve ser capaz de calcular a eficiência do sistema para poder fazer ajustes de melhoria do rendimento.

Nesta seção irei fazer explicações de como será feito a implementação de cada requisito falado no parágrafo anterior.

#### 3.4.1 Rastreamento solar via software

O rastreamento solar será feito usando duas maneiras para aproximar o máximo possível a posição do Sol em um determinado tempo, ou seja, o *software* terá dois recursos para inferir a posição solar, o primeiro recurso são as equações de rastreamento listada na seção 3.2, e o segundo artifício de são os dados dos sistema de sensoriamento que é composto por quatro sensores fotorresistivo LDR. Dessa forma pode ser calculado a posição do Sol juntamente com

Figura 26 – Distribuições dos sensores



Fonte: Autor

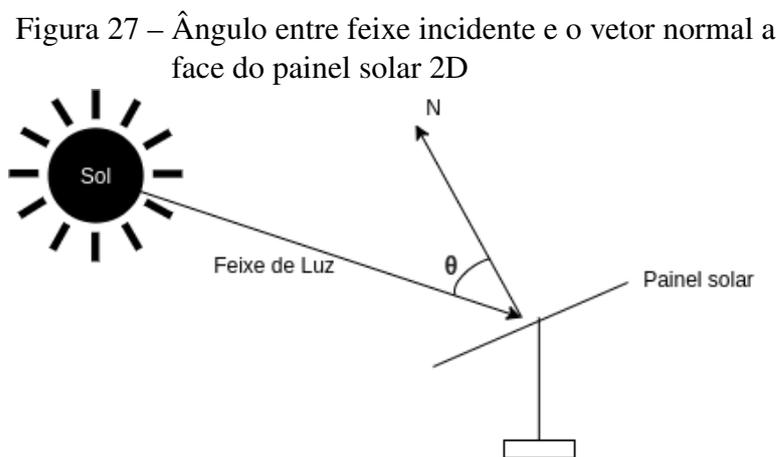
a altura e via cálculos matemáticos o software ser capaz de gerar uma resposta em ângulos de rotação para cada eixo.

### 3.4.2 Controle dos motores via parâmetros de rastreamento

Partindo do ponto em que na seção 3.4.1 é capaz de fazer uma conversão dos valores dos sensores LDR uma implementação de geração dos sinais PWM para movimentação dos painéis solares que correspondam ao valor mais próximo possível da equação 3.42.

$$\cos(\theta) = 1 \quad (3.42)$$

Sendo  $\theta$  o ângulo entre o raio de incidência solar e o vetor normal a face do painel solar, como pode ser visto na figura 27.



Ou seja, o principal objetivo de fazer a rotação dos painéis solares é reduzir o máximo possível o valor dessa variação, fazendo o ângulo chegar mais próximo possível de 0 faz com que o painel consiga captar o máximo de feixes de luz possível com a sua área de contato com os feixes solares.

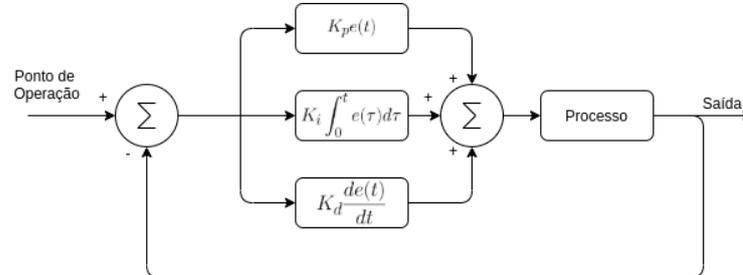
#### 3.4.2.1 Controle PID

Será usado um controle PID para aumentar maximizar a eficiência dos motores e aumentar precisão no estabelecimento dos ângulos solares. O controlador PID foi escolhido devido a sua capacidade de evitar vícios do tipo *on-off* que são decorrente de um controle baseado em apenas ligar e desligar o sistema de rotação dos painéis, ou seja, dessa forma o sistema deverá ser capaz de minimizar a instabilidades como tremores no painel solar durante sua rotação e na estabilidade final dos ângulos de operação.

Como fundamentação teórica sobre o controle PID e suas aplicações irei abordar os desenvolvimentos citados nos livros (NISE, 2012) e (OGATA, 2010) com intuito de proporcionar

a base numérica para o SoC se capaz de operar de acordo com o diagrama proposto de um sistema de controle PID como pode ser visto na figura 28.

Figura 28 – Malha do controle PID genérico



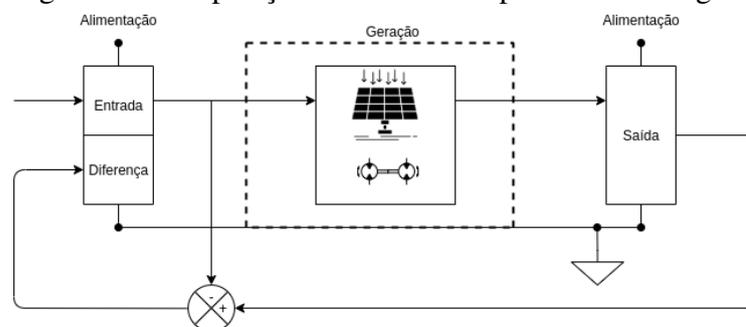
Fonte: Autor

### 3.4.3 Comparação de sinais para análise de eficiência

A análise de eficiência é o último recursos que o *software* deverá ser capaz de fazer, mas será o fato que determinará se uma configuração de ponto de operação está sendo produtiva para o sistema, ou seja, a potência de saída deverá ser superior a potência de entrada, dessa forma o software deverá conhecer os parâmetros de entrada energética e saída energética para gerar uma saída que seja visível pelo controlador e ele possa fazer os ajustes necessários.

A figura 29 representa o modelo abordado via software que será usado para o cálculo do ganho energético, esse cálculo deverá levar em conta a potência de entrada primeiramente, depois haverá uma aplicação dessa potência para a alimentação dos motores e painéis solares e após essa captação a potência de saída deverá ser maior que a potência de entrada, dessa forma a subtração das potências indicará um ganho ou não.

Figura 29 – Disposição dos elementos para cálculo do ganho



Fonte: Autor

### 3.5 Associação de painéis solares (Matriz de painéis)

Abstraindo o modelo de apenas um painel solar toda sua complexidade interna e trabalhando sobre a disposição deles em um modelo de matriz podemos adquirir uma soma dos seus ganhos assim podemos associar horizontalmente uma matriz de painéis  $m \times n$ .

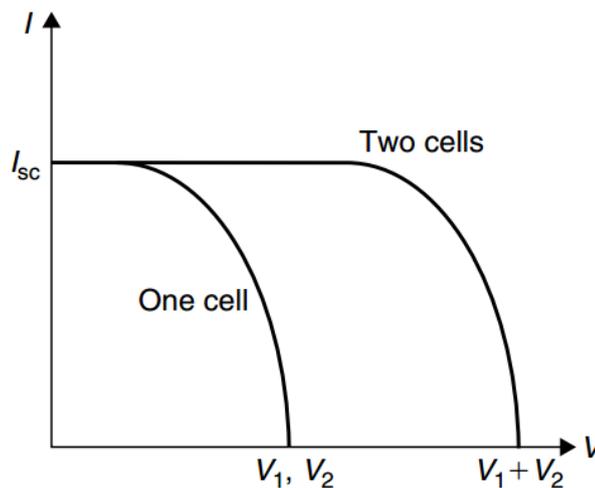
#### 3.5.1 Associação em série

Podemos fazer combinações das associações das células solares de várias maneiras trabalhando cada unidade como sendo apenas um ponto, dessa forma a primeira forma de associação das células que será abordado será a associação em série. A principal característica dessa associação é que quando conectamos células solares em série a corrente tende a se manter a mesma e as tensões são somadas, ou seja, para um sistema com uma quantidade de painéis solares com  $m$  painéis em série temos a seguinte equação 3.43 e curva característica 30.

$$V_{total} = \sum_0^{m-1} V_i \quad (3.43)$$

A curva é dada por:

Figura 30 – Curva dos modelos em série



Fonte: (KALOGIROU, 2013)

#### 3.5.2 Associação em paralelo

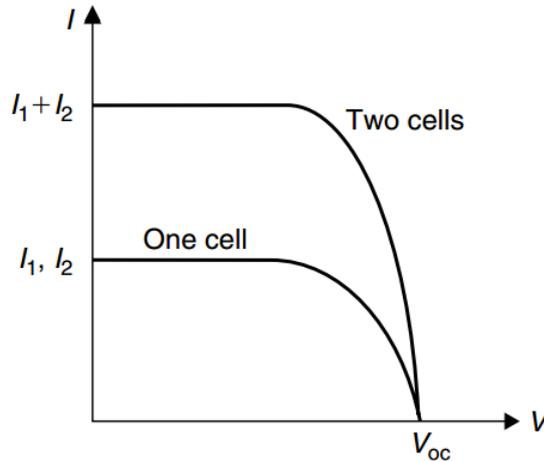
De forma semelhante a seção 3.5.1 podemos realizar uma associação em paralelo de  $n$  painéis solares que por sua vez tem a característica de manter tensão a mesma e a corrente resultante ser igual a soma das correntes dos painéis solares, como pode ser visto na equação

3.44 e sua representação gráfica mostrada no gráfico 31.

$$I_{total} = \sum_0^{n-1} I_i \quad (3.44)$$

A curva é dada por

Figura 31 – Curva dos modelos em paralelo



Fonte: (KALOGIROU, 2013)

### 3.5.3 Associação em matriz

Quando associamos as células solares normalmente fazemos uma associação híbrida, ou seja, uma matriz composta por blocos de células em série e cada bloco desse em paralelo um em conjunto com o seguinte, como é mostrado na figura 32. As relações matemáticas que podem ser inferidas no modelo proposto matricial pode ser visto nas equações.

A equação da corrente de saída final pode ser calculada como:

$$I^M = I_{sc}^M \left[ 1 - \exp \left( \frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{N_{SM} V_t^C} \right) \right] \quad (3.45)$$

sendo cada termo definido como as equações listadas abaixo e sufixo  $C$  corresponde a célula solar.

- Corrente de curto-circuito do módulo:

$$I_{sc}^M = N_{PM} I_{sc}^C \quad (3.46)$$

- Tensão de circuito aberto do módulo:

$$V_{oc}^M = N_{PM} V_{oc}^C \quad (3.47)$$

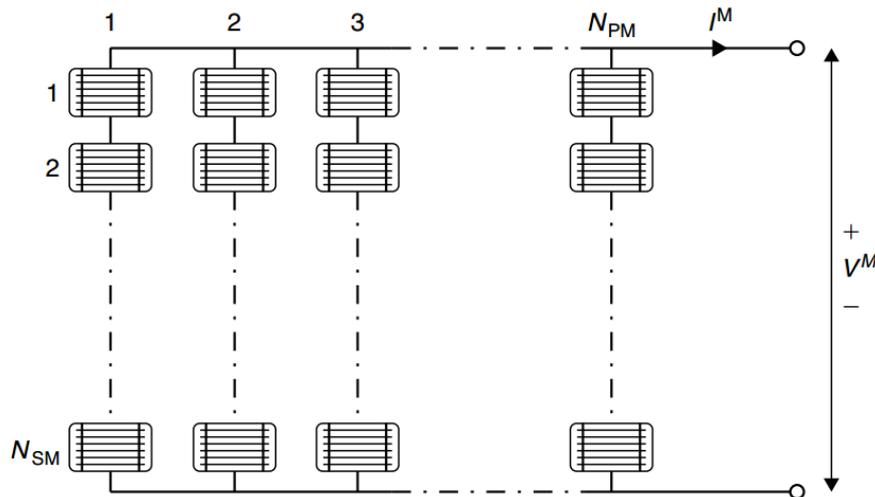
- Resistência equivalente do módulo:

$$R_S^M = R_S^C \frac{N_{SM}}{N_{PM}} \quad (3.48)$$

- Tensão térmica do semiconductor em uma única célula:

$$V_t^C = \frac{kT^C}{e} \quad (3.49)$$

Figura 32 – Modelo matricial com  $N_{PM}$  ramos paralelos, como cada ramo  $N_{SM}$  células em série



Fonte: (KALOGIROU, 2013)

### 3.6 Modelagem inicial do ambiente dos painéis solares

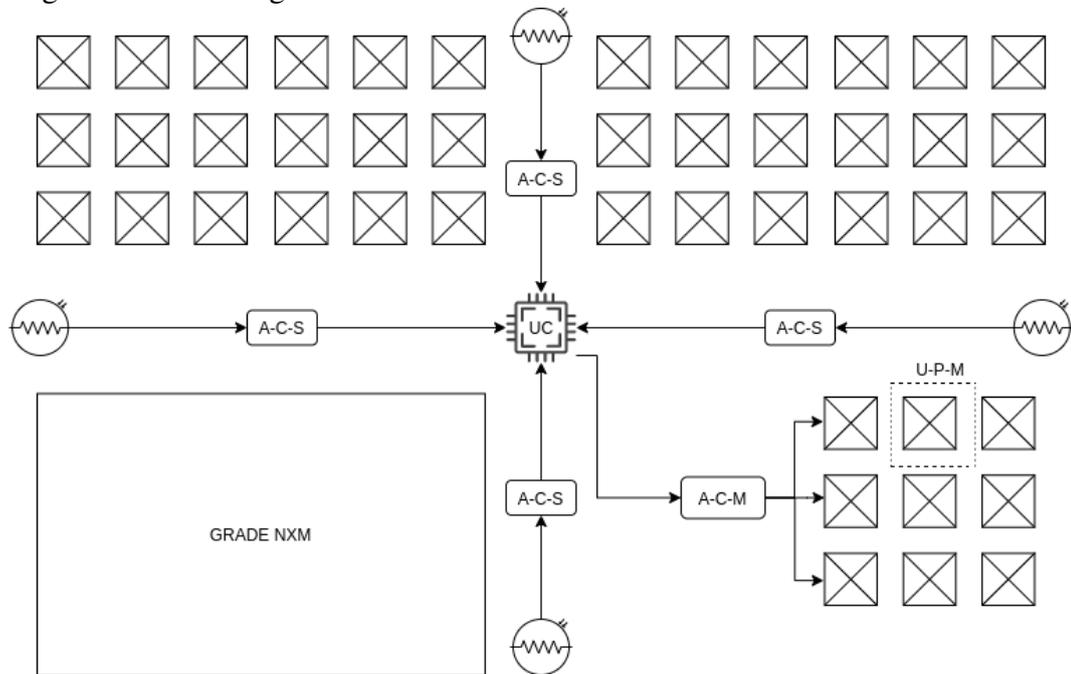
A modelagem do ambiente inicial corresponde ao modelo da figura 33 onde é composto por quatro sensores fotorresistivos, uma unidade central de controle, amplificadores de sinal e correção para os sensores e outro tipo de correção para os motores. Fazendo uma explicação breve de cada componente e sua devida funcionalidade temos :

- Sensores laterais fotorresistivos: A implementação do rastreamento solar como citado na seção 3.4.1 usará os sensores para determinar os ângulos solares para determinar sua localização angular e logo após via as equações de rastreamento irá calcular a altura do Sol no céu para ajustar os painéis.
- Unidade Central (UC): A unidade central terá a principal funcionalidade de realizar a computação dos parâmetros de entrada e saída, ou seja, será a unidade responsável por realizar os trabalhos descritos na seção 3.4.
- Amplificação e correção do sensor (A-C-S): Esse componente terá como principal característica fazer a amplificação do sinal enviado do sensor LDR. Essa implementação terá

como a principal motivação o prevê o meio prático, pois no meio simulado não há quedas de sinais como há nos fios que transportam os sinais elétricos.

- Amplificação e Correção do motor (A-C-M): Similar com o componente anterior o seu desenvolvimento ocorrerá pensando no meio prático, pelo mesmo argumento do ponto anterior no meio simulado não há quedas de sinais.
- Unidade do Painel e Motor (U-P-M): Esse componente é referente a junção de dois motores e um painel solar, ou seja, cada unidade dessa será um ponto com coordenadas na grade geral do sistema.
- Grade: A grade do sistema é composta por  $n$  (U-P-M) em uma direção e  $m$  (U-P-M) em outra direção, gerando assim uma grade  $n \times m$ .

Figura 33 – Modelagem do ambiente inicial



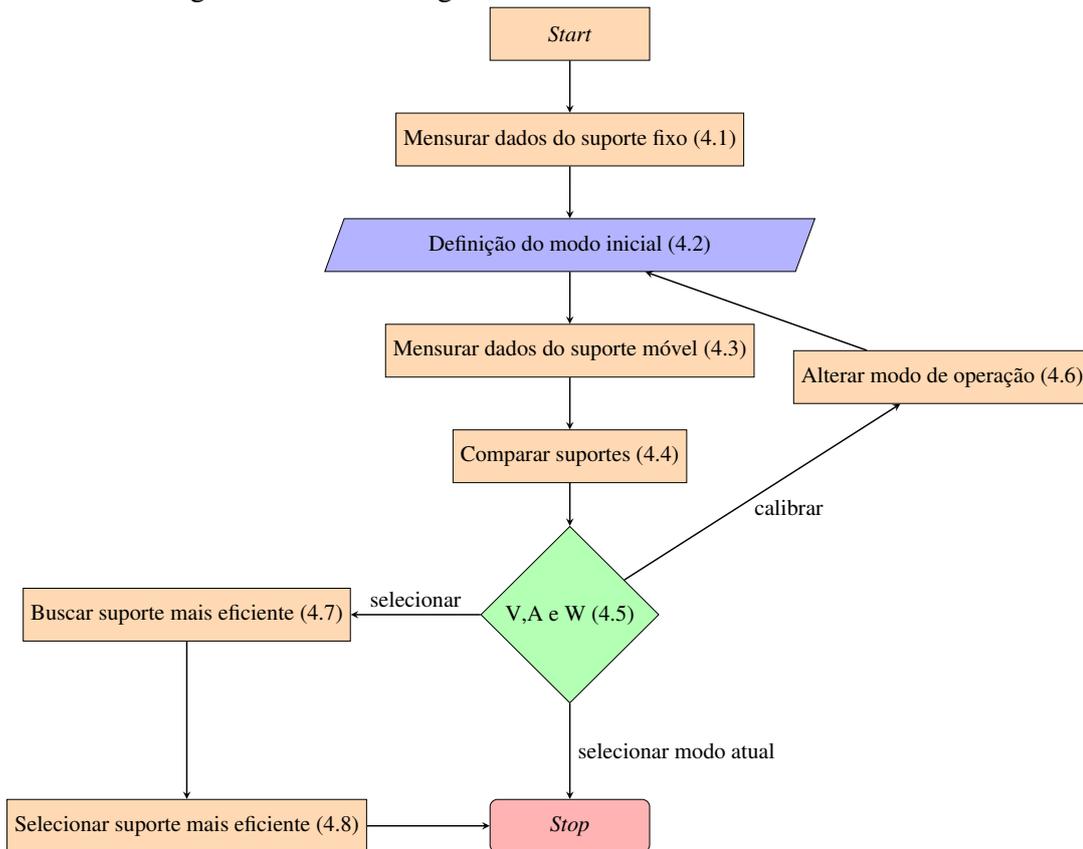
Fonte: Autor

## 4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O fluxograma 34 descreve o procedimento metodológico que será usado para fazer o levantamento das variáveis e a identificação do modelo de rastreamento com mais eficiência e o melhor em termos de eficiência energética entre os modelos móveis e o modelo fixo.

- **Objetivo principal:** Selecionar o modelo mais eficiente em termos de ganho energético.

Figura 34 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Autor

### 4.1 Mensurar variáveis do suporte fixo

- **Objetivo Principal:** Obter números que possam representar o desempenho do modelo fixo como valores de tensão, corrente e potência.
- **Passos:**
  1. Construção do modelo fixo para implementação no ambiente 33.
  2. Cálculo do consumo energético do modelo fixo.
  3. Cálculo da geração energética do modelo fixo.
  4. Mensurar dados do circuito de saída, tensão(V), corrente(A) e potência(W).

- **Justificativa:** A construção de um modelo fixo é base para que seja provado a hipótese inicial proposta no projeto que um sistema solar capaz de realizar o rastreamento e movimentação dos painéis solares que aumente a eficiência no ganho de cada painel solar em relação ao mesmo modelo fixo.

#### 4.2 Definição inicial do modo de operação padrão

- **Objetivo Principal:** Este ponto tem como principal objetivo usar o modelo obtido no passo 4.1 ou no passo 4.6 e definir como números de referência para o passo 4.3.
- **Justificativa:** É sempre necessário estabelecer um referencial de comparação, ou seja, esse passo é essencial pois nele é definido o modelo que será utilizado posteriormente como base comparativa.

#### 4.3 Mensurar variáveis do suporte móvel

- **Objetivo Principal:** Obter números que possam representar o desempenho do modelo móvel como valores de tensão, corrente e potência levando em consideração a movimentação do painel solar.
- **Passos:**
  1. Adaptação do modelo criado no passo 4.1 para fazer o rastreamento solar.
  2. Cálculo do consumo energético do modelo móvel.
  3. Cálculo da geração energética do modelo móvel.
  4. Mensurar dados do circuito de saída, tensão(V), corrente(A) e potência(W).
- **Justificativa:** Similarmente ao argumento dado na justificativa do modelo fixo 4.1 esse passo se torna essencial para provar que o rastreamento solar e a movimentação dos painéis solares aumentam o ganho energético do sistema de captação, como falado anteriormente, é a hipótese inicial proposta deste trabalho.

#### 4.4 Cálculo comparativo da eficiência entre o modelo fixo e móvel

- **Objetivo Principal:** Fazer um comparativo(matematicamente e visualmente via gráficos) entre as variáveis obtidas nos passos 4.1 e 4.3 comparando a eficiência de cada modelo para os dois intervalos que são eles [*sunrise:noon*] e [*noon:sunset*].
- **Justificativa:** O cálculo entre dois modelos é o passo matemático que irá determinar qual

modelo é o mais eficiente energeticamente analisando e irá ser o ponto onde será provado matematicamente se para a implementação desenvolvida é válido a hipótese inicial.

#### 4.5 Armazenamento das variáveis da configuração mais eficiente

- **Objetivo Principal:** O objetivo principal é armazenar os valores de tensão, corrente e potência do modelo mais eficiente obtido no passo 4.4 e quais configurações das variáveis de ambiente o *software* tinha para os números do modelo mais eficiente, como qual velocidade de rotação do painel, precisão e tempo de espera entre leituras.
- **Ramificação:** Este ponto é a ramificação onde é feita a escolha se o modelo mais eficiente será o modelo atual, se haverá a necessidade de definir esse modelo como o modelo mais eficiente, mas ainda irei buscar por mais modelos 4.6 ou irei apenas armazenar os dados para uma busca futura 4.7.
- **Justificativa:** No estudo dos modelos móveis e o modelo fixo é necessário construir uma base de dados para a partir dela poder decidir qual caminho a pesquisa sobre os modelos deve prosseguir.

#### 4.6 Alterar o modo de operação

- **Objetivo Principal:** Definir o modelo mais eficiente encontrado no passo 4.4 como modelo padrão para seguir o fluxo novamente de busca do modelo mais eficiente.
- **Justificativa:** Este passo se torna importante quando é feita a primeira análise entre um modelo fixo e um modelo móvel e logo após isso queremos continuar as pesquisas como outras configurações de modelos para encontrar o modelo mais eficiente.

#### 4.7 Buscar o modo de operação mais eficiente na base de dados

- **Objetivo Principal:** Fazer uma busca na lista de modelos testados e armazenados na base de dados como possíveis modelos que são candidatos a modelo mais eficiente e retornar as definições de *software* que resultaram nos melhores valores de tensão(V), corrente(A) e potência(W).
- **Justificativa:** Partindo do ponto que temos uma base de dados com configurações de definições de *software* e seus respectivos resultados, podemos realizar uma busca nesses modelos e obter o modelo mais eficiente levando em conta as variáveis que desejamos

analisar, para um ganho energético estamos olhando para a variável Potência(W) por exemplo. Ou seja, esse passo é essencial para que a pesquisa seja capaz de fazer uma busca nos modelos já testados e apontar qual modelo teve o melhor desempenho.

#### **4.8 Define o modo mais eficiente como modo de operação padrão**

- **Objetivo Principal:** Definir o modelo obtido no passo 4.7 como o modelo mais eficiente.
- **Justificativa:** Dado o passo anterior 4.7 a definição do passo mais eficiente é essencial pois neste ponto definimos que o modelo que é capaz de oferecer o maior ganho energético é o modelo que proporciona maiores ganhos em termos de eficiência, logo será o modelo escolhido como modelo padrão de operação do sistema proposto neste trabalho.

## 5 DESENVOLVIMENTO

O sistema foi desenvolvido no SoC ARM Cortex-M0 LPC1114FN28/102. Este componente foi escolhido devido a sua finalidade que é voltado para aplicações que necessitam de um baixo consumo energético.

### 5.1 Sensores

Os sensores de luminosidades LDR como é mostrado na figura 26 foram distribuídos um em cada ponto cardeal.

#### 5.1.1 *Captação da luminosidade*

A primeira etapa no desenvolvimento foi a captação dos valores que cada sensor está retornando, e foi desenvolvido uma regressão polinomial para estimar a luminosidade com o valor lido pelo microcontrolador pois a resposta do sensor LDR não é uma resposta linear, então o custo computacional para encontrar o valor desejado é maior, logo foi usado uma aproximação via regressão polinomial.

A função  $R(x)$  tem como parâmetro o valor da tensão lido pelo microcontrolador no Conversor Analógico Digital e como saída o valor aproximado da luminosidade que está sendo lida naquele momento. Os valores de tensão esperados estão no intervalo de 0 V e 3,6 V que correspondem aos valores de luminosidade respectivamente de 0.1 lux e 1000 lux.

$$R(x) = 40,3425911553458x^3 - 121,122548613755x^2 + 178,372220206103x - 11,0450859356278 \quad (5.1)$$

Conseqüentemente como está sendo feito uma aproximação é natural que haja um certo erro no valor lido. Sendo o erro máximo de 27,45738833 lux e a média dos erros de 12,07867107 lux.

Figura 35 – Relação entre a luminosidade real e a regressão



Fonte: Autor

### 5.1.2 rastreamento solar

Após realizar a leitura de cada sensor de luminosidade separadamente eles foram separados em pares, nomeados como sendo o eixo Norte-Sul e o eixo Leste-Oeste, ou seja, caso os sensores retornem um valor de leitura maior para o leste no eixo Leste-Oeste e um valor maior no Norte no eixo Norte-Sul podemos inferir que o Sol se encontra em algum lugar no quadrante Norte-Leste, sendo o céu visível olhando de uma visão superior temos quatro, o quadrante Norte-Leste, Leste-Sul, Sul-Oeste e Oeste-Norte.

Foi modelado uma função que sejam capaz de dizer o ângulo solar em um eixo composto pelos pontos cardeais A e B. Como o movimento solar é descrito por nascer no leste e se pôr no oeste podemos afirmar que para pequenos valores de leitura no sensor do leste isso se caracteriza como um nascente, e analogamente para o sensor do oeste irá se caracterizar como poente.

A função  $T(A, B)$  tem como finalidade de receber dois valores de luminosidade dos sensores A e B e retornar o ângulo (em radianos) da posição solar dado a luminosidade passada. Sendo a saída um valor entre  $[0, \frac{\pi}{2}]$ .

$$T(A, B) = \begin{cases} \frac{\pi \cdot A}{2 \cdot Lux_{Max}} & A > B \\ \frac{-\pi \cdot B}{2 \cdot Lux_{Max}} + \pi & B < A \\ \frac{\pi}{2} & A = B \end{cases} \quad (5.2)$$

Desta forma o rastreamento solar pôde ser feito pois primeiramente aplicamos esta função aos valores dos sensores no eixo Leste-Oeste e logo após nos sensores dos eixos Norte-

Sul, assim conseguimos o deslocamento angular do sol de acordo com os valores de leitura dos quatro sensores de luminosidade.

## 5.2 Atuadores

Os atuadores desenvolvidos consistem em dois servo-motores que terão a finalidade de representar a posição solar tanto no eixo Norte-Sul quanto no eixo Leste-Oeste. Esta representação foi desenvolvida com a movimentação das hastes de cada motor fazendo assim a representação para cada eixo.

### 5.2.1 Definição do ponto de operação

Como a função 5.2 é responsável por retornar o ângulo em que o sol se encontra em um determinado eixo, o ponto de operação consiste na resposta desta função, pois como ela retornará um ângulo onde está havendo uma maior radiação solar, então será neste ângulo que os motores deverão estar direcionados.

Como os motores são controlados via PWM, ou seja, cada largura do pulso que definimos corresponde ao ângulo que a haste irá ser direcionada, assim foi criada uma função responsável por fazer a conversão valores de inclinação (em radianos) para valores correspondentes na representação em largura de pulso do PWM, assim criando uma relação de 0 rad corresponde a 1 ms e  $\pi$  rad corresponde a 2 ms.

$$RadMs(x) = \frac{x}{\pi} + 1 \quad (5.3)$$

### 5.2.2 Controles dos atuadores

Neste ponto temos um ponto de controle bastante definido em duas unidades de medidas, em radianos e em milissegundos, sendo a unidade de milissegundos o ponto de atuação dos motores. Para realizar o controle dos motores foi feito um controle PID, onde foi escolhido as três constantes que definem o comportamento do controlador sobre a planta de atuação.

- Constante proporcional

$$K_p = 0,05 \quad (5.4)$$

- Constante integrativa

$$K_i = 0,98 \quad (5.5)$$

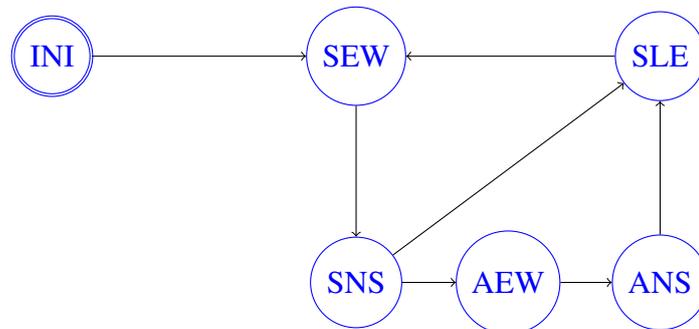
- Constante derivativa

$$K_d = 0,0525 \quad (5.6)$$

### 5.3 Máquina de estado do sistema

Como o sistema foi projetado para não haver uma execução constante e sim de tempos em tempos, e seu comportamento durante a noite é diferente, foi definido a máquina de estados abaixo:

Figura 36 – Máquina de estado do sistema desenvolvido



Fonte: Autor

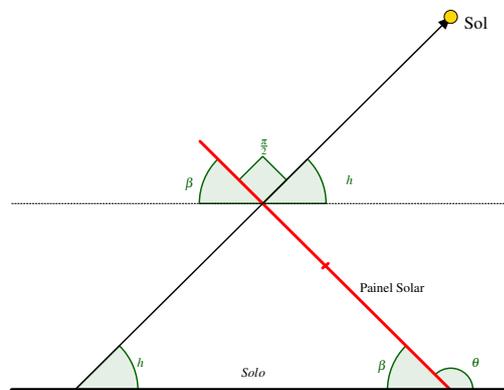
- INI: Sigla para Inicial. Este estado tem como objetivo realizar as inicializações iniciais do sistema.
- SEW: Sigla para Sensores leste e oeste. Este estado tem como objetivo fazer a leitura dos sensores de luminosidade do leste e do oeste e realizar o rastreamento solar para este eixo.
- SNS: Sigla para Sensores norte e sul. Este estado tem como objetivo fazer a leitura dos sensores de luminosidade do norte e do sul e realizar o rastreamento solar para este eixo. Caso seja detectado noite neste estado o sistema não irá fazer nenhuma alteração nos motores e será automaticamente redirecionado para o estado SLE.
- AEW: Sigla para atuador do leste e oeste. Este estado tem como objetivo ativar o atuador para o ponto de controle obtido no estado SEW.
- ANS: Sigla para atuador do norte e sul. Este estado tem como objetivo ativar o atuador para o ponto de controle obtido no estado SNS.
- SLE: Sigla para Modo Sleep. Este estado tem como objetivo colocar o sistema em modo de espera até um determinado tempo, se o sistema detectar que está de dia o tempo será menor

em comparação se o sistema detectar que está de noite. Ao fim do tempo programado o sistema será redirecionado para a leitura dos sensores.

#### 5.4 $\beta$ - ângulo de inclinação

O ângulo de inclinação  $\beta$  é o ângulo ideal para o painel estar em relação ao ângulo horário, ou seja, é o ângulo onde a incidência dos raios solares estão totalmente perpendiculares ao painel solar, aumentando assim sua eficiência na captação da radiação solar.

Figura 37 – Obtenção do ângulo de inclinação  $\beta$  via ângulo obtido pelo sistema  $\theta$  e via ângulo horário  $h$



Fonte: Autor

- $h$ : Ângulo horário.
- $\beta$ : Ângulo de inclinação do painel solar.
- $\theta$  Ângulo obtido pelo sistema.

O ângulo de  $\theta$  corresponde ao ângulo obtido pelo sistema, dessa maneira podemos matematicamente determinar o ângulo  $\beta$ .

Para verificar a precisão do sistema em determinar o ângulo horário  $h$  e a correspondência das duas formas da obtenção do ângulo de inclinação do painel, este calculo foi realizado baseado no ângulo horário e determinado a precisão do sistema no rastreamento solar e conseqüentemente no ângulo de inclinação do painel solar.

$$\beta = \frac{\pi}{2} - h \quad (5.7)$$

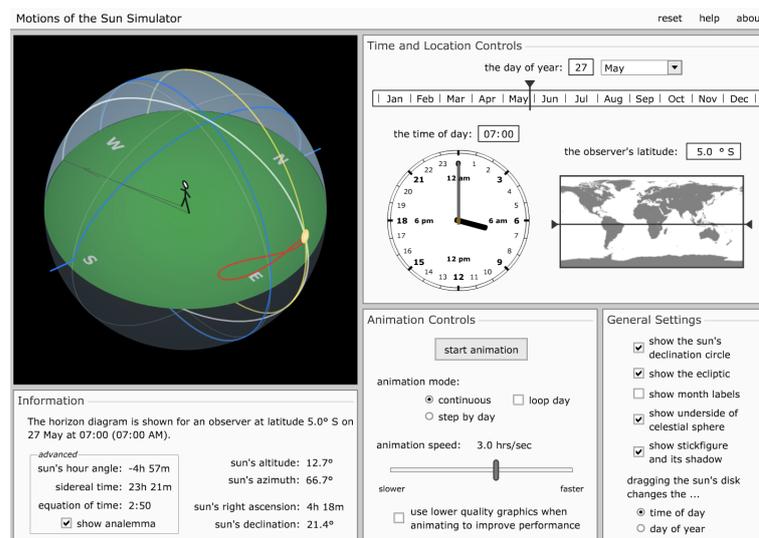
## 5.5 Simuladores

Foram usados dois simuladores para a obtenção dos dados que serão mostrados na seção 6. Sendo um simulador responsável por retornar os valores dos ângulos solares para a posição no globo determinada e a variação do horário do dia.

### 5.5.1 Simulação da posição solar

Foi usado o simulador da (University of Nebraska-Lincoln, 2019), pode ser visto na figura 38. Este simulador teve o principal objetivo de inserir o valor de latitude, horário do dia e dia do ano, e ter como retorno o ângulo azimute e o ângulo horário.

Figura 38 – Simulador usado para captação dos ângulos solares

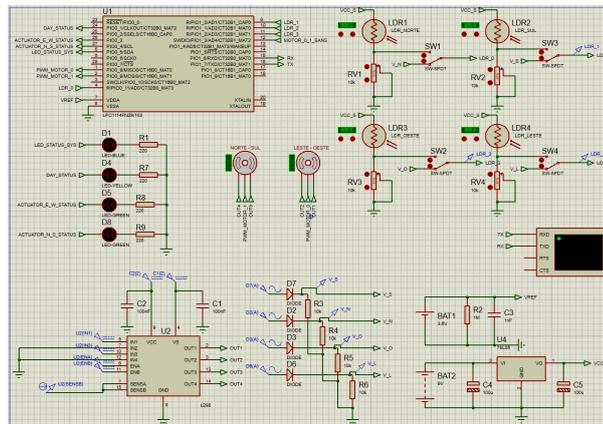


Fonte: Autor

### 5.5.2 Simulação dos circuitos elétrico e painel solar

Para a simulação das respostas dos componentes elétricos e eletrônicos, foi usado o simulador Proteus Design Suite. Este simulador teve a finalidade simular toda a parte projetada no sistema, tanto os códigos para o *firmware* tanto os circuitos elétricos, como o painel solar, condicionamento de sinais dos sensores LDR e motores, como pode ser visto na figura 39.

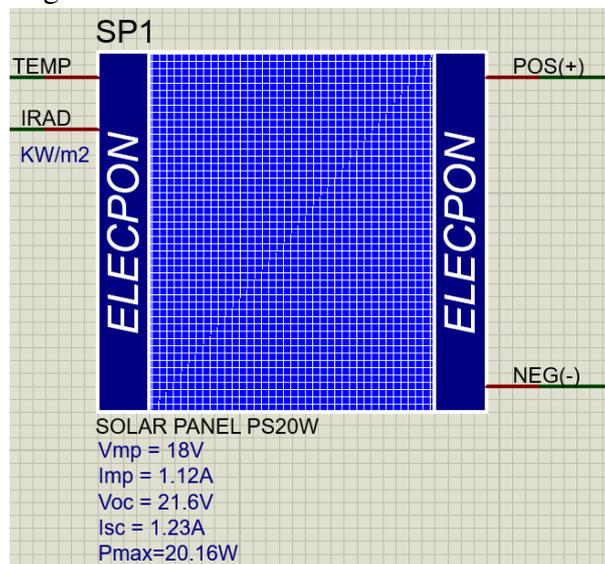
Figura 39 – Hardware desenvolvido no simulador



Fonte: Autor

O painel solar usado no simulador contém duas entradas e duas saídas, as duas entradas correspondem primeiramente a temperatura e a segunda entrada a radiação em  $W/m^2$ , e como saída o painel solar apresenta um terminal positivo e um terminal negativo. Essa descrição pode ser vista na figura .

Figura 40 – Painel solar usado no simulador



Fonte: Autor

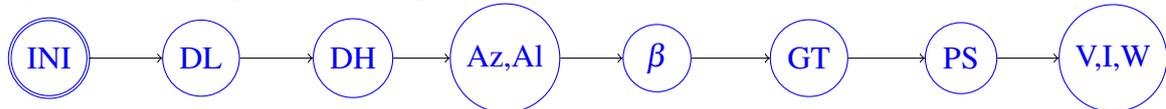
### 5.5.3 Obtenção dos dados via simulação

A obtenção dos dados importantes para o estudo desenvolvido neste trabalho tem relação direta com os dois fluxogramas desenvolvidos abaixo, um para o sistema totalmente ideal e o outro para o sistema desenvolvido.

### 5.5.3.1 Fluxograma para o sistema ideal

O fluxograma 41 tem como objetivo ilustrar o procedimento usado para representar um sistema totalmente teórico.

Figura 41 – Fluxograma com os passos para um sistema ideal



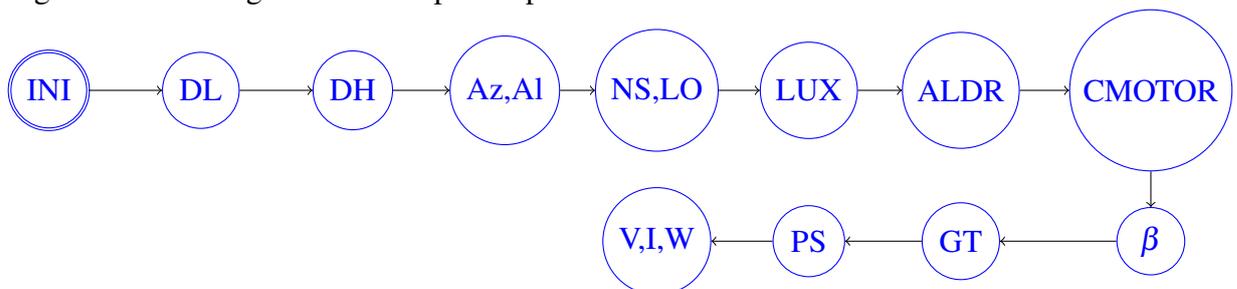
Fonte: Autor

- INI: Início do fluxograma.
- DL: Definição da latitude.
- DH: Definição do horário do dia.
- Az,Al: Via o simulador (University of Nebraska-Lincoln, 2019) é obtido os valores dos ângulos solares, azimute e altitude.
- $\beta$ : é calculado o ângulo de inclinação ideal  $\beta$  usando a equação 5.7.
- GT: Aplicado o ângulo  $\beta$  na equação 3.29.
- PS: Aplicado a radiação obtida no passo anterior no painel solar do simulador Proteus Design Suite.
- V,I,W: Obtenção dos valores de tensão, corrente e potência para a radiação do passo anterior.

### 5.5.3.2 Fluxograma para o sistema desenvolvido

O fluxograma 42 corresponde ao procedimento desenvolvido para determinar as variáveis para para o sistema desenvolvido.

Figura 42 – Fluxograma com os passos para o sistema desenvolvido



Fonte: Autor

- INI: Início do fluxograma.
- DL: Definição da latitude.
- DH: Definição do horário do dia.
- Az,Al: Via o simulador (University of Nebraska-Lincoln, 2019) é obtido os valores dos ângulos solares, azimute e altitude.
- NS,LO: Conversão do sistema de coordenadas padrão que é constituído pelo ângulo azimute e altitude para o sistema de coordenadas usado pelo sistema, que é definido pelo ângulo formado entre os pares de pontos cardeais, Norte-Sul e Leste-Oeste.
- LUX: Obtenção dos valores de luminosidade que gera o ângulo de inclinação obtido no passo anterior, que é basicamente uma função inversa da função 5.2.
- ALDR: Aplicação dos valores obtidos no passo anterior nos sensores LDR no sensor Proteus Design Suite. Ou seja, para cada eixo formado pelos pontos cardeais será aplicado o valor de luminosidade nos sensores que retornam a inclinação obtida.
- CMOTOR: Obtenção do ângulos de inclinações dos motores com a implementação obtida.
- $\beta$ : Cálculo do ângulo beta de acordo com os ângulos obtidos no passo anterior.
- GT: Aplicado o ângulo  $\beta$  na equação 3.29.
- PS: Aplicado a radiação obtida no passo anterior no painel solar do simulador Proteus Design Suite.
- V,I,W: Obtenção dos valores de tensão, corrente e potência para a radiação do passo anterior.

## 6 RESULTADOS

Neste capítulo será mostrado todos os resultados encontrados, como números que representam a precisão de determinação da posição solar de acordo com as leituras dos sensores de luminosidade, valores dos ganhos dos painéis solares móveis em relação ao painel solar fixo, e por último a comparação de um sistema totalmente teórico e o sistema prático via simulação, para assim mensurar o quão próximo do modelo ideal o sistema proposto foi capaz de chegar.

### 6.1 Comportamento do ângulos solares e radiação

Como foi falado no capítulo 3 temos basicamente dois ângulos que determinam a posição solar, tanto durante o dia quanto pela noite, mas para este trabalho como estamos buscando ganhos na captação da luz solar iremos abordar o rastreamento solar durante o dia, do nascer do sol ao pôr do sol.

Este estudo teve como principal objetivo ter uma visualização do comportamento dos ângulos solares em determinados pontos do ano, que são eles solstício de inverno, solstício de verão e o ponto médio que se encontra no equinócio. O local de estudo que foi observado no globo terrestre corresponde a latitude 5° ao Sul. Para realizar a coleta de dados foi usado um simulador da (University of Nebraska-Lincoln, 2019).

Tabela 2 – Comportamento dos ângulos solares e da potência em relação ao horário do dia

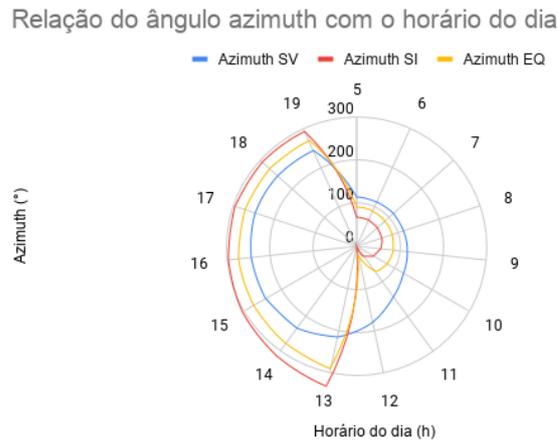
Horas do dia	Solstício de Verão (SV)(21 de dezembro)			Solstício de Inverno (SI) (21 de junho)			Equinócio (EQ) (20 de Março)		
	Azimuth SV	Altitude SV	KW/m <sup>2</sup> SV	Azimuth SI	Altitude SI	KW/m <sup>2</sup> SI	Azimuth EQ	Altitude EQ	KW/m <sup>2</sup> EQ
5:00 h	115,1	-11,3	0	67	-16,1	0	91,5	-16,8	0
6:00 h	113,3	2,4	0,51	66,7	-2,4	0	90,2	-1,9	0
7:00 h	113	16,1	0,72	64,9	11,3	0,05	88,8	13,1	0,49
8:00 h	114,2	29,8	0,82	61,4	24,6	0,37	87,3	28	0,71
9:00 h	117,8	43,3	0,89	55,3	37,4	0,605	85,3	42,9	0,81
10:00 h	125,8	56	0,91	45	48,9	0,72	81,9	57,8	0,86
11:00 h	144,1	66,8	0,93	27,3	57,8	0,76	73,8	72,4	0,89
12:00 h	181,2	71,5	0,95	0,7	61,6	0,778	19,9	84,6	0,9
13:00 h	217,3	66,3	0,94	334,1	58,2	0,761	290,8	75,9	0,89
14:00 h	234,8	55,4	0,91	315,8	49,5	0,71	279,5	61,4	0,86
15:00 h	242,5	42,6	0,89	305,1	38,1	0,61	275,5	46,6	0,81
16:00 h	245,9	29,1	0,82	298,9	25,4	0,37	273,3	31,7	0,7
17:00 h	247	15,4	0,71	295,3	12,1	0,05	271,7	16,7	0,48
18:00 h	246,6	1,6	0,51	293,4	-1,5	0	270,4	1,8	0,032
19:00 h	244,7	-12	0	293	-15,3	0	269,1	-13,1	0

Fonte: Autor

### 6.1.1 Ângulos solares

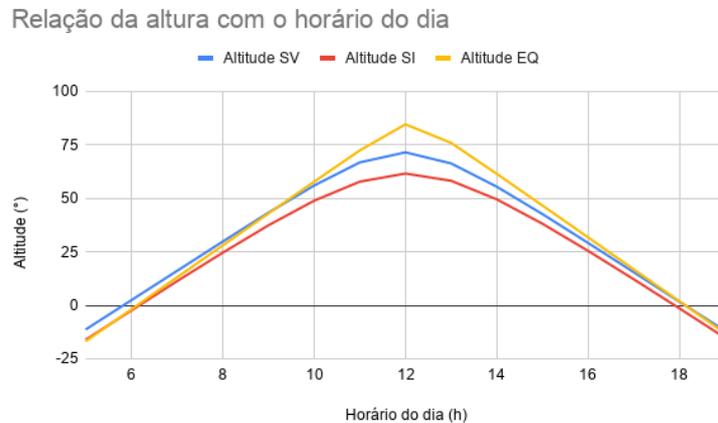
O comportamento dos ângulos solares azimute e altitude de acordo com a tabela apresentada acima:

Figura 43 – Relação do ângulo azimute durante o dia



Fonte: Autor

Figura 44 – Relação do ângulo altitude durante o dia

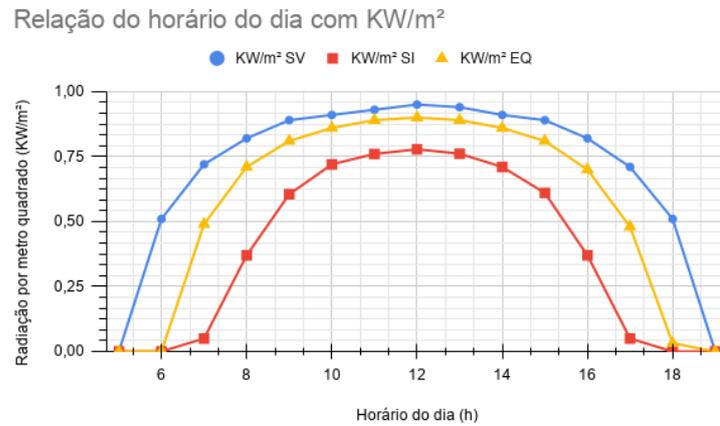


Fonte: Autor

### 6.1.2 Radiação solar

A quantidade de radiação solar que podemos captar é algo que está diretamente ligado ao horário do dia e também a localização no globo terrestre. Foi realizado um estudo da quantidade de radiação por metro quadrado durante o período do nascer ao pôr do sol. O gráfico correspondente à entre o horário do dia e a radiação por metro quadrado pode ser visto na figura 45.

Figura 45 – Relação entre a radiação por metro quadrado com o horário do dia



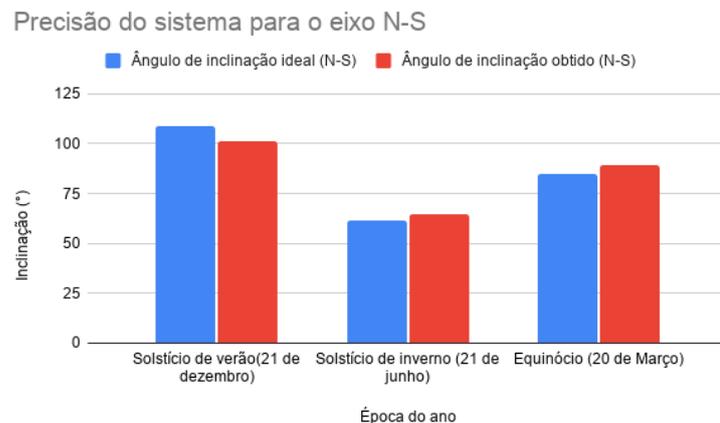
Fonte: Autor

## 6.2 Precisão do sistema na determinação da posição solar

Nessa seção será mostrado os resultados da comparação dos ângulos solares reais que foram obtidos do simulador (University of Nebraska-Lincoln, 2019) com os ângulos solares obtidos pelo sistema. Outra variável que será medida é o quão preciso o sistema é em gerar o melhor ângulo de inclinação para maximizar a captação dos raios solares seguindo o método matemático mostrado na figura 37 nos eixos Norte-Sul e Leste-Oeste.

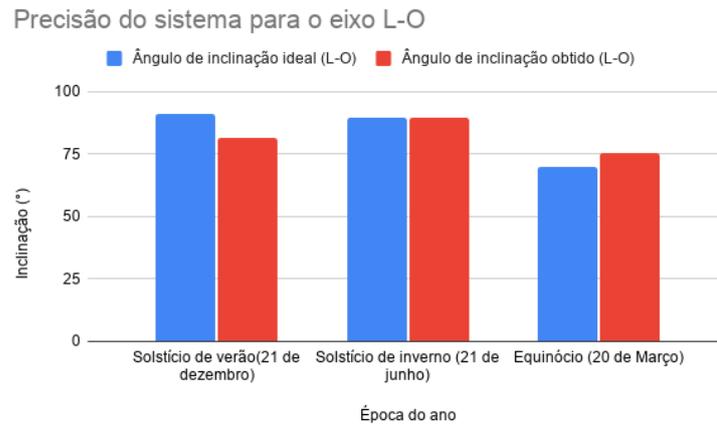
Foi feito uma análise da precisão do sistema fazendo a comparação do ângulo de inclinação ideal nos eixos Leste-Oeste e Norte-Sul e o ângulo de com os ângulos gerados pelo sistema fazendo essa medição nos extremos do movimento solar que são representados pelos solstícios e o ponto médio entre os extremos que é equinócio, e os resultados podem ser vistos nos gráficos abaixo.

Figura 46 – Precisão de inclinação no eixo Norte-Sul



Fonte: Autor

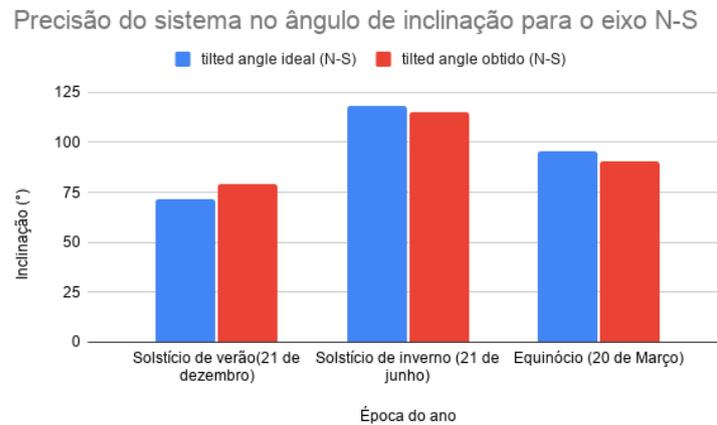
Figura 47 – Precisão de inclinação no eixo Leste-Oeste



Fonte: Autor

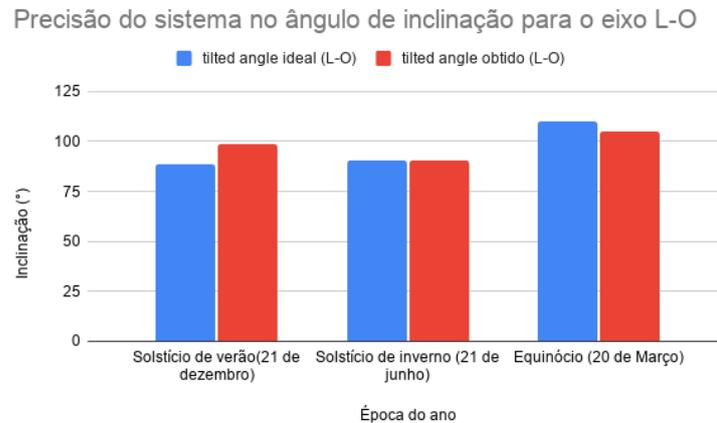
Com esses dados foram calculados os ângulos de inclinação  $\beta$  ideal e o ângulo de inclinação obtido pelo sistema para fazer a relação de precisão entre os dois modelos, o modelo ideal e o modelo obtido.

Figura 48 – Precisão do ângulo  $\beta$  inclinação no eixo Norte-Sul



Fonte: Autor

Figura 49 – Precisão do ângulo  $\beta$  inclinação no eixo Leste-Oeste



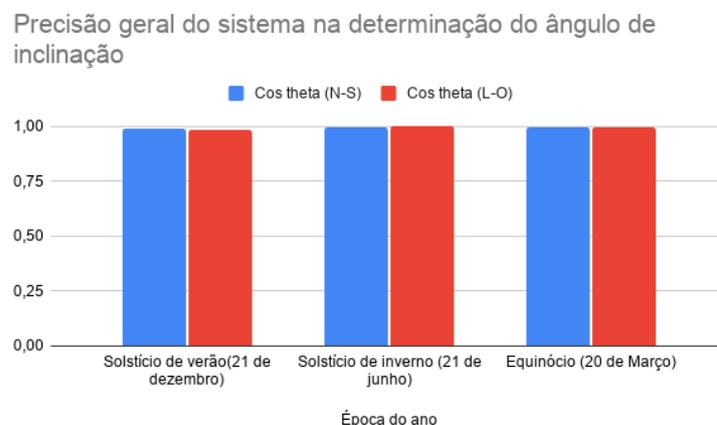
Fonte: Autor

O ângulo de inclinação  $\beta$  mostrado na figura 5.7 corresponde ao ângulo de inclinação ideal. O sistema tenta fazer uma aproximação máxima possível do ângulo de inclinação ideal  $\beta$ , esse ângulo de aproximação do ângulo  $\beta$  é denominado como  $\beta'$ . Para determinar a precisão do sistema primeiramente foi definido o erro entre o ângulo ideal e o ângulo obtido como é visto na equação 6.1

$$erro = \beta - \beta' \quad (6.1)$$

Logo após a obtenção do erro foi aplicado a função cosseno no valor do erro para os valores medidos, pois devido a propriedade da função cosseno quanto menor o erro mais próximo de 1 a função cosseno retornará.

Figura 50 – Precisão do ângulo  $\beta$  geral



Fonte: Autor

### 6.3 Comparação pontual entre um painel fixo, móvel ideal e o desenvolvido

Primeiramente será realizado uma abordagem individual dos números que correspondem a resposta do sistema para um dia do ano aleatório, para um horário do dia aleatório também, este será a primeira resposta do sistema e logo após esta seção será abordado a resposta do sistema para um intervalo de tempo.

Nesta seção irei abordar os resultados teóricos e práticos encontrados para um modelo de painel fixo horizontalmente, um segundo modelo móvel considerado ideal e por ultimo o terceiro modelo que é o modelo desenvolvido neste trabalho. As variáveis abaixo correspondem aos parâmetros necessários para realizar os primeiros cálculos teóricos e práticos.

- Dia do Ano:  $N = 250$
- Ângulo horário: 14 : 00 h ou  $60^\circ$
- Latitude:  $48^\circ$  N
- Temperatura: 300, 15 K

Para mensurar valores de tensão, corrente e potência que o painel solar irá oferecer para cada valor de radiação será usado um painel solar com as características de tensões, correntes e potência listadas abaixo:

- $P_{max} = 20,16$  W
- $V_{oc} = 21,6$  V
- $I_{sc} = 1,23$  A
- $V_{max} = 18$  V
- $I_{max} = 1,12$  A
- $FF = 0,7588075881$

Sobre o ambiente em que o painel solar for inserido é necessário definir mais três valores, sendo eles,  $G_B$  que é responsável por definir a quantidade de radiação direta que está chegando naquele instante,  $G_D$  que representa a quantidade de radiação difusa do ambiente em que o painel solar está sendo inserido e por último  $\rho_G$  que é responsável por definir o nível de absorção que o terreno tem sob os raios solares, sendo 1 para reflexão máxima dos raios solares e 0 para absorção máxima dos raios solares.

- $G_B = 500$  W/m<sup>2</sup>
- $G_D = 235$  W/m<sup>2</sup>
- $\rho_G = 0,25$ :

Para realizar a medição dos valores para cada tópico abaixo foi usado a equação 3.29

para determinar a radiação incidente no painel solar e com este valor de radiação foi inserido no painel solar simulado para ter a resposta das variáveis elétricas como tensão, corrente e potência.

- Painel fixo

Tabela 3 – Dados do painel fixo

Radiação incidente ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
735	14,4654	0,904088	13,078

Fonte: Autor

- Painel móvel ideal:

Tabela 4 – Dados do painel móvel ideal

Radiação incidente ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
857,864322	16,5683	1,03552	17,1569

Fonte: Autor

- painel móvel obtido:

Tabela 5 – Dados do painel móvel obtido

Radiação incidente ( $W/m^2$ )	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
855,9760688	16,5401	1,03376	17,0985

Fonte: Autor

Dos números acima foram retirados duas relações importantes que é a relação do ganho do painel obtido pelo sistema sobre o painel fixo e a precisão na aproximação dos ganhos entre o painel obtido com o painel ideal.

Tabela 6 – Relação entre os dados obtidos

Ganho sobre o painel fixo horizontalmente	Relação entre o ganho obtido pelo ganho ideal
1,164593291	99,77988906%

Fonte: Autor

#### 6.4 Comparação diária entre a movimentação ideal e a desenvolvida

Neste tópico foi realizado um estudo da resposta do sistema em comparação ao sistema ideal em um intervalo de tempo que foi escolhido, o intervalo de tempo foi das 07:00 horas da manhã até às 17:00 da tarde com intenção de realizar o estudo do comportamento do sistema para variações diárias no intervalo de uma hora para cada medição.

As configurações de medições de localidade será a mesma localidade usada no tópico anterior 6.3, com as mesmas condições de índice de radiação 6.3 e o mesmo painel solar usado anteriormente 6.3; mudando apenas as variáveis referentes ao posicionamento solar, pois nessa medição como estamos falando de um movimento diário os ângulos solares serão alterados. e como resposta foi obtido a seguinte tabela de valores.

- Painel solar ideal

Tabela 7 – Dados finais do painel móvel ideal

Horário do dia	Radiação ( W/m <sup>2</sup> )	Corrente ideal( A)	Tensão ideal( V)	Potência ideal( W)
7:00 h	648,6873822	0,800662	12,8106	10,257
8:00 h	808,263578	0,986801	15,7776	15,5583
9:00 h	874,9907355	1,05105	16,8167	17,6752
10:00 h	899,0649077	1,07141	17,1425	18,3667
11:00 h	902,0329823	1,0738	17,1808	18,4487
12:00 h	900,605991	1,07265	17,1625	18,4094
13:00 h	902,5147779	1,07419	18,187	18,462
14:00 h	898,9328186	1,0713	17,1408	18,363
15:00 h	873,2667069	1,04952	16,7923	17,6239
16:00 h	804,711211	0,982337	15,7174	15,4398
17:00 h	642,4777269	0,793093	12,6895	10,0639

Fonte: Autor

- Painel solar obtido:

Tabela 8 – Dados finais do painel móvel obtido

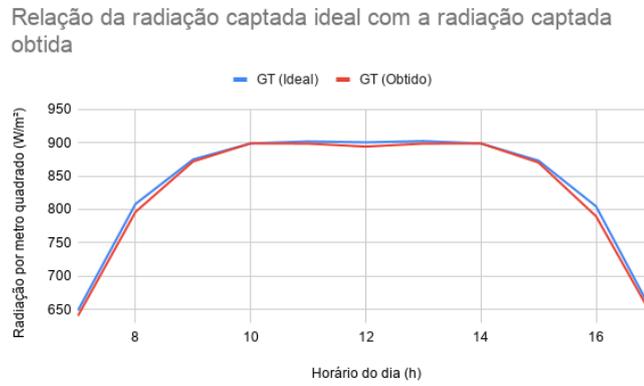
Horário do dia	Radiação ( W/m <sup>2</sup> )	Corrente Obtida ( A)	Tensão Obtida ( V)	Potência Obtida ( W)
7:00 h	640,6096739	0,790814	12,653	10,0062
8:00 h	796,3332811	0,973356	15,5737	15,1587
9:00 h	871,9105606	1,04832	16,7731	17,5835
10:00 h	899,0880926	1,07143	17,1428	18,3673
11:00 h	898,7357436	1,07114	17,1383	18,3575
12:00 h	894,2846587	1,0675	17,08	18,233
13:00 h	898,7357436	1,07114	17,1383	18,3575
14:00 h	899,0645749	1,07141	17,1425	18,3667
15:00 h	870,3469686	1,04692	16,7507	17,5367
16:00 h	789,8637185	0,966327	15,4612	14,9406
17:00 h	636,6826756	0,78602	12,5763	9,88525

Fonte: Autor

Os resultados apresentados acima são as respostas dos sistemas para a radiação neles impostas, sendo o primeiro a resposta de um sistema ideal, e o segundo item corresponde a resposta do sistema desenvolvido neste trabalho; dos resultados acima foram gerados alguns gráficos para a melhor visualização do comportamento das variáveis de resposta do sistema proposto de rastreamento solar e o painel solar e ao mesmo tempo fazendo uma comparação dos

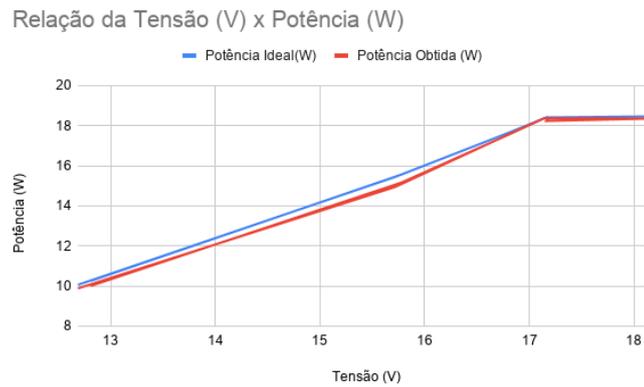
sistemas.

Figura 51 – Relação da radiação captada ideal com a radiação captada obtida



Fonte: Autor

Figura 52 – Gráfico de tensão x corrente para os valores ideais e obtidos



Fonte: Autor

Figura 53 – Relação da potência obtida com a potência ideal durante o intervalo de tempo



Fonte: Autor

## 7 CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido de forma geral apresentou respostas bastante promissoras via simulação, pois ao analisar os números de tensão, corrente e potência de um painel solar fixo horizontalmente e compararmos a resposta de um painel solar realizando um rastreamento solar e movimentação, a potência teve um salto de 13,078 W do painel fixo, para 17,0985 W do painel móvel. Este salto na potência se torna bastante positiva quando fazemos uma projeção da quantidade de potência adicional o sistema estará ganhando no decorrer de anos.

Como o primeiro passo para realizar o posicionamento ideal do painel solar é a obtenção do ângulo de inclinação  $\beta$ , os números obtidos via simulação pelo sistema desenvolvido quando comparados com os números ideais de inclinação apresentaram um precisão de aproximadamente 99,5459493%. Assim, é esperado que quando aplicado em vias reais de implementação este valor ainda sim continue bastante preciso.

Quando analisado a resposta para um determinado intervalo de tempo do sistema desenvolvido com um sistema ideal, o sistema desenvolvido apresentou uma acurácia significativamente alta se mantendo sempre próximo da resposta ideal, dessa forma podemos concluir que o sistema se mostrou bastante eficaz no rastreamento solar, apresentando valores bem próximos do modelo matemático ideal. E outro ponto bastante importante é a atuação dos motores de atuadores para a movimentação dos painéis solares que se mostraram bastante exatos.

Como trabalhos futuros para aperfeiçoamento do sistema quando implementado fisicamente, temos:

- Fazer a implementação física do sistema.
- Mensurar a diferença das leituras obtidas via simulação e as variáveis obtidas em tempo real; dessa forma fazer a quantificação do erro que é gerado no protótipo real em comparação ao ambiente simulado.
- Implementação de um periférico adicional que seja capaz de informar ao sistema as informações do céu naquele momento como: previsão de chuva, estado das nuvens, queda da radiação devido as nuvens e probabilidade de tempo nublado.
- Caso a solução proposta no tópico anterior seja adotada, usar um sistema computacional para determinação do estado do clima naquele dia, enviar também informações de dia do ano, posição no globo e horário do dia. Assim o sistema poderá funcionar de forma mais precisa podendo tomar decisões baseadas em não apenas uma fonte, mas sim em duas fontes.

## 8 CRONOGRAMA DO PROJETO

O cronograma deste trabalho será definido em dois passos, o primeiro passo referente ao desenvolvimento teórico 8.1 e o segundo referente ao desenvolvimento prático 8.2.

### 8.1 Cronograma do Trabalho de conclusão de curso I

Tabela 9 – Cronograma do Trabalho de conclusão de curso I

Cronograma Trabalho de conclusão de curso I	maio/2020	junho/2020	julho/2020	agosto/2020	setembro/2020	outubro/2020
Estudo do funcionamento dos painéis solares	01/05/2020					
Estudo de componentes econômicos energeticamente	01/05/2020	01/06/2020				
Estudo da melhor forma de realizar o rastreamento solar	01/05/2020	01/06/2020	01/07/2020			
Estudo de possíveis simuladores		15/06/2020				
Formulação da fundamentação teórica			01/07/2020	01/08/2020	01/09/2020	
Formulação da metodologia para análise da eficiência energética				01/08/2020	01/09/2020	
Levantamentos iniciais do primeiro modelo fixo				15/08/2020		
Levantamentos iniciais do primeiro modelo móvel					20/09/2020	
Estudo da melhor forma de comparação entre modelos						01/10/2020
Resultados preliminares						05/10/2020
Revisão						13/10/2020
Defesa do Trabalho de conclusão de curso I						15/10/2020

Fonte: Autor

### 8.2 Cronograma do Trabalho de conclusão de curso II

Tabela 10 – Cronograma do Trabalho de conclusão de curso II

Cronograma Trabalho de conclusão de curso II	novembro/2020	dezembro/2020	janeiro/2021	fevereiro/2021	março/2021	abril/2021
Preparação do ambiente de desenvolvimento	10/11/2020					
Modelagem do módulo de sensoriamento	11/11/2020					
Modelagem do sistema de rastreamento usando os módulos de sensoriamento	20/11/2020					
Modelagem do amplificador do sinal do módulo de sensoriamento	30/11/2020	1/12/2020				
Modelagem do amplificador dos motores		10/12/2020				
Modelagem do controle dos motores via dados do módulo de rastreamento		15/12/2020	07/01/2021			
Modelagem do sistema de transmissão			10/01/2021			
Desenvolvimento do <i>software</i> de controle			20/01/2021			
Desenvolvimento do <i>software</i> de detecção de erros			20/01/2021			
Desenvolvimento do <i>software</i> de <i>timer</i>			30/01/2021	01/02/2021		
Desenvolvimento do <i>software</i> do modo de espera				10/02/2021		
Desenvolvimento do <i>software</i> de transmissão				15/02/2021		
Desenvolvimento do <i>software</i> de recepção				15/02/2021		
Desenvolvimento do <i>software</i> do cálculo de eficiência				28/02/2021		
Testes modulares					25/03/2021	
Testes integrados					28/03/2021	
Resultados encontrados						01/04/2021
Revisão						02/04/2021
Defesa do trabalho de conclusão de curso II						06/04/2021

Fonte: Autor

## REFERÊNCIAS

- Atmel Corporation. **Atmega-8 Atmega-8L**. [S.l.], 2013. 331 p. Disponível em: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8\\_L\\_datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf). Acesso em 04 set. 2020.
- Atmel Corporation. **Atmega328P**. [S.l.], 2015. 294 p. Disponível em: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf). Acesso em: 04 set. 2020.
- BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos–11ª**. [S.l.]: São Paulo, Editora Pearson Education do Brasil, 2013.
- CANALE, E.-V.; STAN, A.; ZAFIU, V.-M.; DINU, A. C. Automatic solar tracking system. **International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics**, Editura Cefin, n. 6, p. 246–249, 2019.
- DAS, S.; CHAKRABORTY, S.; SADHU, P. K.; SASTRY, O. S. Design and experimental execution of a microcontroller ( $\mu$ c)-based smart dual-axis automatic solar tracking system. **Energy Science & Engineering**, Wiley Online Library, v. 3, n. 6, p. 558–564, 2015.
- KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. [S.l.]: Academic Press, 2013.
- KLEPPNER, D. Rereading einstein on radiation. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 27, n. 1, p. 87–91, 2005.
- LASEINDE, T.; RAMERE, D. Low-cost automatic multi-axis solar tracking system for performance improvement in vertical support solar panels using arduino board. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, Oxford University Press, v. 14, n. 1, p. 76–82, 2019.
- NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. [S.l.: s.n.], 2012. 1285 p.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 6. ed. [S.l.: s.n.], 2010. 822 p.
- SA, A. **Esquemático Arduino Uno rev3**. [S.l.], 2019. 1 p. Disponível em: [https://content.arduino.cc/assets/UNO-TH\\_Rev3e\\_sch.pdf](https://content.arduino.cc/assets/UNO-TH_Rev3e_sch.pdf). Acesso em: 04 set. 2020.
- SENBA. **(GL5516 - GL5549) Photoresistor**. [S.l.], 2014. 6 p. Disponível em: <https://datasheetspdf.com/pdf/756925/SENBA/GL5516/1>. Acesso em: 24 abr. 2020.
- University of Nebraska-Lincoln. **Astronomy Education at The University of Nebraska-Lincoln**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://astro.unl.edu/>. Acesso em: 22 set. 2020.