



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

2020

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

2020

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo desenvolvido	13
Figura 2 – Diagrama Esquemático	14
Figura 3 – Configuração Proposta	14
Figura 4 – Horário Local Solar	16
Figura 5 – Sistema de controle do posicionamento solar	16
Figura 6 – Dados medidos do painel fixo	17
Figura 7 – Dados laboratoriais obtidos do painel móvel	17
Figura 8 – Comparação do painel fixo com o painel móvel	18
Figura 9 – Relação Terra-Sol	19
Figura 10 – Equation of Time <i>Equation of Time</i> (ET)	21
Figura 11 – Declinação solar durante o ano	23
Figura 12 – Gráfico <i>Day Light</i>	24
Figura 13 – Ângulos solares e caminho solar do nascente ao poente	25
Figura 14 – Definição da massa de ar	28
Figura 15 – Radiação direta no painel horizontal e inclinado.	29
Figura 16 – Níveis de energia	31
Figura 17 – Efeito da impureza inserida	32
Figura 18 – Curva característica do diodo de silício	33
Figura 19 – Funcionamento da célula fotovoltaica	34
Figura 20 – Circuito equivalente a uma célula solar única	34
Figura 21 – Curva característica Tensão x Corrente	35
Figura 22 – Curva característica Tensão x Potência	36
Figura 23 – Curva característica <i>Light Dependent Resistor</i> (LDR) série GL5516	38
Figura 24 – Ilustração Amplificador Operacional	39
Figura 25 – Imagem ilustrativa da modelagem do suporte	40
Figura 26 – <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM)	40
Figura 27 – Distribuições dos sensores	41
Figura 28 – Ângulo entre feixe incidente e o vetor normal a face do painel solar 2D	42
Figura 29 – Malha do controle PID genérico	43
Figura 30 – Disposição dos elementos para cálculo do ganho	43
Figura 31 – Curva dos modelos em série	44

Figura 32 – Curva dos modelos em paralelo	45
Figura 33 – Modelo matricial com N_{PM} ramos paralelos, como cada ramo N_{SM} células em série	46
Figura 34 – Modelagem do ambiente inicial	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados com o trabalho proposto	18
Tabela 2 – Cronograma do Trabalho de conclusão de curso I	53
Tabela 3 – Cronograma do Trabalho de conclusão de curso II	53

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>
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>
SL	<i>Standard Longitude</i>
SoC	<i>System-on-a-chip</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Tensão elétrica
A	Corrente elétrica
W	Potência elétrica
Ω	<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

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	<i>Objetivos Gerais</i>	11
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	11
2	TRABALHOS RELACIONADOS	12
2.1	Sistema automático de rastreamento solar	12
2.2	Projeto e execução experimental de um sistema de rastreamento solar automático de eixo duplo inteligente baseado em microcontrolador (μC)	13
2.3	Sistema de rastreamento solar multi-eixo automático de baixo custo para melhoria de desempenho em painéis solares de suporte vertical usando placa Arduíno	15
2.4	Relação entre implementações e a implementação proposta	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1	Sol	19
3.2	Solarimetria	20
3.2.1	<i>Equation of Time</i>	20
3.2.2	<i>Local Standard Time (Local Standard Time (LST))</i>	21
3.2.3	<i>Apparent Solar Time (Apparent Solar Time (AST))</i>	21
3.2.4	<i>Ângulos solares</i>	22
3.2.4.1	<i>Declinação δ</i>	23
3.2.4.2	<i>Ângulo Horário h</i>	24
3.2.4.3	<i>Ângulo de altitude solar α</i>	25
3.2.4.4	<i>Ângulo solar azimuth z e horário solar do meio-dia</i>	25
3.2.5	<i>Radiação</i>	26
3.2.5.1	<i>Radiação solar extraterrestre</i>	26
3.2.5.2	<i>Atenuação Atmosférica</i>	27
3.2.5.3	<i>Radiação total em superfícies inclinadas</i>	28
3.3	Hardware	30
3.3.1	<i>Painéis fotovoltaicos</i>	31
3.3.1.1	<i>Semicondutores</i>	31

3.3.1.2	<i>Diodos e polarizações</i>	32
3.3.1.3	<i>Funcionamento das células fotovoltaicas</i>	33
3.3.1.4	<i>Fill Factor</i>	36
3.3.1.5	<i>Potência máxima, corrente máxima e tensão máxima</i>	36
3.3.1.6	<i>Cálculo da eficiência η</i>	37
3.3.2	<i>Sensor LDR a curva característica</i>	38
3.3.3	<i>Amplificadores Operacionais</i>	38
3.3.4	<i>System On Chip</i>	39
3.3.5	<i>Motores</i>	40
3.4	Software	41
3.4.1	<i>Rastreamento solar via software</i>	41
3.4.2	<i>Controle dos motores via parâmetros de rastreamento</i>	42
3.4.2.1	<i>Controle Proporcional Integral Derivativo (PID)</i>	42
3.4.3	<i>Comparação de sinais para análise de eficiência</i>	43
3.5	Associação de painéis solares (Matriz de painéis)	44
3.5.1	<i>Associação em série</i>	44
3.5.2	<i>Associação em paralelo</i>	44
3.5.3	<i>Associação em Matriz</i>	45
3.6	Modelagem inicial do ambiente dos painéis solares	46
4	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	48
4.1	Mensurar variáveis do suporte fixo	48
4.2	Definição inicial do modo de operação padrão	49
4.3	Mensurar variáveis do suporte móvel	49
4.4	Cálculo comparativo da eficiência entre o modelo fixo e móvel	50
4.5	Armazenamento das variáveis da configuração mais eficiente	50
4.6	Alterar o modo de operação	50
4.7	Buscar o modo de operação mais eficiente na base de dados	51
4.8	Define o modo mais eficiente como modo de operação padrão	51
5	RESULTADOS PRELIMINARES	52
6	CRONOGRAMA DO PROJETO	53
6.1	Cronograma do Trabalho de conclusão de curso I	53
6.2	Cronograma do Trabalho de conclusão de curso II	53

REFERÊNCIAS	54
--------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A energia solar sempre foi importante para o desenvolvimento do planeta Terra como um todo, em todo o processo evolutivo dos seres vivos foi criado uma relação de dependência com a energia provida do Sol, diretamente ou indiretamente. Plantas usam a fotossíntese que é um processo físico-químico através da energia solar, desta forma elas são capazes de realizar processos necessários em todo o decorrer da sua vida. A radiação emitida pelo sol juntamente com outros fatores como rotação e translação do planeta Terra é o responsável pela variação de clima e estações do ano que conhecemos nos dias atuais.

Desde que o Homem começou a usar equipamentos para auxiliá-lo nas atividades diárias como o uso do arado pelo agricultor que é aplicado uma energia mecânica até o uso de computadores com uso da energia elétrica é perceptível o ciclo energético no nosso dia a dia, ou seja, desde o equipamento mais simples até o mais complexo podemos notar a necessidade da energia no seu funcionamento.

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 processo está diretamente relacionado a quantidade de radiação que se é capaz de captar, ou seja, quanto maior a área de contato 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 Objetivos Gerais

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 este 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

Neste tópico serão abordados trabalhos relacionados e trabalhos semelhantes que foram usados como base teórica e metodológica para o desenvolvimento dos modelos que serão implementados como solução da problemática proposta no tópico 1.1.1, desde a base do *Hardware* até o *Software* nele contido.

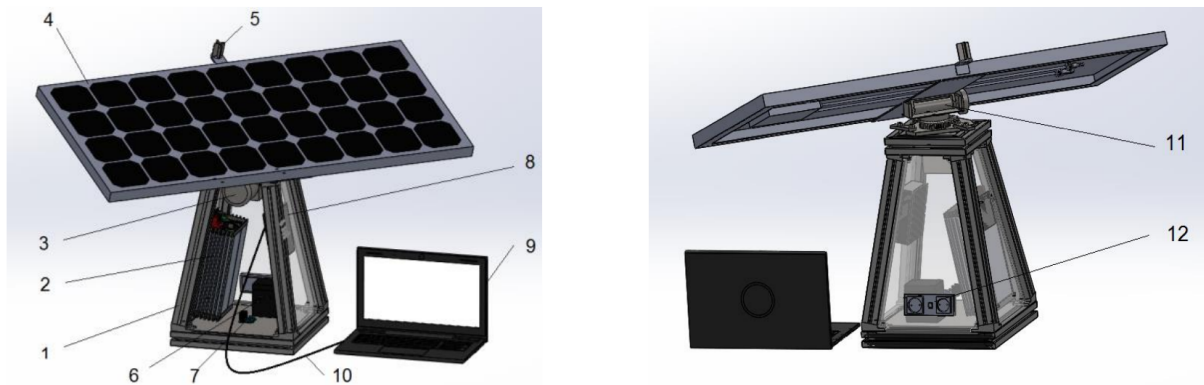
2.1 Sistema automático de rastreamento solar

Na implementação proposta no trabalho (CANALE *et al.*, 2019) foi desenvolvido um sistema autônomo capaz de fazer o rastreamento solar via sensoramento 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 dados 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 imagem 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 (μC)

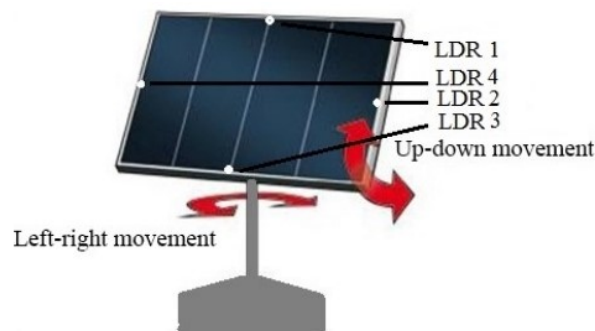
A implementação desenvolvida no trabalho (DAS *et al.*, 2015) tem como proposta fazer um sistema de rastreamento solar via sensoramento usando quatro LDR e um microcontrolador, na qual foi usado o Atmega-8L (Atmel Corporation, 2013). O sistema consiste em uma fonte de energia alimentando o sistema de 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 consequentemente não consiga posicionar o painel com o ângulo de incidência solar da forma mais eficiente.

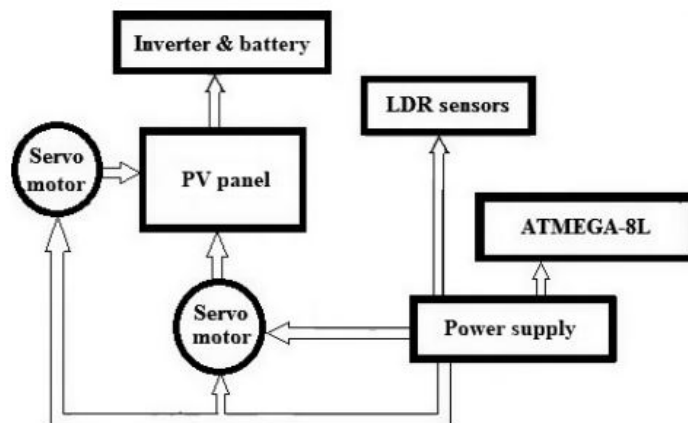
Figura 2 – Diagrama Esquemático



Fonte: Das *et al.* (2015)

A configuração proposta pelo autor (DAS *et al.*, 2015) como foi falado 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 neste tópico é a relação da tensão de entrada (V_0) e a tensão de saída (V_f), sendo a V_0 o *Power supply* e V_f como a tensão gerada pelo painel solar, como é mostrado na figura 3. Fazendo uma breve análise das tensões

Figura 3 – Configuração Proposta



Fonte: Das *et al.* (2015)

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, ou seja, a tensão de gerada é a mesma que a tensão fornecida.

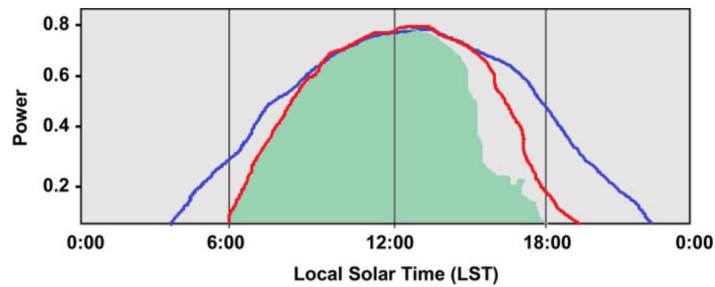
Quando se trata de dispositivos com finalidade de geração de energia o caso em que $G > 0$ é o caso desejado, pois está havendo um ganho energético no sistema, desta forma o foco principal desta discussão neste tópico é como alterar esta implementação para que possamos aumentar a probabilidade de ter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

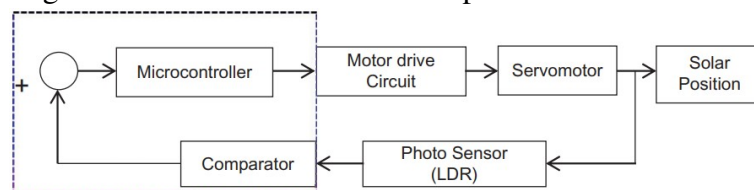
Figura 4 – Horário Local Solar



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 diapositivos 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)

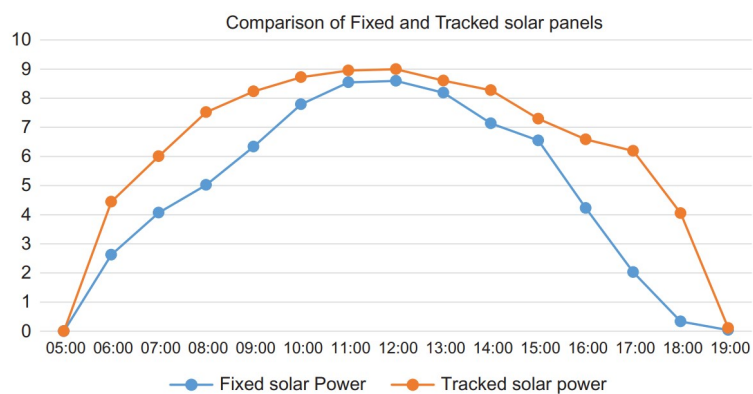
Figura 7 – Dados laboratoriais obtidos do painel móvel

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 consequentemente 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

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

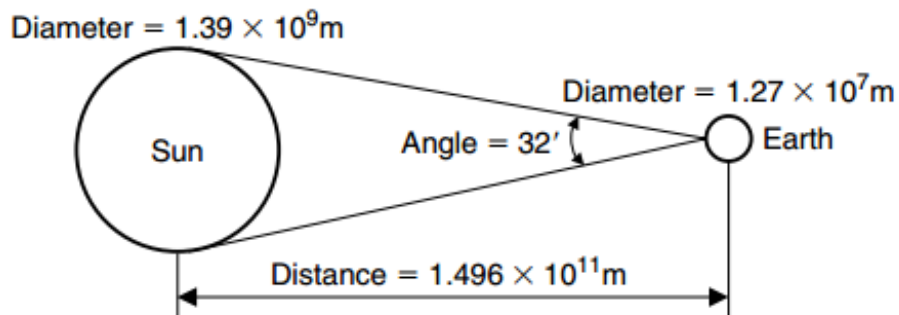
Nessa seção serão abordados conceitos que serão utilizados no desenvolvimento do projeto proposto neste trabalho com a proposta de contextualizar e mostrar como esses conceitos serão aplicados na implementação.

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, 2009) podemos descrever algumas informações do sol, alguns dados importantes sobre o Sol 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



Fonte: Kalogirou (2009)

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, 2009) 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 falado superficialmente no tópico anterior já podemos ter uma breve noção dos números que a radiação solar proporciona, neste tópico irei fazer 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, é 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. Quando listamos os pontos negativos da energia solar temos como principal fator é 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 *Equation of Time*

Comumente estamos acostumados com o horário diário, ou seja, aquele horário que é nos 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, 2009) 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.

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

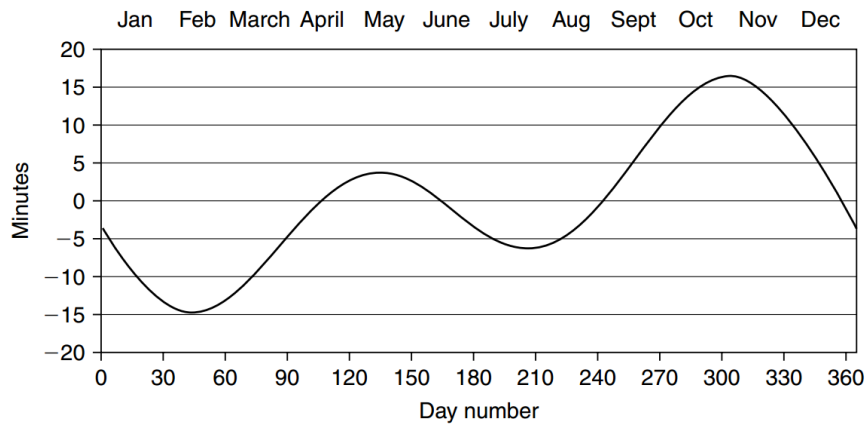
Sabendo que N corresponde ao número do dia no decorrer do ano, podemos calcular

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. Gráficamente temos que o gráfico corresponde a figura 10.

Figura 10 – Equation of Time ET



Fonte: Kalogirou (2009)

3.2.2 Local Standard Time (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 no tópico 3.2.3.

3.2.3 Apparent Solar Time (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 no tópico 3.2.1.

- AST: Horário aparente solar que é desejado encontrar na equação.
- LST: Horário que do 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, 2009) 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.

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

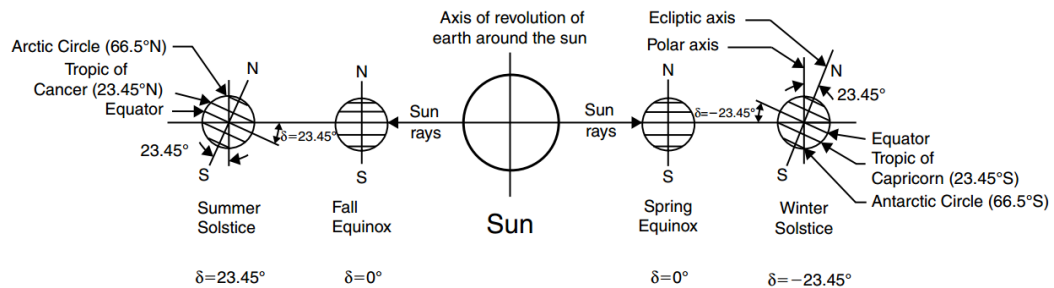
Sendo respectivamente as variáveis R como a distância entre Sol e Terra, a como a distância média entre o Sol e a terra e a variável e sendo a excentricidade da órbita entre da Terra ao redor do sol que vale 0,01673. Dessa forma quando a Terra se encontra no ponto da órbita mais próxima do Sol, chamado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

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 (2009)

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 δ temos:

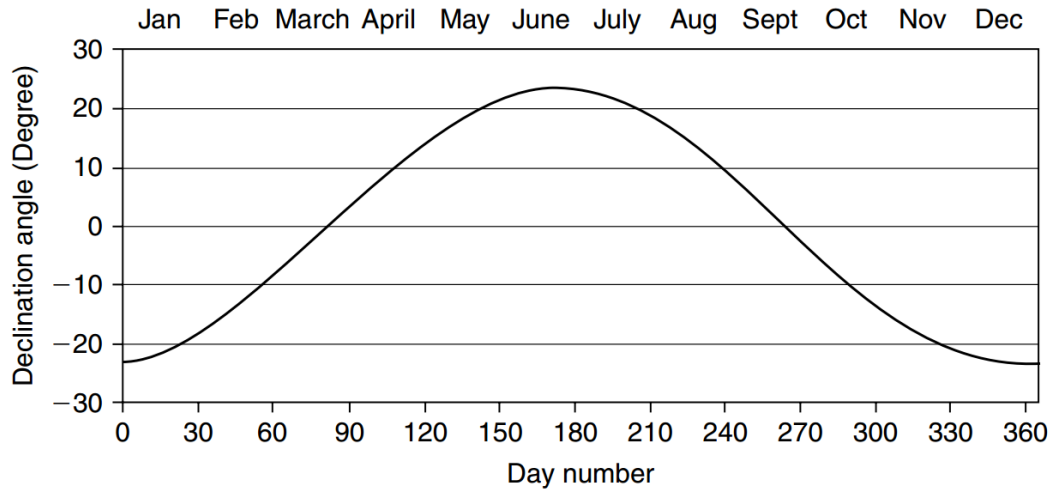
$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos(\Gamma) + 0,070257 \sin(\Gamma) \\ & - 0,006758 \cos(2 \cdot \Gamma) + 0,000907 \sin(2 \cdot \Gamma) \\ & - 0,002697 \cos(3 \cdot \Gamma) + 0,00148 \sin(3 \cdot \Gamma) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Sendo Γ

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

Em ambos os casos a variável N corresponde ao dia do ano. E a resposta visual dessas implementações pode ser visualizada no gráfico 12.

Figura 12 – Gráfico *Day Light*



Fonte: Kalogirou (2009)

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 σ 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 negativo (-) caso contrário o sinal será positivo (+).

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

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 α

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:

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

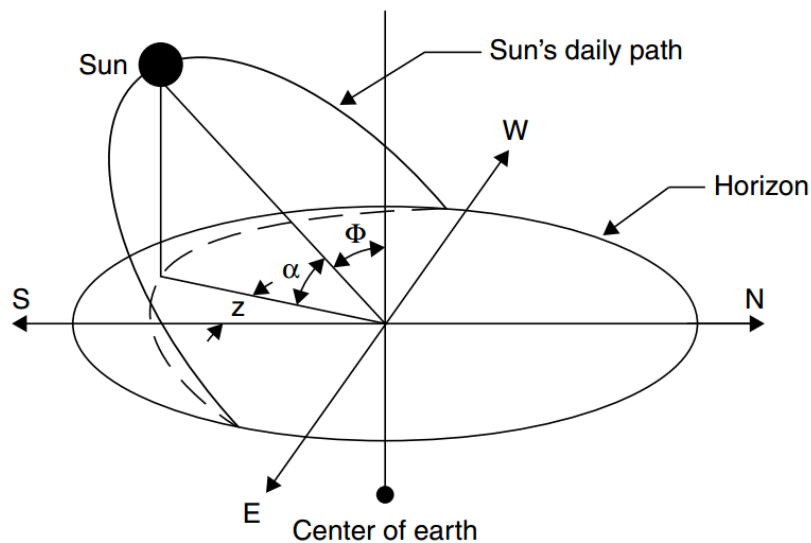
Sendo L a latitude local, ou seja, ângulo formado entre o segmento de reta e o plano equatorial e o valor Φ como sendo o ângulo formado entre o feixe de luz com eixo vertical chamado de eixo zênite. Dessa forma temos uma relação entre os ângulos α e Φ :

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

3.2.4.4 Ângulo solar azimuth z e horário solar do meio-dia

O ângulo solar azimuth 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.

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



Fonte: Kalogirou (2009)

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

Nos tópicos anteriores foi abordado 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 será abordado será algumas maneiras de fazer o cálculo do 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, 2009) 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 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 Φ 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

No tópico 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, neste tópico 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.

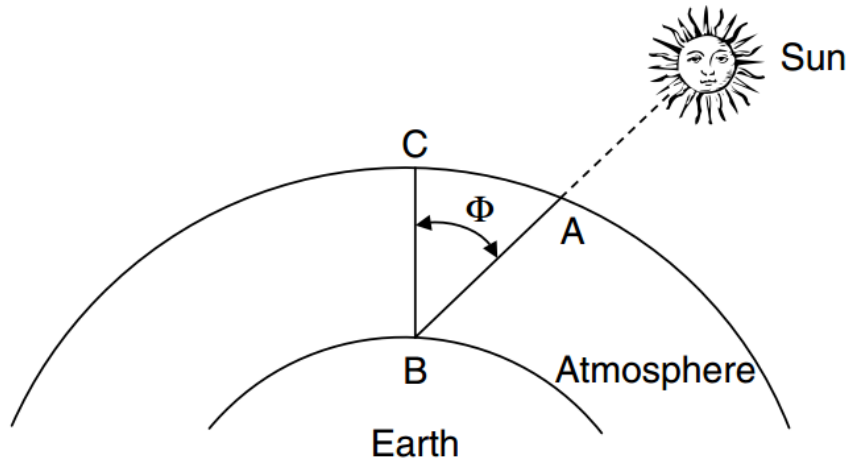
Dessa maneira quando analisamos o feixe absorvido podemos notar que essa fração que foi absorvida pelo Sol alguns feixes terão o contato direto com o solo e já outros encontrarão obstáculos no caminho, como nuvens por exemplo. Essa parcela de feixes de incidência direta é denominada de **Radiação de 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 (2009)

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 do tópico com todas as partes para concluir a equação final para encontrar a radiação total no painel inclinado.

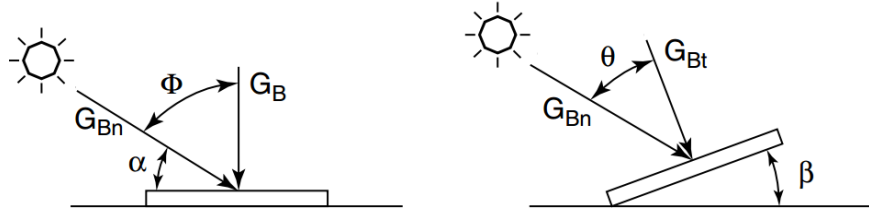
- G_{BT} : Radiação dos feixes diretos

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 β 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.

Numericamente temos que o cálculo da variável G_{GB} que representa os feixes de radiação na

Figura 15 – Radiação direta no painel horizontal e inclinado.



Fonte: Kalogirou (2009)

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 β 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 β .

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

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

Similar ao desenvolvimento no tópico 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 ρ . 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

Neste tópicos 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 no tópico 3.2, a segunda é o desenvolvimento do *hardware* onde o sistema será embarcado e por último é o *software* que será abordado no tópico 3.4.

3.3.1 Painéis fotovoltaicos

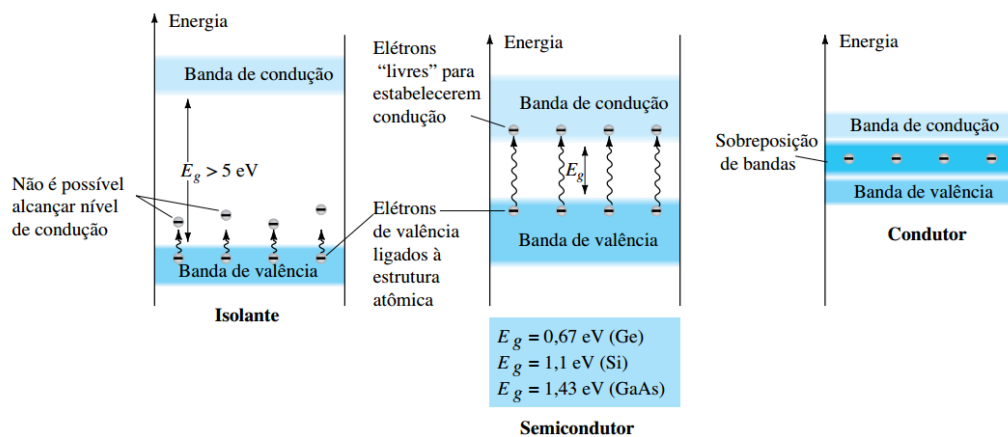
Todo sistema de captação solar é baseado no componente fundamental que são os painéis solares. Primeiramente será feita uma abordagem do seu funcionamento e as suas aplicações como poderá ser utilizado no sistema de captação.

3.3.1.1 Semicondutores

Todo material é composto por átomos, ou seja, todos eles têm 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)

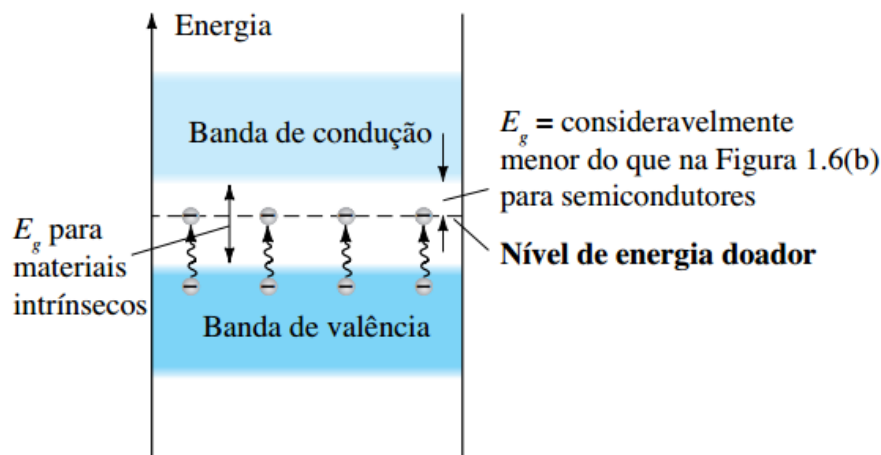
Dessa forma quando o material em si é composto por uma composição em qual suas bandas, de valência e de condução estão distantes acima de 5 eV esse material é considerado um isolante, pois é necessário uma energia elevada para tirar os elétrons que estão na banda de valência para a banda de condução. 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 semiconductor 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)

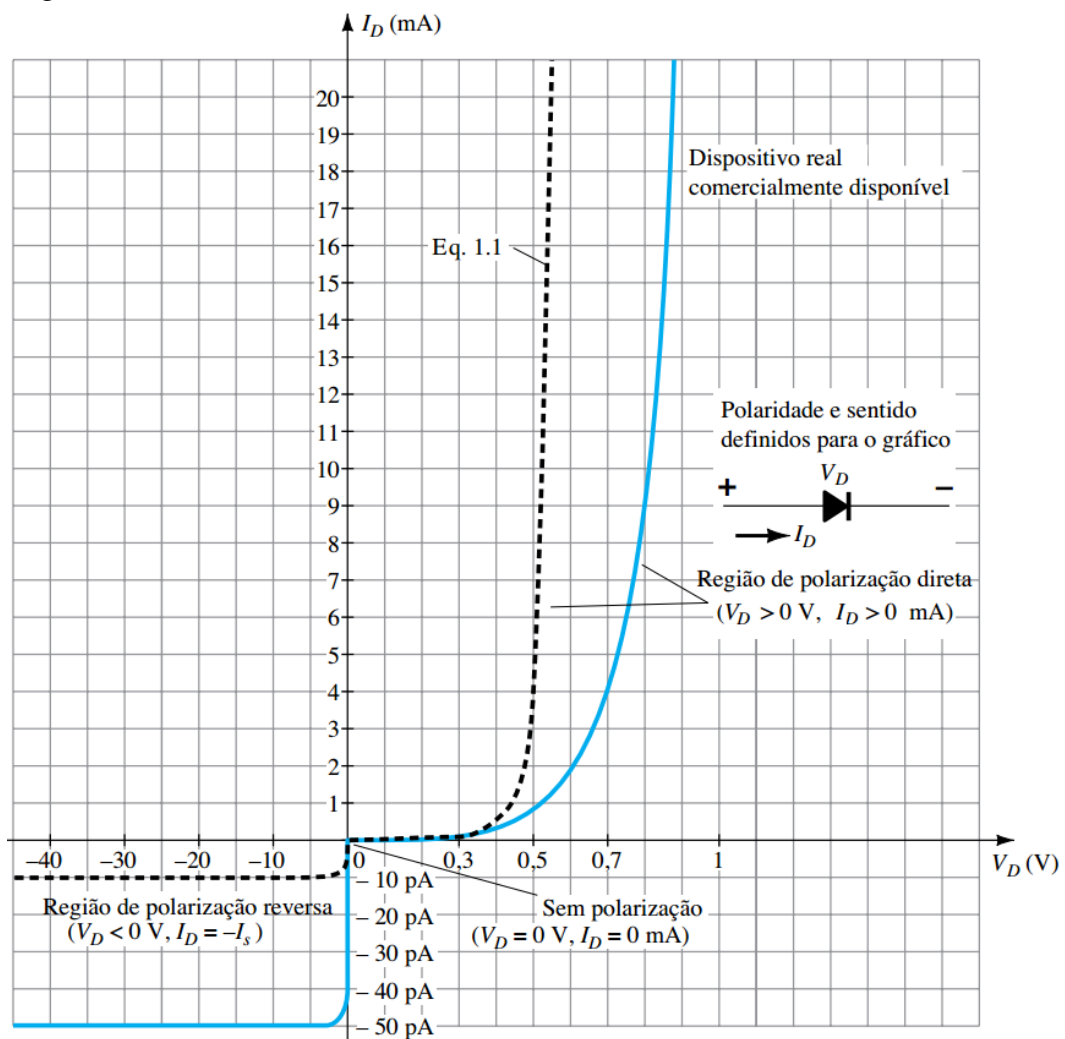
3.3.1.2 Diodos e polarizações

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



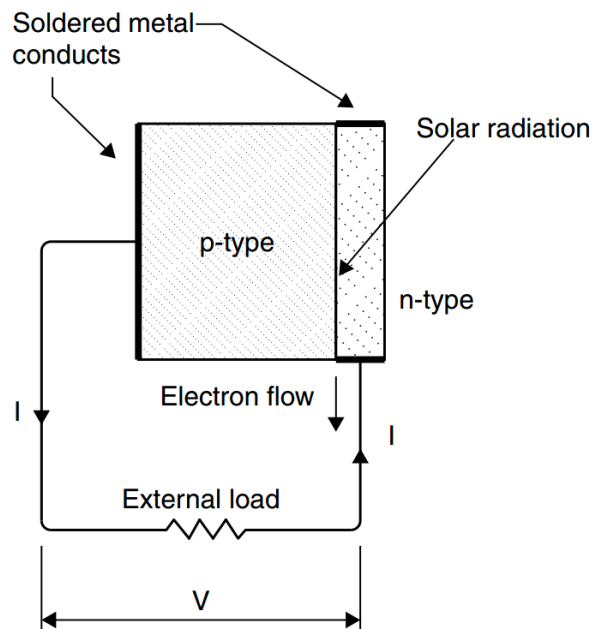
Fonte: BOYLESTAD e NASHELSKY (2013)

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.

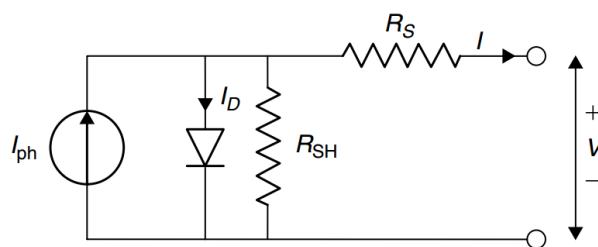
Figura 19 – Funcionamento da célula fotovoltaica



Fonte: Kalogirou (2009)

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 (2009)

Após os cálculos matemáticos para encontrar a equação resultante que corresponde

a corrente final I é encontrado a seguinte equação:

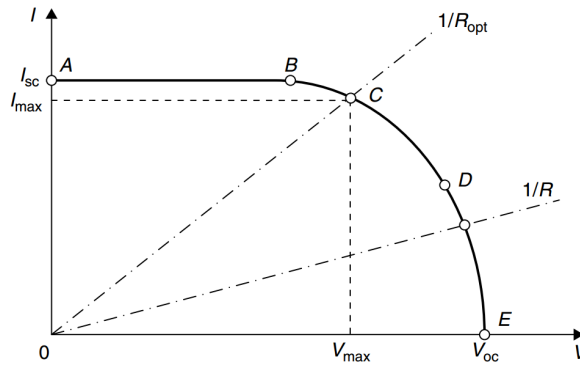
$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{eV}{kT_c} \right) - 1 \right] \quad (3.31)$$

Onde

- k = constante de Boltzmann = 1.381×10^{-23} J/K.
- T_c = Temperatura absoluta da célula (K).
- e = Carga elétrica = 1.602×10^{-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.

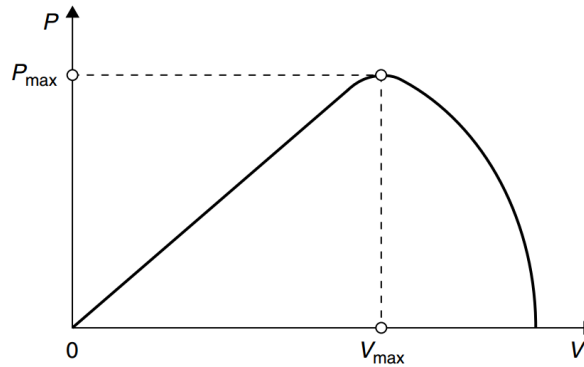
Figura 21 – Curva característica Tensão x Corrente



Fonte: Kalogirou (2009)

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 (2009)

3.3.1.4 Fill Factor

O fator de preenchimento é uma variável sinaliza a eficiência do funcionamento de uma célula solar, é usado no desenvolvimento do cálculo da eficiência dos painéis solares e é um termo bastante usado no meio dos estudos das células fotovoltaicas. Primeiramente definindo a potência máxima como:

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

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, 2009)) 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, 2009) 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:

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

3.3.1.6 Cálculo da eficiência η

Quando falamos de eficiência sempre estamos falando sobre a relação do entre o que foi investido com o ganhos, ou seja, a eficiência de uma célula solar é a relação da potência

de saída com a potência da luz incidente na face da célula solar. Por definição a incidência é calculada com parâmetros de temperatura igual a 25°C e com uma potência de 1000 W/m^2 que é a taxa de incidência próximo ao meio dia solar, ou seja, para esses parâmetros a eficiência dos painéis solares estão entre $12\% - 15\%$. A eficiência máxima é calculada pela equação abaixo:

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max}I_{max}}{AG_T} \quad (3.42)$$

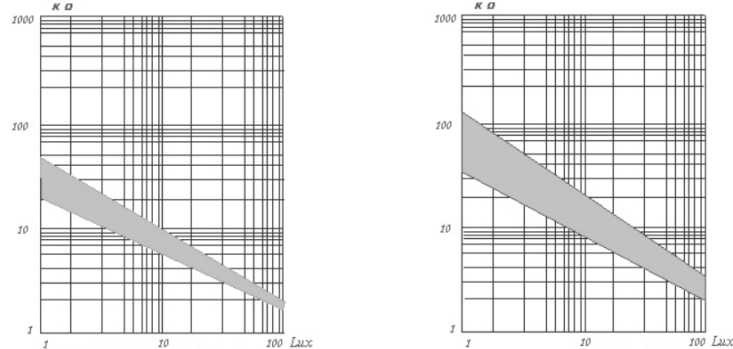
Sendo A a área do painel solar medida em (m^2) .

3.3.2 Sensor LDR a curva característica

O sensoramento 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 (2020)

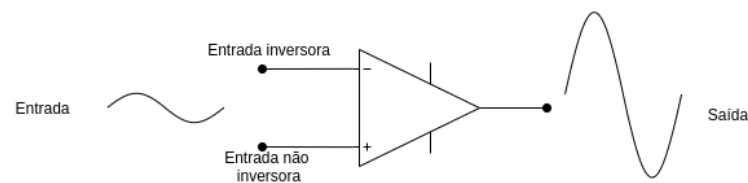
3.3.3 Amplificadores Operacionais

Os amplificadores operacionais abordados pelo autor (WENDLING, 2010) serão utilizados nesse projeto como ferramentas de amplificação de sinal dos sensores LDR para a unidade centralizada de tratamento dos valores, e também serão utilizados para fazer comparações de sinais. Irei fazer uma breve explicação do funcionamento de cada caso citado acima.

O primeiro caso se faz necessário devido a queda que acontece naturalmente com a tensão durante o percurso em um fio, para fios de pequeno comprimento esse fenômeno é dificilmente perceptível, mas para percursos de fio com uma escala maior, como por exemplo o percurso dos dados de um sensor que está em uma extremidade para a unidade centralizada, ou seja, é necessário que no meio termo desse caminho haja uma forma de que a informação seja amplificada para que a unidade controladora seja capaz de processar corretamente.

Dessa forma a amplificação como é mostrado na figura 24 é capaz de fazer com que os dados enviados pelo sensor não sejam perdidos ou alterados no percurso.

Figura 24 – Ilustração Amplificador Operacional



Fonte: Autor

A segunda maneira que será usado o Amplificadores operacionais é para realizar a comparação dos sinais, ou seja, para fazer a comparação da eficiência dos painéis solares, assim o circuito de comparação ser capaz de identificar se uma configuração está gerando uma saída eficiência ou o ganho energético não está sendo bom o suficiente para ter um ganho, logo via meio de modelagem é desejável que o circuito de comparação seja capaz de realizar essa comparação, e enviar como saída sinal lógico alto para ganho e sinal lógico baixo para ganho menor que 1.

3.3.4 System On Chip

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 recurso para maximizar o uso desse componente. Dessa maneira o SoC que será usado neste trabalho terá como principal característica a economia de energia, pois ele deve ser capaz de fazer cálculos matemáticos, gerar sinais de PWM e fazer o envio de sinais de eficiência, com o menor custo energético pois dessa forma garante um melhor desempenho energético quando é feito as

comparações dos ganhos de entrada e o ganho de saída como é mostrado na equação 3.42.

3.3.5 Motores

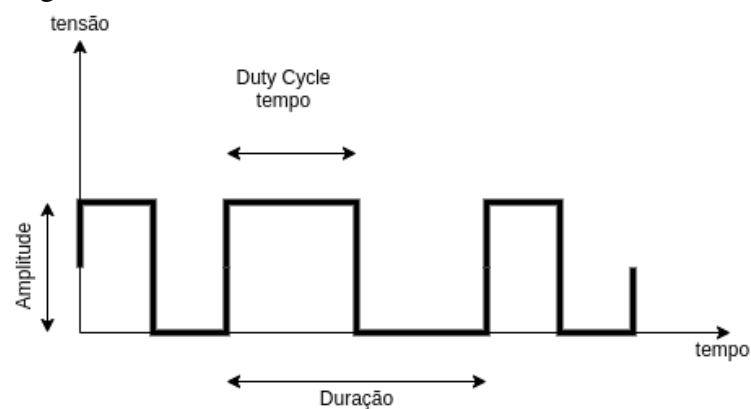
Os motores serão usados para fazer a movimentação dos painéis solares, fazendo o ajuste para que aumente a taxa de incidência dos raios solares na face do painel solar. O protótipo do suporte móvel solar seguirá baseado na implementação de dois motores um responsável pela rotação no eixo horizontal e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

Figura 25 – Imagem ilustrativa da modelagem do suporte



O funcionamento dos motores em individual é baseado em sinais de PWM, como pode ser visto na figura 26, dessa forma podemos regular o ângulo de cada motor individualmente gerando assim um novo ângulo do painel solar.

Figura 26 – PWM



Fonte: Autor

3.4 Software

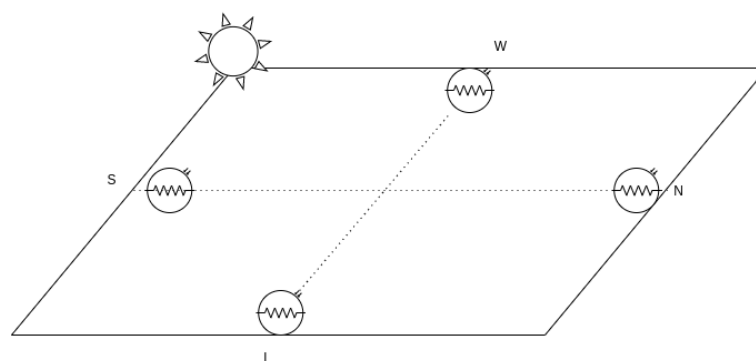
Nos tópicos anteriores foram abordados a base teórica referente ao posicionamento solar durante o céu e foi feito um estudo das energias em um sistema com um plano inclinado, também foi abordado paralelamente a maneira de realizar o cálculo de eficiência do painel solar. Logo após de criar a base teórica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

Neste tópico 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 listadas no tópico 3.2, e o segundo artifício de são os dados dos sistema de sensoramento que é composto por quatro sensores fotorresistivo LDR. Dessa forma pode ser calculado a posição do Sol juntamente com

Figura 27 – Distribuições dos sensores



Fonte: Autor

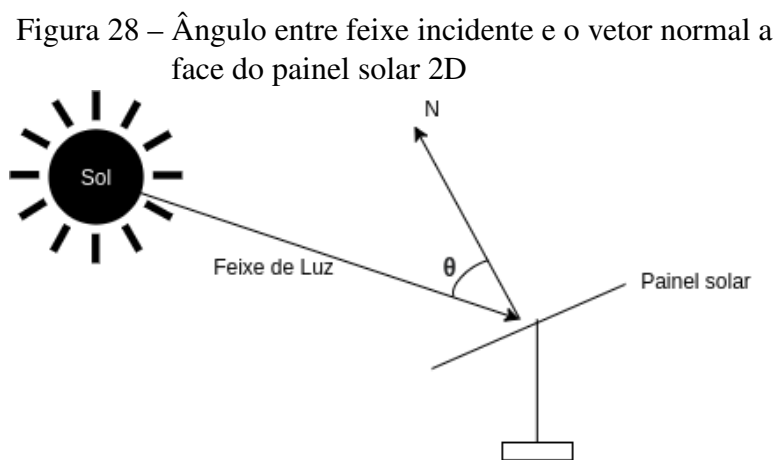
a altura e via cálculos matemáticos o software ser capaz de gerar uma resposta em ângulos de rotação para cada eixo.

3.4.2 Controle dos motores via parâmetros de rastreamento

Partindo do ponto em que no tópico 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 3.43.

$$\cos(\theta) = 1 \quad (3.43)$$

Sendo θ o ângulo entre o raio de incidência solar e o vetor normal a face do painel solar, como pode ser visto na figura 28.



Fonte: Autor

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 fazendo com que o painel consiga captar o máximo de feixes de luz possível com a sua área de contato com os feixes solares.

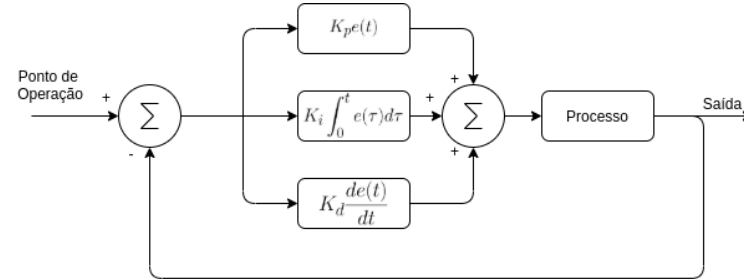
3.4.2.1 Controle PID

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 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 29.

Figura 29 – Malha do controle PID genérico



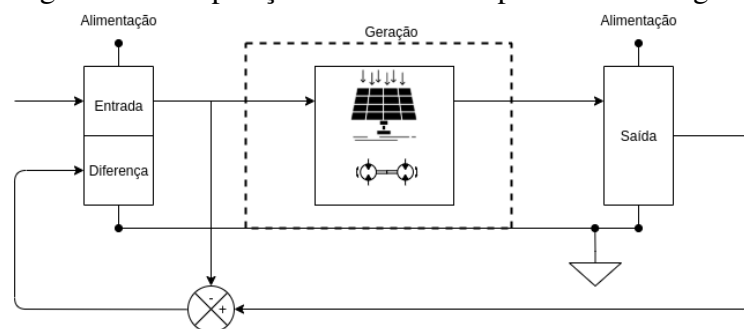
Fonte: Autor

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 30 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 30 – 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 $m \times n$.

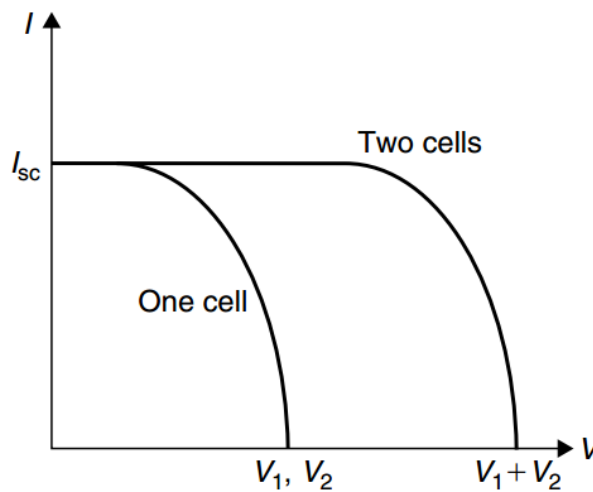
3.5.1 Associação em série

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 3.44 e curva característica 31.

$$V_{total} = \sum_0^{m-1} V_i \quad (3.44)$$

A curva é dada por:

Figura 31 – Curva dos modelos em série



Fonte: (KALOGIROU, 2009)

3.5.2 Associação em paralelo

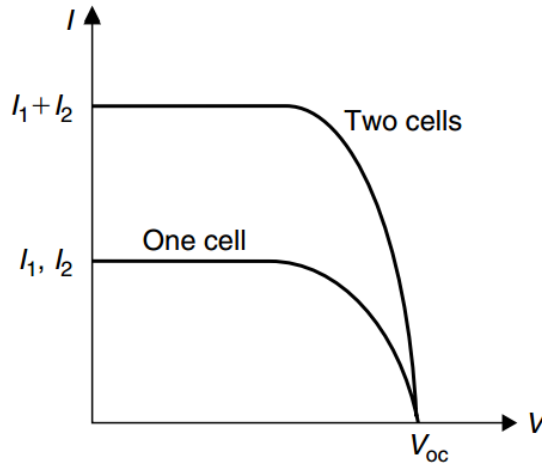
De forma semelhante ao tópico anterior 3.5.1 podemos realizar uma associação em paralelo de n painéis solares que por sua vez tem a característica de manter tensão a mesma e a corrente resultante ser igual a soma das correntes dos painéis solares, como pode ser visto na

equação 3.45 e sua representação gráfica mostrada no gráfico 32.

$$I_{total} = \sum_0^{n-1} I_i \quad (3.45)$$

A curva é dada por

Figura 32 – Curva dos modelos em paralelo



Fonte: (KALOGIROU, 2009)

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 33. 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:

$$I^M = I_{sc}^M \left[1 - \exp \left(\frac{V^M - V_{oc}^M + R_S^M I^M}{N_{SM} V_t^C} \right) \right] \quad (3.46)$$

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

- Corrente de curto-circuito do módulo:

$$I_{sc}^M = N_{PM} I_{sc}^C \quad (3.47)$$

- Tensão de circuito aberto do módulo:

$$V_{oc}^M = N_{PM} V_{oc}^C \quad (3.48)$$

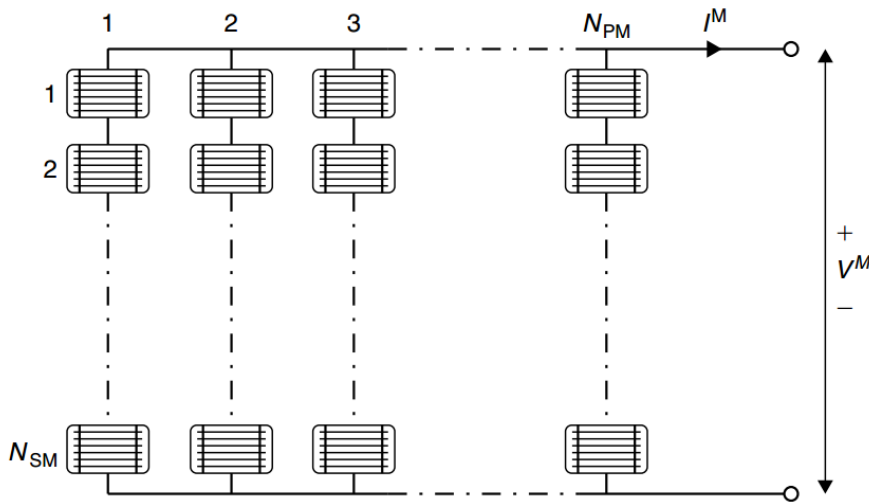
- Resistência equivalente do módulo:

$$R_S^M = R_S^C \frac{N_{SM}}{N_{PM}} \quad (3.49)$$

- Tensão térmica do semiconductor em uma única célula:

$$V_t^C = \frac{kT^C}{e} \quad (3.50)$$

Figura 33 – Modelo matricial com N_{PM} ramos paralelos, como cada ramo N_{SM} células em série



Fonte: (KALOGIROU, 2009)

3.6 Modelagem inicial do ambiente dos painéis solares

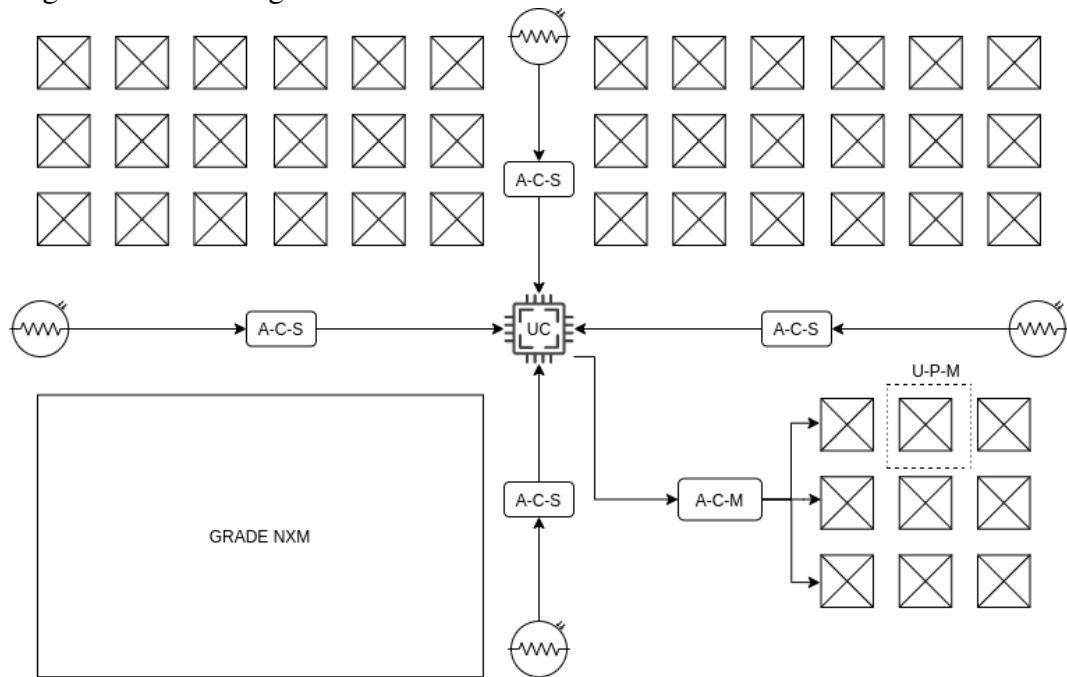
A modelagem do ambiente inicial corresponde ao modelo da figura 34 onde é composto por quatro sensores fotorresistivos, uma unidade central de controle, amplificadores de sinal e correção para os sensores e outro tipo de correção para os motores. Fazendo uma explicação breve de cada componente e sua devida funcionalidade temos :

- Sensores laterais fotorresistivos: A implementação do rastreamento solar como citado no tópico 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 34 – Modelagem do ambiente inicial

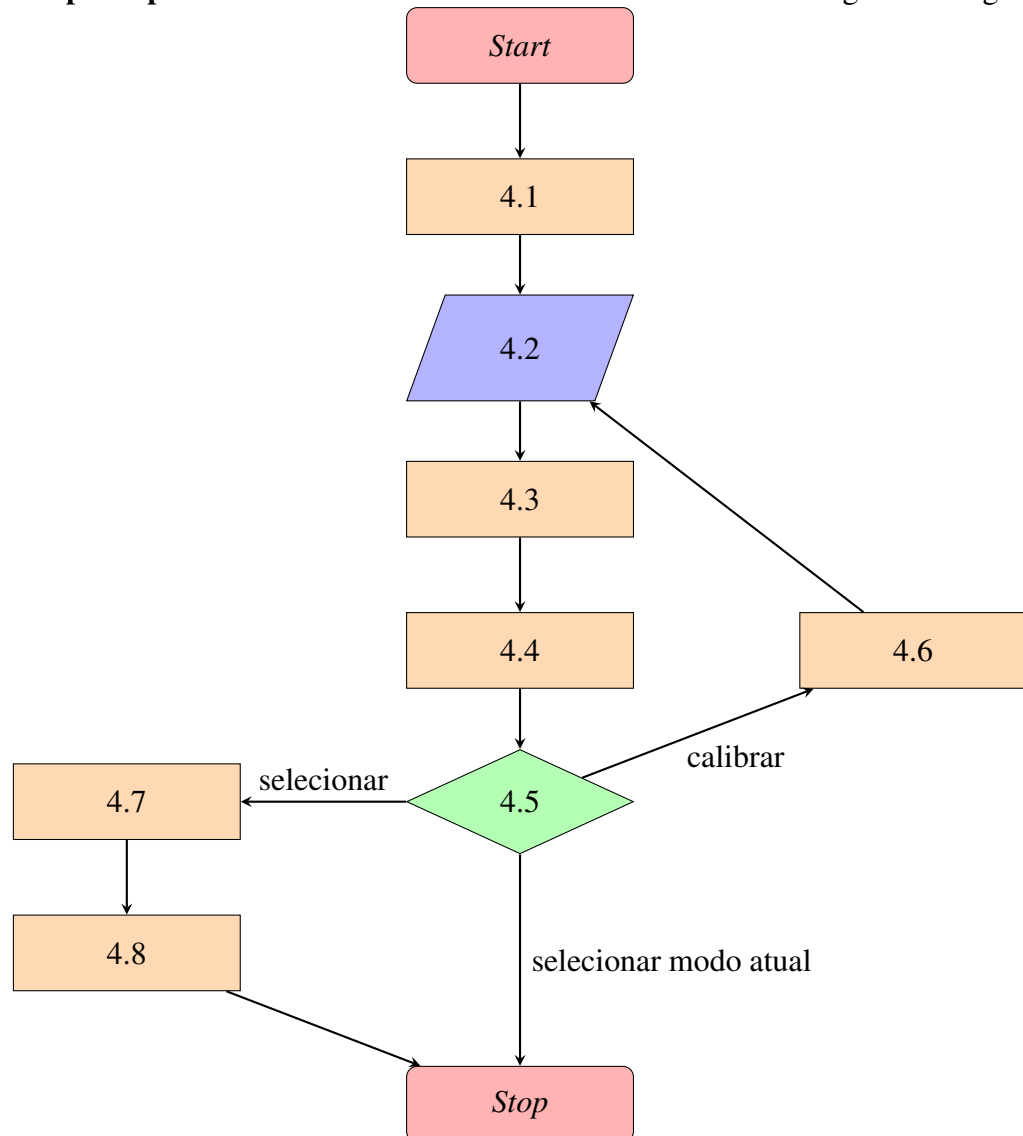


Fonte: Autor

4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O fluxograma 4 descreve o procedimento metodológico que será usado para fazer o levantamento das variáveis e a identificação do modelo de rastreamento 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.



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 e eficiência dada pela equação 3.42.
- **Passos:**
 1. Construção do modelo fixo para implementação no ambiente 34.

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 aumenta 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 e eficiência dada pela equação 3.42 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, 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 irei 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 RESULTADOS PRELIMINARES

6 CRONOGRAMA DO PROJETO

O cronograma deste trabalho será definido em dois passos, o primeiro passo referente ao desenvolvimento teórico 6.1 e o segundo referente ao desenvolvimento prático 6.2.

6.1 Cronograma do Trabalho de conclusão de curso I

Tabela 2 – 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

6.2 Cronograma do Trabalho de conclusão de curso II

Tabela 3 – 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 sensoramento	11/11/2020					
Modelagem do sistema de rastreamento usando os módulos de sensoramento	20/11/2020					
Modelagem do amplificador do sinal do módulo de sensoramento	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

REFERÊNCIAS

- Atmel Corporation. **Atmega-8 Atmega-8L**. 2013. 331 p. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf>.
- Atmel Corporation. **Atmega328P**. 2015. 294 p. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf>.
- 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**, Cefin Publishing House, v. 1, n. 6, p. 246–249, 2019. ISSN 25594397.
- DAS, S.; CHAKRABORTY, S.; SADHU, P. K.; SASTRY, O. S. Design and experimental execution of a microcontroller (μC)-based smart dual-axis automatic solar tracking system. **Energy Science and Engineering**, John Wiley and Sons Ltd, v. 3, n. 6, p. 558–564, nov 2015. ISSN 20500505.
- KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. [S.l.: s.n.], 2009. ISSN 1930-6180. ISBN 9780123745019.
- 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, jan 2019. ISSN 17481325.
- 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**. 2019. 1 p. Disponível em: <https://content.arduino.cc/assets/UNO-TH_Rev3e_sch.pdf>.
- SENBA. **(GL5516 - GL5549) Photoresistor**. 2020. 6 p. Disponível em: <<https://datasheetspdf.com/pdf/756925/SENBA/GL5516/1>>.
- WENDLING, M. Amplificadores operacionais. **Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá- Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho-UNESP, Guaratinguetá**, 2010.