



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

THIAGO PETRONE

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE BANCADA DE UM RASTREADOR SOLAR DE 2
EIXOS APLICADO A UM PAINEL FOTOVOLTAICO

São Paulo
Junho/2015

THIAGO PETRONE

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE BANCADA DE UM RASTREADOR SOLAR DE 2
EIXOS APLICADO A UM PAINEL FOTOVOLTAICO

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Especialista em Energias
Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência
Energética.

Área de Concentração:
Energia Solar Fotovoltaica

Orientador:
Prof. Dr. Cláudio Roberto de Freitas Pacheco

São Paulo
Junho/2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Petrone, Thiago

Construção e avaliação de um protótipo de bancada de um rastreador solar de 2 eixos aplicado a um painel fotovoltaico / T. Petrone. -- São Paulo, 2015. 103p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Energia solar I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II. t.

FICHA DE APROVAÇÃO

Nome: Thiago Petrone

Título: Construção e avaliação de um protótipo de bancada de um rastreador solar de 2 eixos aplicado a um painel fotovoltaico.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Aprovado em: Junho 2015

Orientador:

Prof. Dr. Cláudio Roberto de Freitas Pacheco

Assinatura: _____

Banca Examinadora:

Assinatura: _____

Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a um ente muito querido que deixou saudade ao partir para a eternidade.
Quelita, você estará pra sempre em nossos corações!

AGRADECIMENTOS

À família Petrone por proporcionarem os recursos necessários para a conclusão desse curso mesmo durante os momentos de dificuldade, por cederem um local de trabalho e manterem suas portas sempre abertas.

À família Bezerra pelo acolhimento, interesse e incentivo diários, que me deram muita força.

À Fernanda Bezerra por tantos momentos de companheirismo, cumplicidade e compreensão.

Ao professor Pacheco, pelas orientações e motivações, pelo conhecimento técnico transmitido e por sua sensibilidade ao lidar com seres humanos e animais.

Às conversas casuais sobre eletricidade em aleatórias lojas de componentes na Santa Ifigênia.

Aos amigos que não se distanciaram e àqueles que se distanciaram também.

Índice de figuras

Figura 1: Órbita da Terra em torno do Sol, sua inclinação e estações.(CRESESB, 2014).....	20
Figura 2: Variação do caminho percorrido pelo sol nas diferentes épocas do ano.(SOLARCHOICE)....	20
Figura 3: Coordenadas geográficas de um ponto. (MATHUR).....	21
Figura 4: Ângulo horário, latitude, declinação solar. (PACHECO, 2013).....	23
Figura 5: Ângulos da radiação solar. (TREVELIN, 2014).....	25
Figura 6: Ângulo de azimute (γ) e de inclinação (β) da superfície. (DUFFIE & BECKMAN, 2013).....	26
Figura 7: (a) Irradiância direta sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância incidente sobre uma superfície inclinada. (CRESESB, 2014).....	27
Figura 8: Relação entre o ângulo zenital solar e a inclinação do coletor em uma situação de máxima incidência.....	28
Figura 9: Atenuação espectral da radiação solar extraterrestre. (CRESESB, 2006).....	29
Figura 10: Relação Sol-Terra. Adaptado de (DUFFIE & BECKMAN, 2013).....	30
Figura 11: Componentes da radiação solar. (CRESESB, 2006).....	32
Figura 12: Distribuição generalizada de valores de KT em função de KT. (DUFFIE & BECKMAN, 2013).....	33
Figura 13: Correlação sugerida entre KT, Hd e ω S.(DUFFIE & BECKMAN, 2013).....	35
Figura 14: Correlação sugerida entre KT, Hd, ω S.(DUFFIE & BECKMAN, 2013).....	35
Figura 15: Corte transversal de uma célula fotovoltaica. (CRESESB, 2006).....	37
Figura 16: Silício monocristalino. (CRESESB, 2006).....	38
Figura 17: Silício policristalino. (CRESESB, 2006).....	38
Figura 18: Silício amorfo.(GREENDIARY).....	38
Figura 19: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.(WIKIPEDIA - THEORY OF SOLAR CELLS).....	39
Figura 20: Curva IxV de uma célula fotovoltaica monocristalina.(CRESESB, 2014).....	40
Figura 21: curva PxV de um módulo fotovoltaico monocristalino.(CRESESB, 2014).....	41
Figura 22: Efeito da intensidade luminosa em uma célula fotovoltaica. (CRESESB, 2014).....	41
Figura 23: Efeito da temperatura em uma célula fotovoltaica. (CRESESB, 2014).....	41
Figura 24: Sistema 'Off-Grid'. (CAPTOSOL).....	42
Figura 25: Sistema 'Grid-Tie'. (CAPTOSOL).....	43
Figura 26: Simulação da potência gerada por um módulo com inclinação igual à latitude. (PVEDUCATION).....	44
Figura 27: Simulação da potência gerada por um módulo com inclinação de 60 graus. (PVEDUCATION).....	44
Figura 28: Rastreador solar de eixo único horizontal.(SOLARCHOICE).....	46
Figura 29: Rastreador solar de eixo único polar.(SOLARCHOICE).....	46
Figura 30: Rastreador solar de dois eixos.(SOLARCHOICE).....	46
Figura 31: Características LDR.(SCIENCEPROG).....	48
Figura 32: Componentes de um servo motor. (UNESP).....	49
Figura 33: Driver para motor de passo ULN2003. (AUTOCORE).....	50
Figura 34: Características construtivas de um motor de passo.(AUTOCORE).....	50
Figura 35: Intel 8051. (WIKIPEDIA 8051).....	51
Figura 36: Placas da família Arduino. (FILIPEFLOP).....	52
Figura 37: Arduino UNO.(ENGINEER ZERO).....	53
Figura 38: Arquitetura Atmega328.(ATMEGA328).....	54
Figura 39: Atmega 328 diagrama de pinos.(SOUZA, 2013).....	54
Figura 40: Diagrama de blocos de uma CPU AVR.(ATMEGA328).....	55
Figura 41: Modularidade e versatilidade da plataforma através dos Shields.....	58
Figura 42: Painel solar DFRobot 9v 220mA.....	60
Figura 43: Suporte Pan/Tilt e servo motores.....	61
Figura 44: Suporte Pan Tilt desmontado.....	61

Figura 45: Suporte principal do sistema.....	61
Figura 46: LDR 7 MM.....	62
Figura 47: Resistores de 470 Ω	62
Figura 48: Micro Servo SG90 TowerPro.....	63
Figura 49: Arduino Uno e pinagem.....	63
Figura 50: Datalogger Shield.....	64
Figura 51: Memória SD com capacidade de 2Gb.....	64
Figura 52: Princípio de rastreamento solar com sensores LDR.....	65
Figura 53: Esquema do módulo de sensoriamento.....	66
Figura 54: Rotina de rastreamento.....	67
Figura 55: Esquema da montagem do sistema (desenvolvido usando o software Fritzing).....	69
Figura 56: Protótipo 1 no local de testes.....	73
Figura 57: Comparativo entre a variação do ângulo de inclinação da base do painel fotovoltaico e o ângulo zenital solar, ao longo do dia.....	74
Figura 58: Comparativo entre a variação do ângulo de azimute da base do painel fotovoltaico e o azimute solar, ao longo do dia.....	74
Figura 59: Diferença entre os valores de inclinação medidos e ângulo zenital solar calculado.....	75
Figura 60: Diferença percentual entre os valores de azimute medidos e o ângulo azimutal solar calculado.....	75
Figura 61: Comparativo entre a variação do ângulo de incidência ao longo do dia para as posições fixa e rastreada.....	76
Figura 62: Protótipo final no local de testes.....	77
Figura 63: Comparativo entre a variação do ângulo de inclinação da base do painel fotovoltaico e o ângulo zenital, ao longo do dia.....	78
Figura 64: Comparativo entre a variação do ângulo de azimute da base do painel fotovoltaico e o azimute solar, ao longo do dia.....	78
Figura 65: Diferença percentual entre os valores de inclinação medidos e ângulo zenital solar calculado.....	79
Figura 66: Diferença percentual entre os valores de azimute medidos e o ângulo azimutal solar calculado.....	79
Figura 67: Comparativo entre a variação do ângulo de incidência ao longo do dia para as posições fixa e rastreada.....	80
Figura 68: Comparativo entre a variação da potência entregue a cargas de mesmo valor pelos painéis fotovoltaicos, ao longo do dia.....	81
Figura 69: Comparativo entre as temperaturas dos painéis fixo e móvel ao longo do tempo.....	81
Figura 70: Ganho percentual da potência entregue, ao longo do tempo.....	82
Figura 71: Perfil de consumo anual de energia elétrica da aplicação residencial.....	86
Figura 72: Médias mensais de radiação solar incidente sobre o plano inclinado.....	87
Figura 73: Produção anual de energia pelo painel de 250 Wp (gráfico).....	89
Figura 74: Gráfico com a ocorrência de um KT satisfatório ao longo do ano.....	90
Figura 75: Comparativo entre a radiação média mensal disponível no plano horizontal (H), no plano inclinado (HT) e no rastreador solar.....	92
Figura 76: Distribuição do ganho obtido pela implantação do rastreador ao longo do ano.....	93
Figura 77: Cálculo VPL utilizado.....	94
Figura 78: Cálculo TIR utilizado.....	94
Figura 79: Fluxo de caixa descontado da implantação do sistema rastreador.....	95
Figura 80: Fluxo de caixa acumulado da implantação do sistema rastreador.....	95
Figura 81: Janeiro.....	100
Figura 82: Abril.....	100
Figura 83: Fevereiro.....	100
Figura 84: Maio.....	100
Figura 85: Março.....	100
Figura 86: Junho.....	100
Figura 87: Julho.....	101

Figura 88: Outubro.....	101
Figura 89: Agosto.....	101
Figura 90: Novembro.....	101
Figura 91: Setembro.....	101
Figura 92: Dezembro.....	101
Figura 93: Características elétricas do painel de 250Wp utilizado.....	102
Figura 94: Características gerais do painel de 250Wp utilizado.....	102

Índice de tabelas

Tabela 1: Considerações para o cálculo do dia do ano (n).....	22
Tabela 2: Dias médios dos meses. (DUFFIE & BECKMAN, 2013).....	22
Tabela 3: Tabela de irradiação diária média mensal em MJ/m ² para G _{sc} = 1353 W/m ² . (DUFFIE & BECKMAN, 2013).....	31
Tabela 4: Distribuição acumulativa mensal de KT em função de KT. (DUFFIE & BECKMAN, 2013). 34	34
Tabela 5: Especificações técnicas do painel.....	60
Tabela 6: Especificações do Servo motor TowerPro SG9.....	63
Tabela 7: Especificações Arduino UNO.....	63
Tabela 8: Análise do ganho do sistema de rastreamento sobre o sistema fixo.....	82
Tabela 9: Estimativa do consumo energético do sistema.....	83
Tabela 10: Ganho líquido do sistema.....	83
Tabela 11: Cálculo do ângulo horário.....	84
Tabela 12: Cálculo da irradiação extraterrestre horária para o período do experimento.....	84
Tabela 13: Irradiação coletada pelos painéis fixo e rastreador ao longo das 7 horas de ensaio.....	84
Tabela 14: Fração de I ₀ coletada por cada sistema.....	85
Tabela 15: Custo da energia elétrica da residência com impostos.....	87
Tabela 16: Memorial de cálculo de HT para o mês de janeiro.....	88
Tabela 17: Cálculo anual de energia gerada pelo painel de 250 Wp.....	89
Tabela 18: Cálculo da frequência mensal de KT >= 0,4.....	90
Tabela 19: Cálculo da intensidade de radiação captada pelo rastreador.....	91
Tabela 20: Produção anual de energia pelo painel de 250Wp acoplado ao rastreador.....	92
Tabela 21: Lista de materiais.....	93
Tabela 22: Preço anual médio do kWh da residência.....	94
Tabela 23: Comparação da economia feita pela utilização da energia gerada pelo painel de 250Wp fixo e com o rastreador.....	94
Tabela 24: Estudo de viabilidade econômica do projeto.....	95

Índice de símbolos

L - Ângulo de longitude de uma localidade
GPS - Sistema de posicionamento global
n - Número do dia do ano
Int - Menor inteiro
HS - Hora Solar
 δ - Declinação solar
HL - Hora Legal
 ω - Ângulo horário
 γ_s - Azimute solar
 θ - Ângulo zenital
 γ - Ângulo azimute da superfície
 β - Ângulo de inclinação da superfície
 θ - Ângulo de incidência da radiação solar
Gsc : Constante Solar
G0 : Irradiância extraterrestre no plano horizontal
H0 : Irradiância extraterrestre integrada diária sobre plano horizontal
 ρ : Refletividade do solo
DDP: Diferença De Potencial
Voc - Tensão de circuito aberto
Isc - Corrente de curto-circuito
 η - Eficiência de conversão
FF - Fator de forma
P - Potência elétrica
P - Potência elétrica
I - Corrente elétrica
V - Tensão elétrica
PN : Potência nominal
Wp : Watt-pico
kWh - Kilo watt Hora (unidade de energia)
m² - metro quadrado (unidade de área)
LDR - Resistor dependente de luz (Light Dependent Resistors)
CPU - Unidade Central de Processamento (Central Processing Unit)
Atmel - Fabricante de microcontroladores
USB - Universal Serial Bus (Barramento Serial Universal)
ICSP - In-Circuit Serial Programming (Programação serial em circuito)
RISC - Reduced instruction set computing (Computação de número reduzido de instruções)
SRAM - Static random-access memory (memória de acesso randômico estático)
EEPROM - electrically erasable programmable read-only memory (Eletricamente apagável programável memória somente leitura)
I2C - Inter-Integrated Circuit (Circuito inter-integrado)
ALU - Unidade lógica aritmética
SDA - Serial Data Line (Linha de dados serial)
SCL - Serial Clock Line (Linha de clock serial)
USART - Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (Receptor Transmissor síncrono assíncrono universal)
SPI - Serial Peripheral Interface (Interface periférica serial)
Aref - Pino de tensão de referência
A/D : Analógico-Digital
VIN : Tensão de entrada
GND : Terra elétrico

GPRS : General packet radio service (Pacote geral de serviço de rádio)
RTC : Real Time Clock (Relógio de tempo real)
Bluetooth - protocolo de comunicação sem fio
IDE : Integrated development environment (Ambiente integrado de desenvolvimento)
mA - mili ampère (unidade de corrente elétrica)
mm : milímetro (unidade de comprimento)
g : grama (unidade de massa)
PAN/TILT - Panorâmico/Inclinado
M Ω : Mega Ohm (1×10^6 Ohms)
 Ω : Ohm (unidade de resistência elétrica)
kgf·cm : kilograma-força-centímetro (unidade de torque)
 μ s : micro-segundo (unidade de tempo)
°C : graus Celsius (unidade de temperatura)
PWM : Pulse Width Modulation (modulação por largura de pulso)
MHz - Mega Hertz (unidade de frequência)
SD : Secure Digital
Gb - Giga byte
AC : Alternated Current (Corrente Alternada)
A : Ampère (unidade de corrente)

RESUMO

Vivemos em uma época de crescente popularização da sustentabilidade. A sociedade começa a organizar-se em torno de uma prática em que a responsabilidade é de todos: reduzir, reutilizar e reciclar. A energia elétrica é considerada um dos insumos mais utilizados pelas civilizações modernas, sua geração pode ser altamente poluente e de grande impacto socioeconômico. Nesse cenário, a busca por fontes renováveis de geração de eletricidade pode ser considerada uma importante atitude de reciclagem já que alguns dos métodos antigos são incompatíveis com a causa ambiental, por fazerem uso de recursos cada vez mais escassos e que não se renovam, e contribuem para o colapso de um sistema financeiro apoiado em práticas onde poucos são favorecidos. Dentre as fontes de energia renovável difundidas nos dias de hoje, destaca-se a energia fotovoltaica que utiliza da energia dos raios solares para gerar energia elétrica. Essa tecnologia popularizou-se muito e cresceu exponencialmente nos últimos anos. Esse trabalho é uma tentativa de aumentar a eficiência da captação de radiação por painéis fotovoltaicos, desenvolvendo um protótipo de rastreador solar, usando a plataforma de prototipação Arduino. O dispositivo deve ser capaz de acompanhar o movimento do sol ao longo do dia e durante as estações, maximizando a incidência luminosa sobre uma superfície coletora. O protótipo, que será construído, deverá também avaliar sua própria performance tanto de rastreamento quanto de ganho energético, gravando os dados de posicionamento e medindo a potência entregue a cargas resistivas, por até dois painéis, simultaneamente, ao longo do tempo.

Palavras-chave: rastreamento solar, energia fotovoltaica, Arduino, índice de claridade, geometria solar, potencial solar.

ABSTRACT

We live in a time of growing popularity of sustainability. The society begins to organize itself around a practice where the responsibility belongs to all: reduce, reuse and recycle. Electricity is considered one of the most important inputs used by modern civilizations, its generation can be highly polluting and of a great economic and social impact. In this scenario, the search for renewable electrical energy generation can be considered as an important recycling attitude, since old practices are incompatible with the environmental cause, by making use of increasingly scarce and not renewable resources, contributing to the collapse of a financial system based on practices which very few are favored. Among the most disseminated renewable energy sources these days, there is photo-voltaic solar energy that uses sunlight to generate electricity. This technology is becoming very popular and has grown exponentially in recent years. This work is an attempt to increase of radiation capturing efficiency of photo-voltaic panels through the development of a sun tracker prototype, using the Arduino prototyping platform. The device should be able to follow the sun's apparent motion over the day and over the seasons, maximizing light incidence on a collector surface. The prototype to be built, should also evaluate its own performance by means of tracking and also how much more energy is being obtained, recording the position data and measuring the power delivered to a resistive load by up to two panels simultaneously over time.

Keywords: solar tracking, photovoltaics, Arduino, clarity index, solar geometry, solar potential.

Sumário

1.INTRODUÇÃO.....	17
1.1OBJETIVO.....	18
1.2JUSTIFICATIVA.....	18
1.3METODOLOGIA.....	18
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1Sol e Terra.....	19
2.2Geometria solar.....	20
2.2.1Posição geográfica.....	21
2.2.2Norte Verdadeiro.....	21
2.2.3Número do dia do ano (n) e dia médio de cada mês.....	22
2.2.4Hora solar (HS) e Declinação solar (δ).....	22
2.2.5Ângulo horário (ω) e Declinação solar (δ).....	23
2.2.6Ângulo horário do pôr do sol (ω_s).....	24
2.2.7Azimute Solar γ_s Ângulo zenital θ_z	24
2.2.8Ângulo de azimute (γ) e de inclinação (β) da superfície.....	25
2.2.9Ângulo de incidência (θ).....	26
2.2.10Máxima incidência.....	27
2.3Potencial solar terrestre.....	29
2.3.1A constante solar (G_{sc}) e a Irradiação extraterrestre.....	30
2.3.2Componentes da radiação e o índice de claridade (KT).....	32
2.3.3Estimativa da radiação difusa diária (H_d) e média diária (H_d) sobre o plano horizontal.....	34
2.3.4Razão entre a radiação incidente sobre os planos horizontal e inclinado (R_b).....	35
2.3.5Refletividade do solo (ρ).....	36
2.3.6Modelo da radiação integrada diária média mensal sobre uma superfície inclinada fixa (HT) e razão entre o plano horizontal (R).....	36
2.4Energia solar fotovoltaica.....	37
2.4.1Células e módulos fotovoltaicos.....	37
2.4.2Características elétricas das células fotovoltaicas.....	38
2.4.2.1Curva I x V.....	39
2.4.2.2Parâmetros elétricos.....	40
2.4.3Fatores de influência nas curvas características.....	41
2.4.4Módulos fotovoltaicos.....	42
2.4.5Sistemas fotovoltaicos.....	42
2.4.6Posicionamento dos módulos fotovoltaicos.....	44
2.5Sistemas de rastreamento solar.....	45
2.5.1Tipos de rastreadores.....	46
2.5.2Componentes do sistema.....	47
2.5.2.1Suportes mecânicos.....	47
2.5.2.2Sensores fotoelétricos.....	47
2.5.2.3Atuadores.....	48
2.5.2.4Processador.....	50
2.6Arduino.....	52
2.6.1Arduino UNO Rev. 3.....	53
2.6.2Atmega328.....	54
2.6.2.1CPU.....	55
2.6.2.2Entradas analógicas.....	56
2.6.2.3TWI.....	56
2.6.2.4Entradas e Saídas Digitais.....	56
2.6.2.5Interrupções externas.....	57
2.6.2.6USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter).....	57
2.6.2.7SPI.....	57

2.6.2.8	LED embutido, Reset , Aref e pinos de energia.....	58
2.6.3	Shields.....	58
2.6.4	Programação e bibliotecas.....	59
2.6.5	Bootloader.....	59
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
3.1	Painel fotovoltaico.....	60
3.2	Suportes.....	61
3.3	Sensores.....	62
3.4	Atuadores.....	62
3.5	Arduino UNO.....	63
3.6	Datal-logger Shield e cartão SD 2Gb.....	64
3.7	Fonte AC.....	64
3.8	Plataforma de sensoriamento.....	65
3.9	Rastreamento solar.....	66
3.10	Montagem do sistema.....	68
3.11	Procedimento de medição.....	69
3.11.1	Medição da potência do painel.....	70
3.11.2	Medição de tensões usando a placa Arduino UNO.....	70
3.11.2.1	Calibração para uma medição precisa de tensões.....	70
3.11.3	Medição dos ângulos de posicionamento.....	71
3.11.4	Procedimento com um único painel.....	71
3.11.5	Procedimento com dois painéis solares independentes.....	72
3.12	Condução dos ensaios.....	72
3.13	Ensaio efetuados e seus resultados.....	73
4.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	82
4.1	Análise econômica.....	86
4.1.1	Perfil de consumo e tarifação de energia.....	86
4.1.2	Potencial solar.....	87
4.1.3	Potência gerada pelo sistema fixo instalado.....	89
4.1.4	Implantação do rastreador.....	90
4.1.5	Custo do sistema.....	93
4.1.6	Viabilidade financeira.....	94
5.	CONCLUSÃO.....	96
6.	TRABALHOS FUTUROS.....	97
7.	BIBLIOGRAFIA.....	98
	Anexo A: Atlas Solarimétrico brasileiro: Radiação Global Diária, média mensal.....	100
	Anexo B: Especificações técnicas do painel de 250Wp utilizado.....	102

1. INTRODUÇÃO

Os investimentos na geração de energia elétrica através de fontes renováveis é uma tendência mundial e cresce a cada ano. Seja por escassez de recursos naturais fósseis, colapso financeiro ou por preocupação com o meio ambiente, cada vez mais, nações diversificam sua matriz energética incorporando alternativas limpas de geração de energia. O boletim global do setor aponta que em 2013, foram investidos mais de 200 bilhões de dólares nesse mercado que tem a China como protagonista, seguida por Estados Unidos, Japão, Inglaterra e Alemanha. As principais fontes renováveis de energia por ordem de capacidade instalada atualmente são: hídrica, eólica, solar, biomassa e geotérmica (REN21, 2014).

A energia solar pode ser aproveitada tanto para aquecimento (térmico) quanto para a geração de energia elétrica (fotovoltaico). A energia fotovoltaica é gerada através de células de material semicondutor, denominadas de células (ou painéis) solares. O principal material utilizado para a construção das células é o silício, e os constantes avanços na área de energia solar levaram ao barateamento da tecnologia. Apesar dessa tecnologia apresentar uma taxa de conversão de até 20%, a eficiência global dos sistemas instalados apresenta-se muito inferior a isso. Um dos fatores responsável por essa redução de aproveitamento é o caráter estático do sistema que contrasta com o constante movimento do sol. Na tentativa de quantificar essas perdas para posteriormente mitigá-las é necessário um estudo da geometria solar e sua influência na intensidade da radiação disponível, para então posicionar os painéis solares da forma mais eficiente possível. Alguns sistemas propõem-se a rastrear a posição do sol e orientar os painéis de forma que estes estejam sempre perpendiculares aos raios, minimizando as perdas. Esses sistemas são chamados de rastreadores solares e são o principal objeto de estudo do presente trabalho.

O Sol fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia. Trata-se de um valor considerável, correspondendo a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período. Este fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outras formas de energia (CRESESB, 2014).

Fontes renováveis de energia, e principalmente a energia solar, são amplamente associadas à geração distribuída o que proporciona, além de todos os benefícios ambientais e da abundância de recursos, acesso a eletricidade a regiões antes segregadas devido a carência de linhas de transmissão.

1.1 OBJETIVO

Construir um protótipo de um rastreador solar dotado de sensores, usando a plataforma Arduino e avaliar sua performance. O sistema deverá ser capaz de detectar a direção de maior intensidade de radiação e atuar, em dois eixos, posicionando uma base de apoio que será acoplado um painel fotovoltaico de bancada. O protótipo também deverá ser capaz de avaliar os ângulos em que se encontra posicionado e medir a potência entregue a uma carga de valor conhecido, conectada à saída do painel. Os dados coletados de potência e posicionamento deverão ser automaticamente armazenados em uma memória para avaliação posterior. Com posse desse dados, o sistema será escalado para uma aplicação real onde será verificado sua viabilidade econômica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os sistemas estáticos de aproveitamento da energia solar para a geração de energia elétrica apresentam uma eficiência em torno de 10%. Estudos apontam para um eventual gargalo ao desenvolvimento de células mais eficientes, o que torna a busca por métodos que aproveitem melhor a incidência solar, por meio de melhor posicionamento ou rastreamento, bastante interessantes para a área (APPLEYARD, 2009). Esse trabalho é uma tentativa de aumentar a capacidade de coleta da radiação proveniente do sol por painéis fotovoltaicos, através de um mecanismo de rastreamento.

1.3 METODOLOGIA

Após essa breve introdução é apresentado, no segundo capítulo, uma revisão bibliográfica abordando os conceitos utilizados. No capítulo seguinte serão apresentados os materiais e métodos utilizados tanto para a construção do protótipo como para a condução dos ensaios, as condições dos ensaios realizados e os resultados obtidos. No capítulo seguinte os resultados serão avaliados e discutidos. O último capítulo apresenta a conclusão e uma possível continuação desse trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo destina-se a evidenciar os conceitos básicos necessários para o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente são apresentados os conceitos de geometria solar e radiação, de suma importância na avaliação dos resultados do trabalho. Em seguida são apresentados os conceitos de células fotovoltaicas e como é feita a transformação da energia luminosa em energia elétrica, importantes para o dimensionamento do sistema. Posteriormente são apresentados os sistemas de rastreamento solar propriamente ditos e por último será abordado em detalhes a plataforma de prototipagem Arduino.

2.1 Sol e Terra

O sol é a estrela central e responsável por 99,86% da massa total do sistema solar. Possui uma temperatura superficial de aproximadamente 5780K e gera sua energia através da fusão nuclear de átomos de hidrogênio para a formação de hélio que são seus componentes primários. Através da grande quantidade de calor liberada por essa reação, elétrons são excitados a estados mais altos de energia. Ao retornar espontaneamente a níveis de energia mais baixos, estes, liberam parte dessa energia na forma de radiação eletromagnética, distribuída sobre uma faixa de distintos comprimentos de onda. A essa energia dá-se o nome de radiação, ou luz, solar.

A luz solar demora aproximadamente 8 minutos e 18 segundos para chegar à Terra e a energia proveniente é consumida por todos os organismos vivos direta ou indiretamente. Sua composição espectral corresponde aproximadamente àquela esperada da radiação de um corpo negro segundo a *Lei de Planck*. A radiação solar ocupa de 100nm a 3000nm, em termos de comprimento de onda. Sua máxima densidade espectral se encontra em torno dos 550nm, que representa sensivelmente a luz verde amarelada.

Nosso planeta, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve uma trajetória elíptica em um plano que é inclinado de aproximadamente 23,5° com relação ao plano equatorial como pode ser visto na Figura 1. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias e que dá origem às estações do ano, dificultando os cálculos da posição do Sol (CRESESB, 2014).

A disponibilidade da luz será, para localidades no hemisfério sul, maior próximo ao solstício de verão (21/12) e menor próximo ao solstício de inverno (21/06). Próximo a linha do equador, a duração dos dias tendem a ser igual ao longo do ano; durante os equinócios a duração do dia é a mesma para qualquer localidade. A Figura 2 mostra a trajetória descrita pelo sol durante as diferentes estações para uma mesma localidade no hemisfério norte.

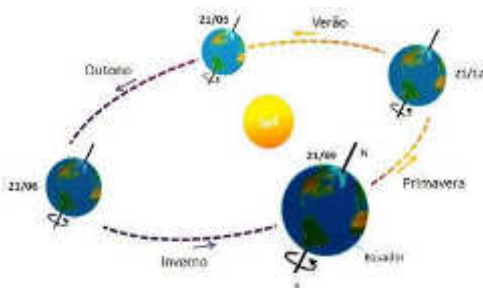


Figura 1: Órbita da Terra em torno do Sol, sua inclinação e estações. (CRESESB, 2014)

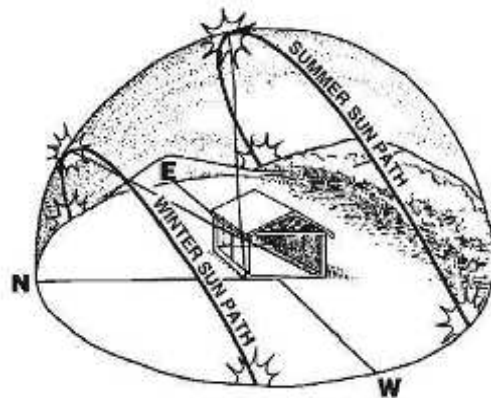


Figura 2: Variação do caminho percorrido pelo sol nas diferentes épocas do ano. (SOLARCHOICE)

2.2 Geometria solar

A radiação solar pode ser captada e convertida de diversas formas, o que geralmente envolve a instalação e posicionamento de uma superfície coletora. Devido ao ângulo de inclinação da órbita terrestre, experimentamos, para uma mesma localidade, diferentes intensidades de radiação solar ao longo do ano e até em um mesmo dia para diferentes latitudes. A intensidade disponível para captação é, entre outros fatores, função do ângulo de incidência entre o coletor e os raios solares. Por tanto, a fim de estimar a energia solar captável por um coletor, em um ponto sobre a superfície terrestre, é necessário determinar a posição exata do sol naquele momento. Essa parte do trabalho dedica-se a estudar a relação entre a posição do sol e o posicionamento de superfícies coletoras e suas implicações.

2.2.1 Posição geográfica

O posicionamento geográfico de um determinado ponto sobre o globo terrestre pode ser descrito através de uma latitude (Φ) e uma longitude (L). A partir desse sistema de coordenadas polares, quantifica-se em graus a distância que uma determinada localidade se encontra do meridiano de Greenwich ($L = 0^\circ$) e da linha do Equador ($\Phi = 0^\circ$), como mostra a Figura 3. . Valores a leste do meridiano e ao norte do equador, recebem sinal positivo. Valores a oeste e ao sul, negativo.

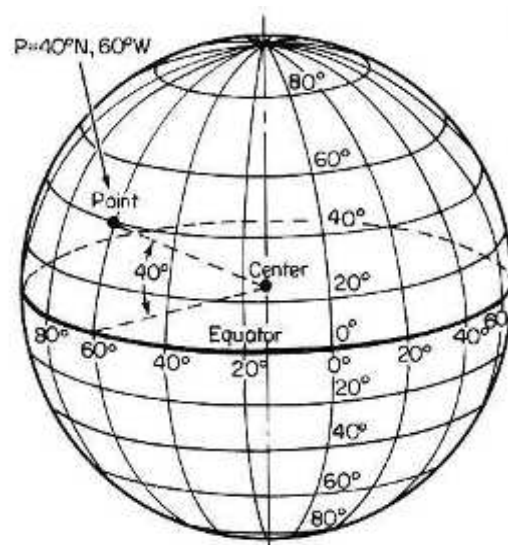


Figura 3: Coordenadas geográficas de um ponto. (MATHUR)

2.2.2 Norte Verdadeiro

Quando usamos uma bússola, sua agulha aponta para o norte magnético, que nem sempre corresponde ao norte geográfico da Terra. O verdadeiro norte é a direção em que forma um ângulo nulo entre o meridiano local e a projeção da direção do sol, quando este se encontra no ponto mais alto do seu movimento diário. O ângulo formado entre a marcação da bússola e o verdadeiro norte é chamado de declinação magnética e depende da posição geográfica. Uma declinação positiva ou leste, significa que o norte magnético encontra-se a direita do norte verdadeiro, enquanto uma declinação oeste ou negativa, indica o oposto. Dispositivos modernos como smartphones por exemplo, integram a bússola e o GPS (sistema de posicionamento global) para corrigir a declinação magnética e apresentar ao usuário um valor preciso de orientação. Segundo dados do NOAA (Administração nacional oceânica e atmosférica, dos Estados Unidos) a declinação magnética para a localidade de São Paulo é de 21 graus oeste.

2.2.3 Número do dia do ano (n) e dia médio de cada mês

Representa o número de dias passados desde o início do ano solar. Após feitas as considerações apresentadas na Tabela 1, pode ser calculado através da equação (1).

$$n = \text{Dia} + (\text{Mes} - 1) * 30 + \text{Cor} \quad (1)$$

Tabela 1: Considerações para o cálculo do dia do ano (n)

CONSIDERAÇÕES	CÁLCULO
Se Mês ≤ 2	Cor = Int(Mês/2)
Se 2 < Mês ≤ 8	Cor = (Int(Mês/2) - 2)
Se Mês > 8	(Int(Mês/2 + 1/2) - 2)

Para estimativas em projetos, muitas vezes é necessário calcular o número do dia médio de cada mês, estes podem ser obtido na tabela da Figura 4.

Tabela 2: Dias médios dos meses. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

Month	n for ith Day of Month	For Average Day of Month	
		Date	n
January	<i>i</i>	17	17
February	31 + <i>i</i>	16	47
March	59 + <i>i</i>	16	75
April	90 + <i>i</i>	15	105
May	120 + <i>i</i>	15	135
June	151 + <i>i</i>	11	162
July	181 + <i>i</i>	17	198
August	212 + <i>i</i>	16	228
September	243 + <i>i</i>	15	258
October	273 + <i>i</i>	15	288
November	304 + <i>i</i>	14	318
December	334 + <i>i</i>	10	344

2.2.4 Hora solar (HS) e Declinação solar (δ)

A Hora solar é medida a partir do ciclo diário do Sol na esfera celeste. De forma simplificada, o horário solar é a hora medida em um relógio solar, considerando meio-dia como o momento da passagem do Sol pelo meridiano local (quando o astro atinge o topo de seu movimento). (WIKIPEDIA, HS). A hora solar pode ser obtida através das seguintes equações:

$$HS = HL + Corhora \quad (2)$$

$$Corhora = (4 * (L0 - L) + E) / 60 \quad (3)$$

$$E = 9.87 * \sin(2B) - 7.53 * \cos(B) - 1.5 * \sin(B) \quad (4)$$

$$B = ((360/364) * (n - 81)) \quad (5)$$

Onde:

HS: Hora Solar

HL: Hora Legal

L: Longitude local

L0 : Longitude da hora legal

n: Número do dia no ano

2.2.5 Ângulo horário (ω) e Declinação solar (δ)

O ângulo horário (ω) é medido entre o meridiano da hora solar e a posição do observador. Para o cálculo de ω é considerado que cada hora corresponde a 15° . Este ângulo é negativo na parte da manhã segundo a equação (6):

$$\omega = (HS - 12) * 15 \quad (6)$$

A posição angular do Sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do Equador é chamada de Declinação Solar. Este ângulo varia de acordo com o dia do ano, dentro dos seguintes limites: $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$. A equação (7) permite o cálculo dessa grandeza.

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360}{365} * (284 + n)\right) \quad (7)$$

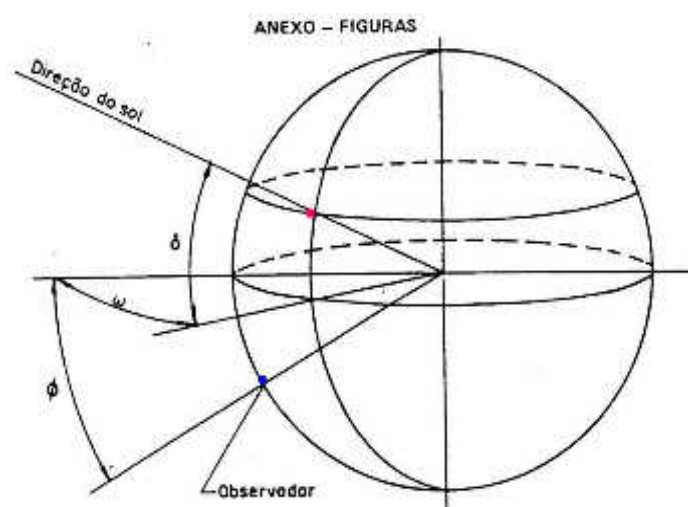


Figura 4: Ângulo horário, latitude, declinação solar. (PACHECO, 2013)

2.2.6 Ângulo horário do pôr do sol (ω_s)

O valor do ângulo horário em que o sol toca o horizonte a oeste, é chamado de ângulo horário do pôr do sol (ω_s) e tem mesmo módulo porém sinal oposto ao ângulo horário do nascer do sol para cada dia do ano. Este é função da latitude e da declinação solar e pode ser calculado conforme a equação (8):

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\Phi)\tan(\delta) \quad (8)$$

2.2.7 Azimute Solar γ_s Ângulo zenital θ_z

O ângulo de inclinação do Sol com relação à linha do zênite, perpendicular ao solo, forma o ângulo zenital do Sol. A projeção da irradiância perpendicular fornecida ao plano horizontal é maior quanto menor o ângulo zenital. A Equação (9) apresenta o cálculo do ângulo zenital do Sol.

$$\cos\theta_z = \sin(\delta)\sin(\Phi) + \cos(\delta)\cos(\Phi)\cos(\omega) \quad (9) \quad \text{Onde: } 0^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$$

O ângulo formado pela projeção da direção do Sol no plano horizontal e o meridiano Norte-sul é denominado de Azimute Solar (γ_s). Seu valor é calculado pela Equação (10) e medido a partir do meridiano local tendo a direção Sul o valor $\gamma_s = 0$.

$$\arccos\left(\frac{\cos(\theta_z) * \text{sen}(\Phi) - \text{sen}(\delta)}{\text{sen}(\theta_z) * \cos(\Phi)}\right) \quad (10) \quad \text{Onde: } -180^\circ \leq \gamma_s \leq +180^\circ$$

A direção N possui $\gamma_s = 180$. Se positivo, medir no sentido anti-horário a partir do N, se negativo, medir no sentido horário a partir de S.

Sinal: usar o sinal de ω

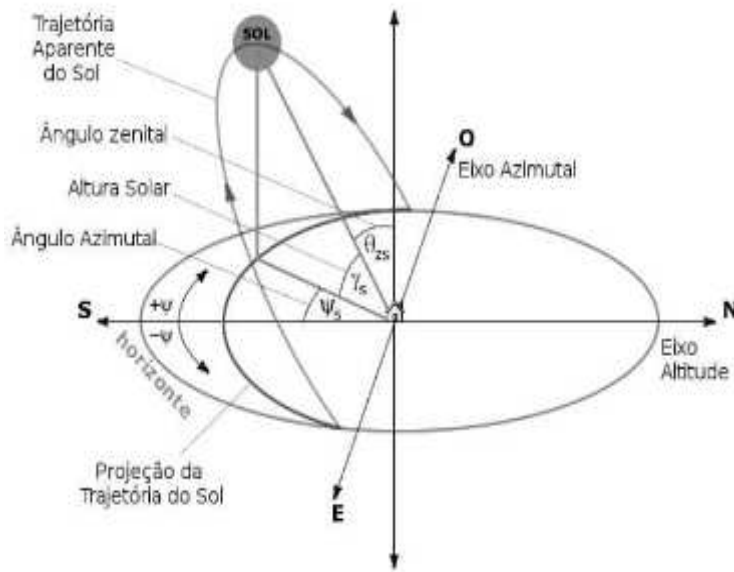


Figura 5: Ângulos da radiação solar. (TREVELIN, 2014)

2.2.8 Ângulo de azimute (γ) e de inclinação (β) da superfície

O principal sentido em avaliar a posição do sol em uma determinada localidade é a intenção de coletar a energia dos raios. Há várias formas de aproveitar a energia proveniente do sol entre as mais comuns temos o aproveitamento térmico e o fotovoltaico. Qualquer que seja o método de aproveitamento, é necessário a utilização de uma superfície coletora. Os coletores fotovoltaicos são objeto de estudo do presente trabalho e serão discutidos em detalhes posteriormente.

Durante a instalação das superfícies, há dois parâmetros que são de grande impacto na eficiência coletora. O primeiro é chamado de orientação, ou ângulo de azimute da superfície, que é o ângulo formado entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-sul, obedecendo as mesmas convenções do azimute solar. O segundo deles é a inclinação, que é o ângulo formado entre o plano da superfície e o plano horizontal. Figura 6 Ilustra a relação entre os conceitos apresentados e os ângulos da geometria solar vistos até agora.

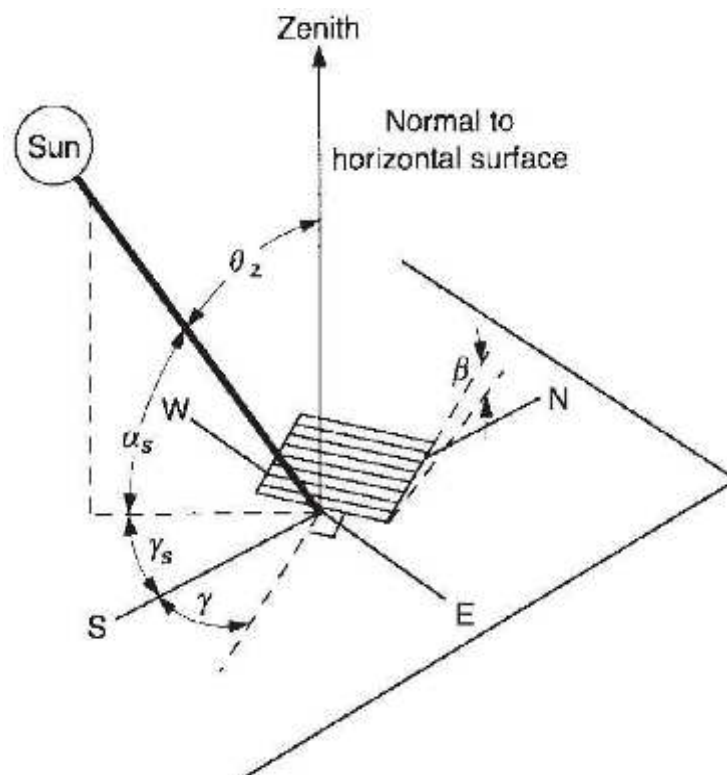


Figura 6: Ângulo de azimute (γ) e de inclinação (β) da superfície. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

2.2.9 Ângulo de incidência (θ)

O ângulo de incidência representa o ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação. A Figura 7 ilustra essa grandeza em duas condições diferentes. Na primeira, o coletor é instalado paralelo ao plano horizontal e é possível constatar que nessa situação o ângulo de incidência é igual ao ângulo zenital do sol (θ_z). Na segunda, a superfície está inclinada e pode-se concluir que para um mesmo ângulo da radiação, o ângulo formado entre a normal ao plano e os raios solares é menor nessa situação, conseqüentemente, a componente direta da radiação incidente sobre o coletor é maior nessa condição.

$$G_{d,h} = G_d \cdot \cos \theta_z \quad (11)$$

$$G_{d,\beta} = G_d \cdot \cos \theta \quad (12)$$

$$\text{se, } \theta_z > \theta \Rightarrow G_{d,h} < G_{d,\beta} \quad (13)$$

Onde: $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

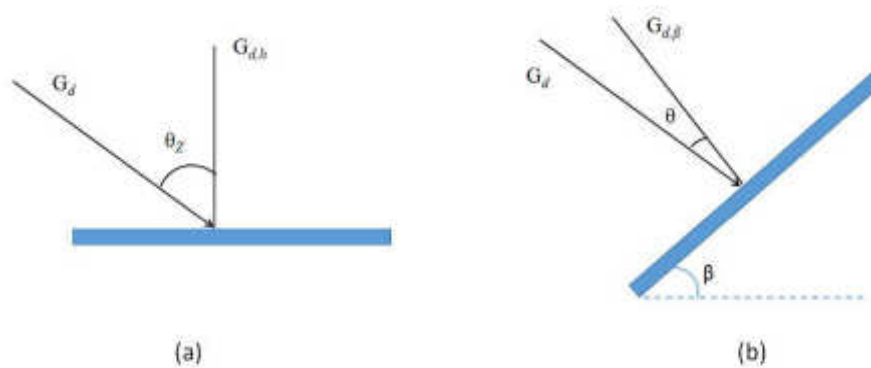


Figura 7: (a) Irradiância direta sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância incidente sobre uma superfície inclinada. (CRESESB, 2014)

Assim sendo, o ângulo de incidência tem impacto direto na eficiência global do sistema de aproveitamento solar. Quanto maior o ângulo de incidência, menor a parcela de energia direta incidente sobre a superfície aproveitamento. Dada uma superfície instalada em determinada latitude (Φ), com inclinação (β) e azimute (γ), é possível calcular o cosseno do ângulo de incidência conforme a equação (14):

$$\begin{aligned}
 \cos(\theta) = & \sin(\delta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\beta) \\
 & - \sin(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \\
 & + \cos(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\omega) \\
 & + \cos(\delta) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) \cdot \sin(\omega) \\
 & + \cos(\delta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\omega)
 \end{aligned} \tag{14}$$

2.2.10 Máxima incidência

Como foi visto no item anterior, maximizar a incidência dos raios solares sobre o coletor significa diminuir o ângulo de incidência. Em uma situação ideal, onde o ângulo de incidência é zero, a intensidade da radiação direta é máxima e o aproveitamento da energia solar também. Para minimizar o ângulo de incidência sobre coletores solares e consequentemente maximizar seu aproveitamento, é necessário otimizar os dois ângulos de posicionamento do coletor: o azimute e a inclinação. Em uma situação hipotética onde fosse possível posicionar constantemente o painel para a máxima incidência dos raios, a cada ângulo horário (ω), seria necessário reposicionar o azimute do painel com o mesmo valor do azimute solar e a inclinação com o valor do ângulo zenital solar. Esse incremento de reposicionamento teria valores diferentes para cada latitude (Φ), cada dia do ano (n) e para cada hora solar do dia (HS).

Enquanto a orientação de máxima incidência $\gamma_s = \gamma$ possa parecer intuitiva (significa literalmente apontar a superfície inclinada na direção do sol), a relação entre a inclinação e o ângulo zenital é demonstrado na Figura 8 para um maior esclarecimento.

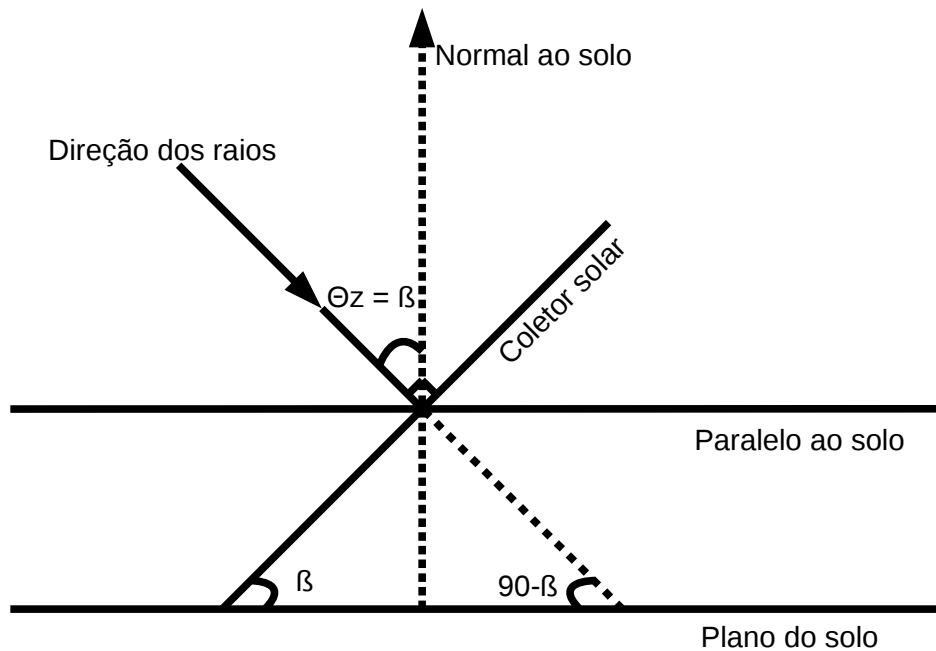


Figura 8: Relação entre o ângulo zenital solar e a inclinação do coletor em uma situação de máxima incidência.

2.3 Potencial solar terrestre

A atmosfera terrestre desempenha um importante papel, para a manutenção da vida na Terra, filtrando a luz solar. Após a entrada da luz na atmosfera e durante seu trajeto nas diferentes camadas de ar, existe uma atenuação da energia eletromagnética dos raios que, assim como a luz, é espectral. A atenuação da irradiação solar pela atmosfera ocorre fundamentalmente pelo espalhamento atmosférico graças as moléculas de ar, vapor d'água e poeira e também pela absorção por moléculas de ozônio, vapor d'água e gás carbônico. A Figura 9 ilustra essa atenuação fazendo uma comparação das características de potência em diferentes comprimentos de onda da radiação extraterrestre e ao nível do mar.

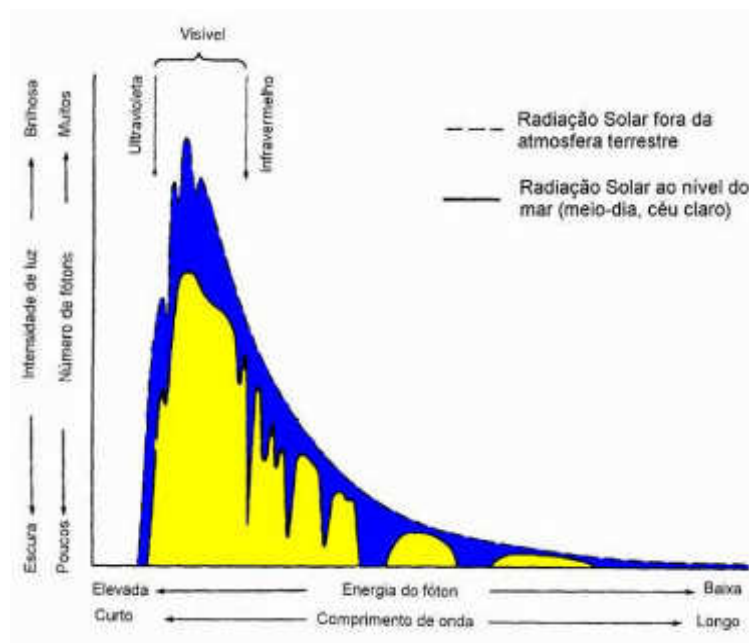


Figura 9: Atenuação espectral da radiação solar extraterrestre. (CRESESB, 2006)

A intensidade da radiação solar total sobre o plano horizontal é medida em $[W/m^2]$. Sua medição é feita por um instrumento chamado Piranômetro e é constituída por uma parcela de irradiação direta e por uma parcela de irradiação difusa. Avaliar o potencial solar de uma determinada localidade é estimar qual a intensidade de energia luminosa disponível, direta e difusa, para aproveitamento por uma superfície coletora. Isso será discutido a partir de agora.

2.3.1 A constante solar (G_{sc}) e a Irradiação extraterrestre

O pequeno diâmetro da Terra, comparado ao Sol, e a enorme distância entre o planeta e a estrela, permite que consideremos que a irradiação solar seja constituída por um feixe de raios paralelos como mostra a Figura 10.

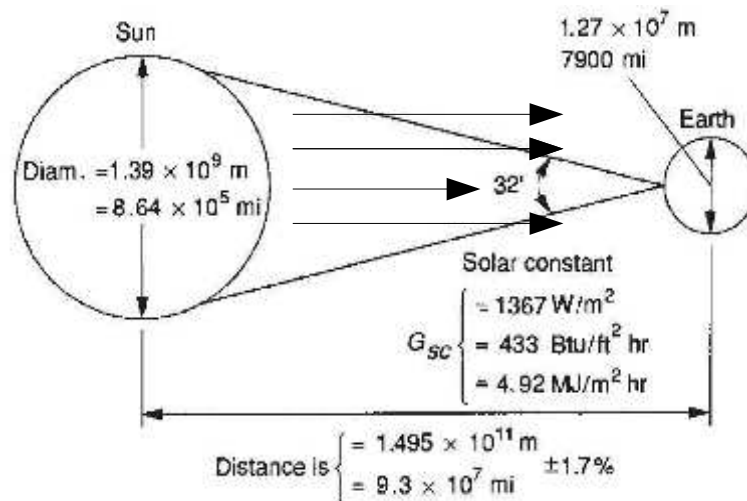


Figura 10: Relação Sol-Terra. Adaptado de (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

A Constante Solar G_{sc} é a energia proveniente do Sol, por unidade de tempo, recebida por unidade de área em uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação, na distância média Terra-Sol, fora da atmosfera. Essa constante tem o valor de 1353 W/m² e apenas pôde ser medida com precisão após a invenção de naves espaciais e balões estratosféricos. Esse valor foi aceito como padrão pela NASA em 1971 (DUFFIE & BECKMAN, 2013). Baseado na constante solar, é possível calcular a irradiação extraterrestre no plano horizontal (G_0) em W/m², em função do dia do ano e do ângulo zenital, a qualquer momento através da equação (15):

$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \cos \theta_z \quad (15)$$

Integrando a equação de G_0 do período do sol nascente ao sol poente, obtém-se a irradiação extraterrestre integrada diária sobre o plano horizontal (H_0), medida em J/m² e calculada conforme a a equação (16):

$$H_0 = 2,75 \cdot 10^4 \cdot G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right] \cdot \left[1,7510^{-2} \omega_s \sin(\delta) \sin(\Phi) + \cos(\delta) \cos(\Phi) \sin(\omega_s) \right] \quad (16)$$

Em projetos de dimensionamento de sistemas, junto com o dia médio de cada mês, é comum o uso da irradiação extraterrestre diária média mensal (\bar{H}_0) que pode ser consultada na tabela da Tabela 3 e interpolada linearmente entre latitudes vizinhas para valores intermediários.

Tabela 3: Tabela de irradiação diária média mensal em MJ/m² para $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

ϕ	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
90	0.0	0.0	1.2	19.3	37.2	44.8	41.2	26.5	5.4	0.0	0.0	0.0
85	0.0	0.0	2.2	19.2	37.0	44.7	41.0	26.4	6.4	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	4.7	19.6	36.6	44.2	40.5	26.1	9.0	0.6	0.0	0.0
75	0.0	0.7	7.8	21.0	35.9	43.3	39.8	26.3	11.9	2.2	0.0	0.0
70	0.1	2.7	10.9	23.1	35.3	42.1	38.7	27.5	14.8	4.9	0.3	0.0
65	1.2	5.4	13.9	25.4	35.7	41.0	38.3	29.2	17.7	7.8	2.0	0.4
60	3.5	8.3	16.9	27.6	36.6	41.0	38.8	30.9	20.5	10.8	4.5	2.3
55	6.2	11.3	19.8	29.6	37.6	41.3	39.4	32.6	23.1	13.8	7.3	4.8
50	9.1	14.4	22.5	31.5	38.5	41.5	40.0	34.1	25.5	16.7	10.3	7.7
45	12.2	17.4	25.1	33.2	39.2	41.7	40.4	35.3	27.8	19.6	13.3	10.7
40	15.3	20.3	27.4	34.6	39.7	41.7	40.6	36.4	29.8	22.4	16.4	13.7
35	18.3	23.1	29.6	35.8	40.0	41.5	40.6	37.3	31.7	25.0	19.3	16.8
30	21.3	25.7	31.5	36.8	40.0	41.1	40.4	37.8	33.2	27.4	22.2	19.9
25	24.2	28.2	33.2	37.5	39.8	40.4	40.0	38.2	34.6	29.6	25.0	22.9
20	27.0	30.5	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.2	35.6	31.6	27.7	25.8
15	29.6	32.6	35.9	38.0	38.5	38.4	38.3	38.0	36.4	33.4	30.1	28.5
10	32.0	34.4	36.8	37.9	37.5	37.0	37.1	37.5	37.0	35.0	32.4	31.1
5	34.2	36.0	37.5	37.4	36.3	35.3	35.6	36.7	37.2	36.3	34.5	33.5
0	36.2	37.4	37.8	36.7	34.8	33.5	34.0	35.7	37.2	37.3	36.3	35.7
-5	38.0	38.5	37.9	35.8	33.0	31.4	32.1	34.4	36.9	38.0	37.9	37.6
-10	39.5	39.3	37.7	34.5	31.1	29.2	29.9	32.9	36.3	38.5	39.3	39.4
-15	40.8	39.8	37.2	33.0	28.9	26.8	27.6	31.1	35.4	38.7	40.4	40.9
-20	41.8	40.0	36.4	31.3	26.6	24.2	25.2	29.1	34.3	38.6	41.2	42.1
-25	42.5	40.0	35.4	29.3	24.1	21.5	22.6	27.0	32.9	38.2	41.7	43.1
-30	43.0	39.7	34.0	27.2	21.4	18.7	19.9	24.6	31.2	37.6	42.0	43.8
-35	43.2	39.1	32.5	24.8	18.6	15.8	17.0	22.1	29.3	36.6	42.0	44.2
-40	43.1	38.2	30.6	22.3	15.8	12.9	14.2	19.4	27.2	35.5	41.7	44.5
-45	42.8	37.1	28.6	19.6	12.9	10.0	11.3	16.6	24.9	34.0	41.2	44.5
-50	42.3	35.7	26.3	16.8	10.0	7.2	8.4	13.8	22.4	32.4	40.5	44.3
-55	41.7	34.1	23.9	13.9	7.2	4.5	5.7	10.9	19.8	30.5	39.6	44.0
-60	41.0	32.4	21.2	10.9	4.5	2.2	3.1	8.0	17.0	28.4	38.7	43.7
-65	40.5	30.6	18.5	7.9	2.1	0.3	1.0	5.2	14.1	26.2	37.8	43.7
-70	40.8	28.8	15.6	5.0	0.4	0.0	0.0	2.6	11.1	24.0	37.4	44.9
-75	41.9	27.6	12.6	2.4	0.0	0.0	0.0	0.8	8.0	21.9	38.1	46.2
-80	42.7	27.4	9.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	20.6	38.8	47.1
-85	43.2	27.7	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	20.3	39.3	47.6
-90	43.3	27.8	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	20.4	39.4	47.8

Da mesma forma o índice de radiação horário extraterrestre sobre o plano horizontal pode ser calculado para uma variação de dois ângulos horários (ω_2 e ω_1) conforme descrito na equação (17).

$$I_0 = 2,75 \cdot 10^4 \cdot G_{sc} [1 + 0,033 \cos(360n/365)] \cdot [1,75 \cdot 10^{-2} (\omega_2 - \omega_1) \cdot \sin(\delta) \sin(\Phi) + \cos(\delta) \cos(\Phi) \sin(\omega_2 - \omega_1)] \quad (17)$$

Onde: $\omega_2 > \omega_1$

2.3.2 Componentes da radiação e o índice de claridade (K_T)

Foi dito que após a entrada da luz na atmosfera e durante o trajeto pelas camadas de ar, a componente direta da radiação sofre atenuação e portanto perde energia antes de chegar à superfície terrestre. No entanto, além da atenuação por absorção, também existe o espalhamento dessa radiação que dá origem a uma outra componente que é a parte da radiação direta que sofreu reflexão e que atinge o solo indiretamente, denominada radiação difusa mostrada na Figura 11.

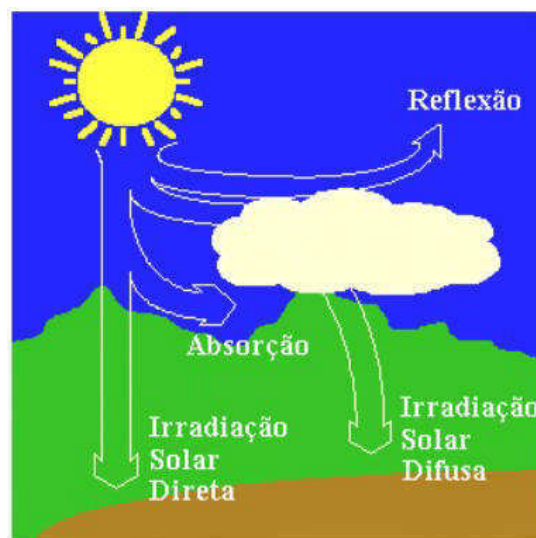


Figura 11: Componentes da radiação solar.
(CRESESB, 2006)

Por tanto, de toda a radiação disponível na superfície do solo, no plano horizontal, existe uma fração direta e uma difusa. A medição da irradiação solar direta na direção da incidência é feita com um instrumento chamado Pireliômetro e a medição da irradiação solar difusa sobre o plano horizontal é realizada com um Piranômetro provido de haste de sombreamento.

A relação entre a porção de radiação direta e difusa disponível, foi denominada índice de claridade que nada mais é que uma forma de quantificar e estimar a quantidade de nuvens e o espalhamento atmosférico da radiação incidente sobre o plano horizontal. Através da média histórica da radiação integrada diária sobre a superfície horizontal (\bar{H}), medida por instrumento, e pela radiação integrada diária sobre o plano horizontal extraterrestre (\bar{H}_0), obtida a partir da Tabela 3, é possível calcular o índice de claridade médio (\bar{K}_T) para um determinado local em um mês específico, conforme a equação (18). As informações de irradiação média mensal podem ser consultadas em um Atlas Solarimétrico.

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{H_0} \quad (18)$$

Também é possível definir um índice de claridade diário como a razão entre a radiação medida em um dia específico e a radiação extraterrestre para o mesmo dia segundo a equação (19).

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (19)$$

Estudos feitos com dados de radiação solar de diferentes estações solarimétricas permitiram concluir que localidades com o mesmo valor de \bar{K}_T , mesmo com diferentes latitudes e altitudes, apresentavam uma distribuição de frequência de índices de claridade diários muito parecidos e a partir desses dados, foram construídas curvas generalizadas de valores de K_T em função de \bar{K}_T , como mostra o gráfico da Figura 12

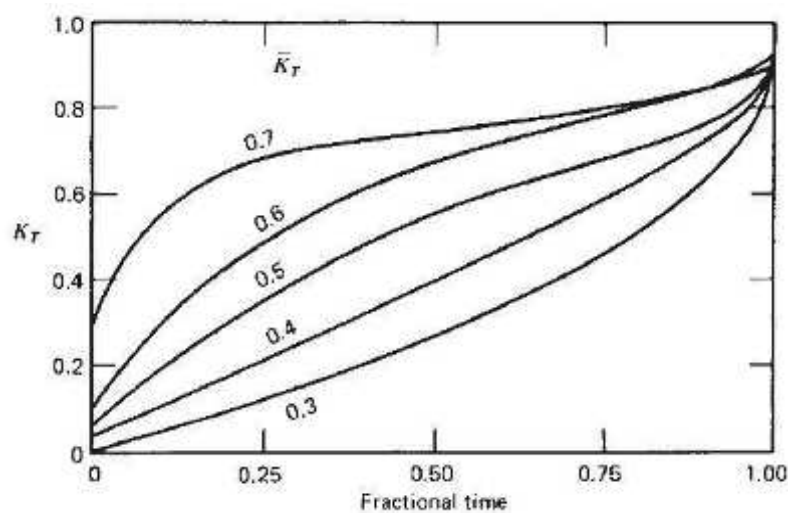


Figura 12: Distribuição generalizada de valores de K_T em função de \bar{K}_T . (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

A partir dessas curvas foram desenvolvidas equações para representá-las e uma tabela de valores que pode ser interpolada linearmente entre valores intermediários de \bar{K}_T . De forma idêntica, é possível ainda calcular o índice de claridade horário (k_T) com os valores das irradiações horárias sobre p plano horizontal (I) e extraterrestre (I_0) conforme a equação (20).

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (20)$$

Tabela 4: Distribuição acumulativa mensal de K_T em função de \bar{K}_T . (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

K_T	Value of $f(K_T)$				
	$\bar{K}_T = 0.3$	$\bar{K}_T = 0.4$	$\bar{K}_T = 0.5$	$\bar{K}_T = 0.6$	$\bar{K}_T = 0.7$
0.04	0.073	0.015	0.001	0.000	0.000
0.08	0.162	0.070	0.023	0.008	0.000
0.12	0.245	0.129	0.045	0.021	0.007
0.16	0.299	0.190	0.082	0.039	0.007
0.20	0.395	0.249	0.121	0.053	0.007
0.24	0.496	0.298	0.160	0.076	0.007
0.28	0.513	0.346	0.194	0.101	0.013
0.32	0.579	0.379	0.234	0.126	0.013
0.36	0.628	0.438	0.277	0.152	0.027
0.40	0.687	0.493	0.323	0.191	0.034
0.44	0.748	0.545	0.358	0.235	0.047
0.48	0.793	0.601	0.400	0.269	0.054
0.52	0.824	0.654	0.460	0.310	0.081
0.56	0.861	0.719	0.509	0.360	0.128
0.60	0.904	0.760	0.614	0.410	0.161
0.64	0.936	0.827	0.703	0.467	0.228
0.68	0.953	0.888	0.792	0.538	0.295
0.72	0.967	0.931	0.873	0.648	0.517
0.76	0.979	0.967	0.945	0.758	0.678
0.80	0.986	0.981	0.980	0.884	0.859
0.84	0.993	0.997	0.993	0.945	0.940
0.88	0.995	0.999	1.000	0.985	0.980
0.92	0.998	0.999	—	0.996	1.000
0.96	0.998	1.000	—	0.999	—
1.00	1.000	—	—	1.000	—

2.3.3 Estimativa da radiação difusa diária (H_d) e média diária (\bar{H}_d) sobre o plano horizontal

Baseado nos estudos experimentais de K_T realizados, foi estabelecida uma relação entre o índice de claridade e as componentes direta e difusa da radiação horária no plano horizontal. A partir disso diversos autores, entre eles Erbs e Collares-Pereira, sugeriram uma correlação entre as componentes direta e difusa da radiação diária, o índice de claridade (K_T) e o ângulo horário (ω_s) (DUFFIE & BECKMAN, 2013). Essa correlação é apresentada na equação (21) e no gráfico da Figura 13.

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & \text{for } K_T \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 & \text{for } 0.17 < K_T < 0.75 \\ -21.865K_T^3 + 14.648K_T^4 & \text{for } 0.75 < K_T < 0.80 \\ -0.54K_T + 0.632 & \text{for } 0.75 < K_T < 0.80 \\ 0.2 & \text{for } K_T \geq 0.80 \end{cases} \quad (21)$$

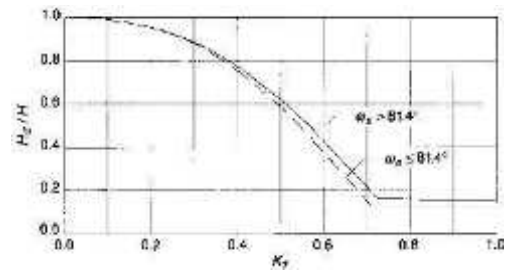


Figura 13: Correlação sugerida entre K_T , H_d e ω_s . (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

De forma análoga foi estabelecida uma relação entre o índice médio de claridade (\bar{K}_T), a fração difusa média da radiação (\bar{H}_d) e o ângulo horário do sol (ω_s), e pode ser descrita na equação (22) e observado no gráfico da Figura 14 (DUFFIE & BECKMAN, 2013).

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 0,775 + 0,00606(\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_s - 90)] \cdot \cos(115\bar{K}_T - 103) \quad (22)$$

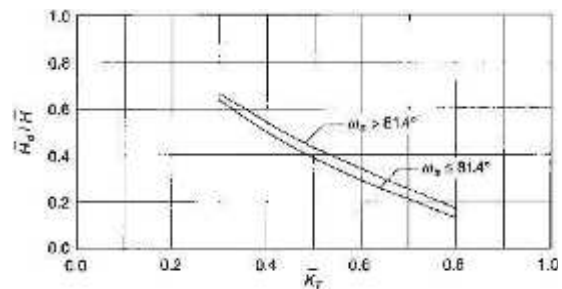


Figura 14: Correlação sugerida entre \bar{K}_T , \bar{H}_d , ω_s . (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

2.3.4 Razão entre a radiação incidente sobre os planos horizontal e inclinado (R_b)

Por vezes é necessário calcular a radiação incidente sobre o plano inclinado com dados ou estimativas da radiação captada no plano horizontal. Admitindo que a mesma radiação incide sobre ambos os planos e que para o plano horizontal o ângulo de incidência é o mesmo que o ângulo zenital do sol, a razão entre a radiação incidente pode ser descrita conforme a equação:

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$$

Para superfícies no hemisfério sul, inclinadas e orientadas para o Equador ($\gamma = 180^\circ$) temos:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\Phi + \beta) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_{Smin}) + \frac{\pi}{180} \text{sen}(\Phi + \beta) \text{sen}(\delta)}{\cos(\Phi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_s) + \frac{\pi}{180} \omega_s \text{sen}(\Phi) \text{sen}(\delta)} \quad (23)$$

$$\omega_{Smin} = \text{mínimo entre } [\arcsin(-\tan \Phi \tan \delta)] \text{ e } [\arcsin(-\tan(\Phi + \beta) \tan \delta)] \quad (24)$$

2.3.5 Refletividade do solo (ρ)

O modelo mais completo da total radiação solar incidente, considera que para superfícies coletoras inclinadas, exista ainda uma terceira componente proveniente da reflexão da radiação no solo ($\bar{H}_d \text{ solo}$) que pode ser descrita conforme a equação (25) :

$$\bar{H}_d \text{ solo} = \bar{H} \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (25)$$

Onde:

$0 < \rho < 1$: refletividade do solo

vegetação: $\rho=0,2$

neve: $\rho=0,7$

2.3.6 Modelo da radiação integrada diária média mensal sobre uma superfície inclinada fixa (H_T) e razão entre o plano horizontal (R)

As três componentes da radiação (direta, difusa pela atmosfera e refletida pelo solo) podem ser associadas conforme a equação (26) para o cálculo da radiação integrada média diária mensal total sobre uma superfície de inclinação β .

$$\bar{H}_T = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (26)$$

Se dividirmos a Equação (26) pela radiação no plano horizontal (\bar{H}), obtemos a razão da intensidade da radiação entre os dois planos conforme a equação (27).

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (27)$$

2.4 Energia solar fotovoltaica

Observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmund Becquerel, o efeito fotovoltaico é um fenômeno químico que consiste na conversão da radiação solar em eletricidade através de materiais semicondutores. O semicondutor mais utilizado é o silício que sofre uma adição de átomos de outros elementos em um processo chamado de dopagem. Esse processo é responsável pela formação de uma junção entre um semicondutores tipo P e outro tipo N, que tem a finalidade de formar um campo eletromagnético. Quando a junção PN é exposta a fótons provenientes da luz solar poderá haver a geração de pares elétron-lacuna e devido a presença do campo eletromagnético nessa região, há um deslocamento de cargas e uma consequente diferença de potencial. Em laboratório, é possível a fabricação de células solares de silício cristalino com até 27% de eficiência de conversão; as produzidas industrialmente apresentam uma eficiência da ordem de 15 a 18 % (BRAGA, 2008). Na Figura 15 é apresentado um corte transversal de uma célula fotovoltaica com intuito de ilustrar o fenômeno e o caminho percorrido pelos elétrons na formação da DDP.

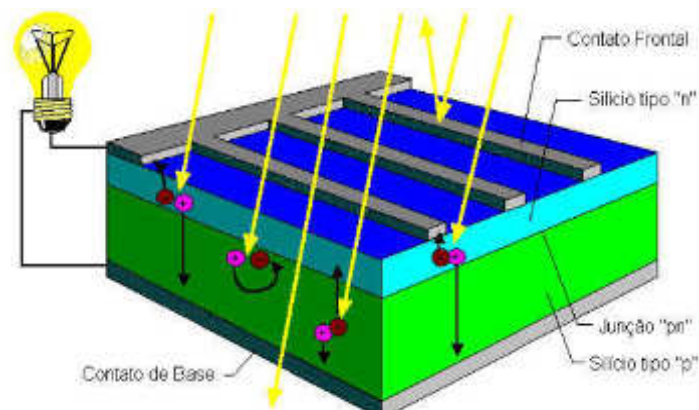


Figura 15: Corte transversal de uma célula fotovoltaica. (CRESESB, 2006)

2.4.1 Células e módulos fotovoltaicos

As células fotovoltaicas caracterizam-se pela natureza do semicondutor utilizado na sua fabricação, que na maioria dos casos é o Silício (Si). É comum encontrar três tipos principais deste elemento. São eles o silício monocristalino, o silício policristalino e o silício amorfo. As células de silício monocristalinos são as que conferem maior eficiência devido seu alto grau de pureza, porém dispendem mais energia em seu processo de fabricação e possuem o valor de mercado mais elevado. Um pouco

mais baratas e também menos eficientes, as células de silício policristalino possuem praticamente o mesmo processo de fabricação do silício monocristalino porém com um controle menos rigoroso. Por apresentar alto grau de desordem em sua estrutura, as células de silício amorfo, são ainda menos eficientes que as demais, no entanto, possuem alta competitividade devido seus baixos custos de fabricação e comercial apesar de uma degradação mais acelerada que as demais. Essa última tecnologia de fabricação de células têm crescido muito e possibilitou um salto na popularização da energia solar, pois permitiu o desenvolvimento de módulos solares flexíveis e a utilização em localidades de elevada temperatura já que essas células não sofrem tanta redução da eficiência nessas condições (CRESESB, 2014). Existem ainda outras tecnologias para a fabricação de células menos difundidas e de fato uma linha de pesquisa extensa ao redor desse assunto.



Figura 16: Silício monocristalino. (CRESESB, 2006)

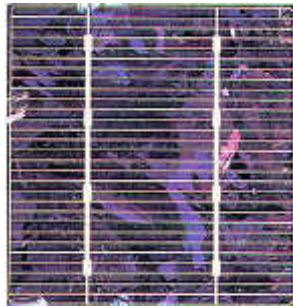


Figura 17: Silício policristalino. (CRESESB, 2006)



Figura 18: Silício amorfo. (GREENDIARY)

2.4.2 Características elétricas das células fotovoltaicas

As características elétricas variam de acordo com o processo e tecnologia empregados na fabricação de cada placa. De uma forma teórica um painel fotovoltaico pode ser considerado uma fonte de corrente com um diodo em paralelo, em uma modelagem prática é necessário incluímos as resistências em série e 'shunt', como mostra o esquema da Figura 19. Seguindo esse modelo apresentado, os parâmetros elétricos e curvas características, de uma célula de silício monocristalino, que serve como base para as demais tecnologias de células fotovoltaicas, podem ser deduzidos conforme mostrado a seguir.

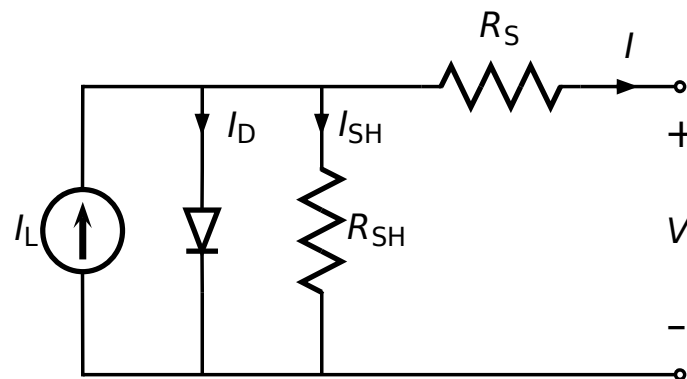


Figura 19: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica. (WIKIPEDIA - THEORY OF SOLAR CELLS)

2.4.2.1 Curva $I \times V$

A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser considerada como a soma da corrente de uma junção pn no escuro (diodo semiconductor) com a corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar. Esta corrente em função da tensão no dispositivo, denominada de curva I-V ou curva característica, pode ser descrita pela equação derivada da Equação de Shockley, do diodo ideal:

Onde:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (28)$$

I_L – corrente fotogerada [A];
 I_0 – corrente de saturação reversa do diodo [A];
 n – fator de idealidade do diodo [A];
 q – carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ [C]);
 k – constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ [J/K]);
 T – temperatura absoluta (K).

A Figura 20 apresenta a corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício de 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio. As definições dos parâmetros destacados nesse gráfico serão apresentados em seguida.

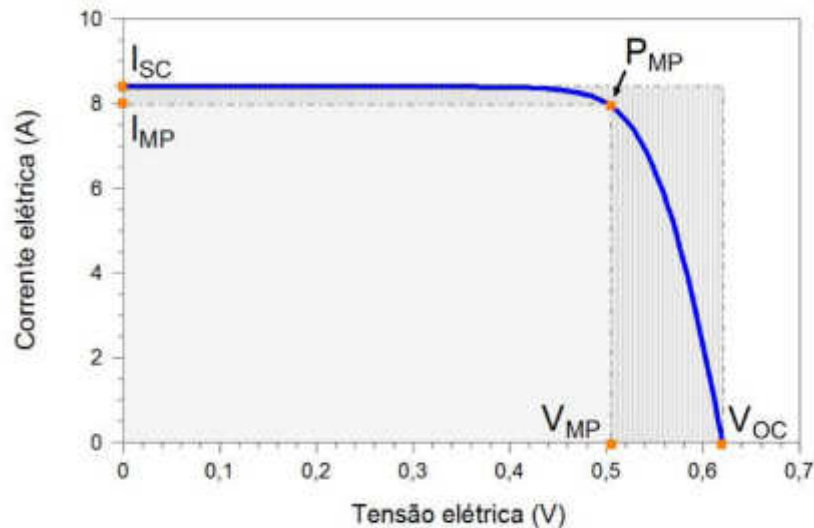


Figura 20: Curva $I \times V$ de uma célula fotovoltaica monocristalina. (CRESESB, 2014)

2.4.2.2 Parâmetros elétricos

A partir da curva I-V é possível determinar os demais parâmetros elétricos que caracterizam as células e também os módulos fotovoltaicos. São eles: a tensão de circuito aberto (V_{oc}), a corrente de curto-circuito, a eficiência e o fator de forma.

Tensão de circuito aberto (V_{oc}): é a tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando e é a máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir.

Corrente de curto-circuito (I_{sc}): é a máxima corrente que se pode obter e é medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual a zero. Pode ser medida com um amperímetro curto-circuitando os terminais do módulo.

Eficiência (η): é o parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Representa a relação entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente.

Fator de forma (FF): é a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto.

Na Figura 21, sobreposta à curva $I \times V$, destaca-se a curva da potência em função da tensão ($P \times V$), de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino de 156 mm x 156 mm sob condições-padrão de ensaio. O ponto P_{MP} indica a região de máxima potência.

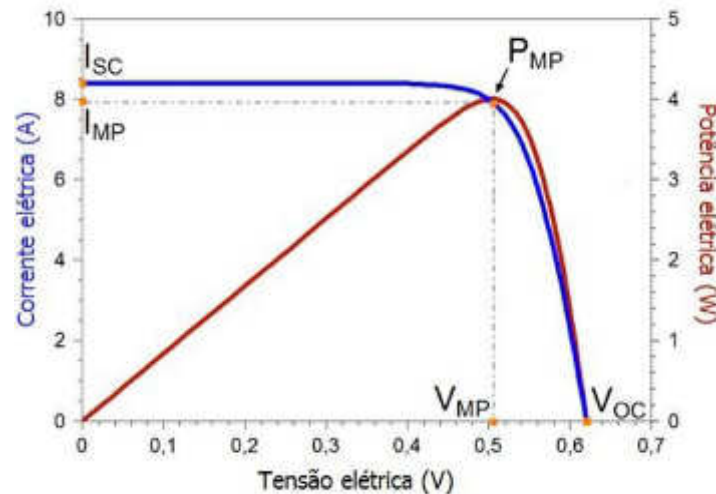


Figura 21: curva $P \times V$ de um módulo fotovoltaico monocristalino. (CRESESB, 2014)

2.4.3 Fatores de influência nas curvas características

Os principais fatores que influenciam nas características elétricas de um módulo é a intensidade luminosa e a temperatura de operação das células. A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. A Figura 22 demonstra a influência da variação da intensidade de radiação na curva característica $I-V$ de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino na temperatura de 25 °C. Por outro lado, o aumento da temperatura na célula compromete sua eficiência gerando um deslocamento horizontal da tensão V_{oc} como pode ser observado na Figura 23.

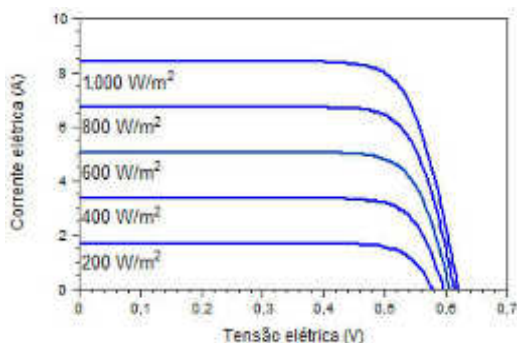


Figura 22: Efeito da intensidade luminosa em uma célula fotovoltaica. (CRESESB, 2014)

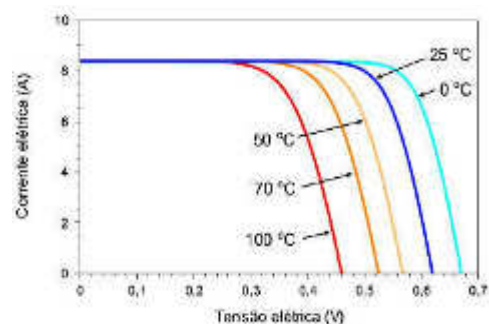


Figura 23: Efeito da temperatura em uma célula fotovoltaica. (CRESESB, 2014)

2.4.4 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos geralmente são compostos por uma associação de dezenas de células. As células podem ser associadas em série e/ou paralelo dependendo da aplicação e encapsuladas para proteção e rigidez mecânica. Por fim é colocado uma moldura de alumínio anodizado e a caixa de conexões elétricas. Por sua vez os módulos também podem ser associados em série ou paralelo para fornecer a tensão ou corrente necessárias para determinada aplicação (CRESESB, 2014).

Um parâmetro importante para o dimensionamento de um sistema é sua potência nominal (P_N). Esse parâmetro, medido em Wp, informa qual a potência máxima fornecida pelo painel em um ambiente controlado de testes onde é feita uma incidência luminosa de 1000W/m^2 , com espectro AM 1.5, a uma temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$. É possível relacionar a potência nominal (P_N), a energia foto gerada ($E_{\text{fotogerada}}$) e a radiação coletada (I_{coletada}) conforme a equação (29).

$$P_N = \left(\frac{E_{\text{fotogerada}}}{I_{\text{coletada}}} \right) \quad (29)$$

2.4.5 Sistemas fotovoltaicos

Para fazer uso do efeito fotovoltaico em aplicações reais é necessário a instalação de um sistema fotovoltaico completo. Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos distintos: 'off-grid' e 'grid tie'. O Sistema Off Grid da Figura 24 funciona totalmente independente da rede elétrica e é composto por módulos fotovoltaicos, um banco de baterias para armazenar a energia gerada, e um controlador de carga.

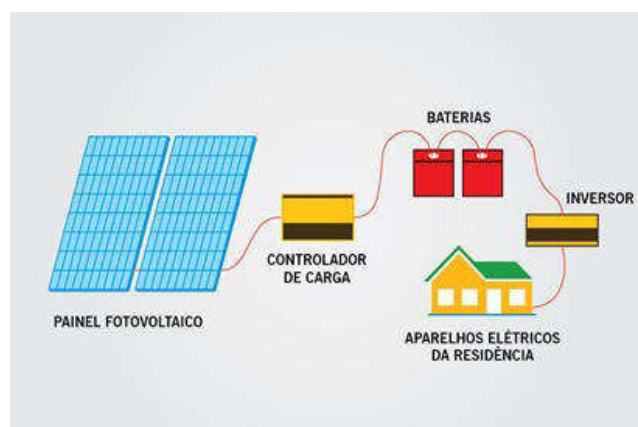


Figura 24: Sistema 'Off-Grid'. (CAPTOSOL)

Os controladores de carga gerenciam o processo de carga e descarga das baterias, evitando sobrecargas vindas dos painéis e descargas excessivas causadas pelos equipamentos ligados ao sistema. É comum utilizar-se técnicas, como modulação de pulsos (PWM) ou Maximum Power Point Tracking (MPPT), para extrair a máxima energia dos painéis. Os inversores de frequência convertem a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA) para que possa ser consumida por dispositivos que geralmente são alimentados a partir da rede elétrica. (TREVELIN, 2014)

Já o Sistema Grid Tie da Figura 25 funciona conectado à rede elétrica, injetando energia na rede quando a geração é maior do que o consumo e retirando dela a diferença necessária quando a geração é menor do que o consumo. Por isso esse sistema não faz uso das baterias e conseqüentemente ao controlador de carga. No entanto o inversor de frequência precisa garantir o sincronismo com a rede elétrica.

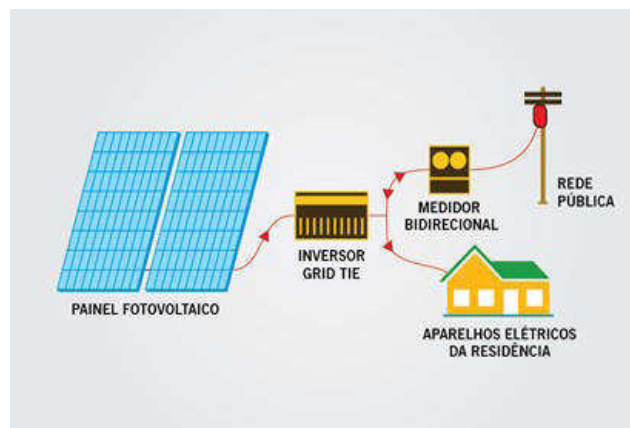


Figura 25: Sistema 'Grid-Tie'. (CAPTOSOL)

2.4.6 Posicionamento dos módulos fotovoltaicos

Foi discutido anteriormente, o efeito da intensidade luminosa na performance dos módulos fotovoltaicos e como o ângulo de incidência dos raios é inversamente proporcional a sua intensidade, por isso, um ponto importante na instalação de um sistema fotovoltaico é o posicionamento das superfícies coletoras para uma otimização do sistema. Ao posicionar os módulos deve-se considerar tanto sua orientação (γ) quanto sua inclinação (β).

Inclinação: diversos estudos demonstram que inclinar o coletor com o mesmo ângulo da latitude do local de instalação traz uma maior eficiência anual do sistema. No entanto não existe uma grande diferença da energia gerada para variações pequenas; o ideal é que a inclinação esteja em uma faixa de 10° em torno da latitude (DUFFIE & BECKMAN, 2013). Nas Figuras 26 e 27 são apresentadas simulações de módulos com diferentes inclinações em uma mesma latitude 46°S . No eixo das abcissas estão os dias do ano e no eixo das ordenadas a potência em $\text{kWh/m}^2\cdot\text{dia}$. A linha verde representa a potência gerada pelo módulo inclinado, a linha azul a potência total incidente e a linha vermelha a potência gerada pelo mesmo módulo com um ângulo de inclinação nulo. Ambas as simulações consideram a superfície orientadas para o norte verdadeiro.

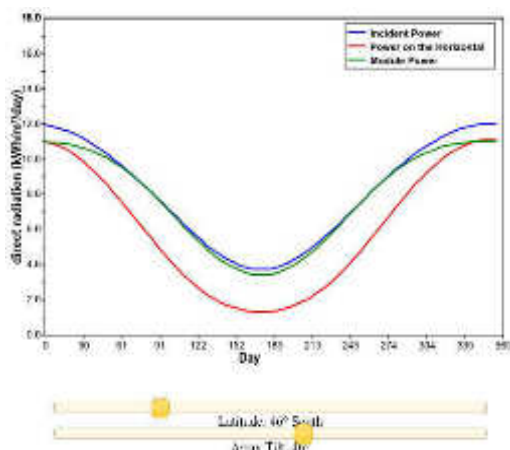


Figura 26: Simulação da potência gerada por um módulo com inclinação igual à latitude. (PVEDUCATION)

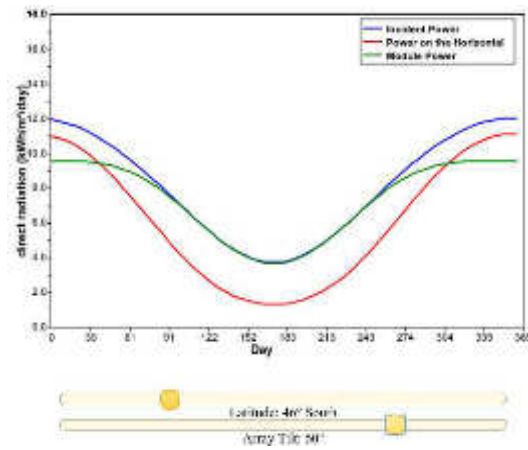


Figura 27: Simulação da potência gerada por um módulo com inclinação de 60 graus. (PVEDUCATION)

Orientação: Otimizar a orientação apenas faz sentido quando o ângulo de inclinação é diferente de zero. Coletores horizontais apresentam o mesmo aproveitamento em qualquer direção. O ângulo ótimo para a orientação dos coletores é sempre alinhado com o eixo Norte-sul verdadeiro, que é diferente do

magnético (marcado pela bússola), e com a face voltada para o sentido oposto ao hemisfério de sua localização. Dessa forma, é possível aproveitar toda a luz disponível durante o dia sem que o coletor faça sombra sobre si mesmo.

Como pode-se constatar, existe uma problemática ao determinar a inclinação de coletores solares. Não é possível otimizá-la para todas as estações do ano e apesar do valor ideal trazer um rendimento anual maior, traz significantes perdas durante os meses de verão, quando a declinação solar é menor e conseqüentemente a irradiação maior. Além disso, variações na altitude, no relevo ou particularidades climáticas da região, podem alterar o ângulo ótimo tanto de inclinação quanto de orientação, tornando necessário um estudo da região antes da instalação dos painéis.

Uma alternativa para solucionar esse problema seria a instalação de rastreadores solares que são dispositivos ativos de posicionamento dos painéis e que aumentam a eficiência de captação luminosa tanto anual quanto diária do sistema.

2.5 Sistemas de rastreamento solar

Rastreadores solares permitem que um sistema de geração de energia fotovoltaica acompanhe o movimento do sol aumentando sua captação. Essa tecnologia posiciona os painéis na direção do sol de forma a minimizar o ângulo de incidência dos raios solares. Podendo atuar na orientação, na inclinação ou em ambos, seu funcionamento básico consiste em algum sistema de geração de torque (geralmente motores elétricos), aliado a alguma forma de 'inteligência' de posicionamento (geralmente através de um microcontrolador que pode ou não fazer uso de sensores de luminância). O sistema rotaciona os painéis até encontrar a melhor posição, e assim o faz durante o dia todo, acompanhando o movimento solar. Estudos afirmam que o uso de um rastreador solar aumenta a entrega de energia de um sistema fotovoltaico em 15% a 35% (APPLEYARD, 2009). No entanto deve-se levar em consideração o método de alimentação do sistema e a energia gasta. Outro fator favorável para uso de sistemas de rastreamento é o estado da indústria de células fotovoltaicas de silício, que apresenta sinais de estagnação em seu desenvolvimento, com o preço da produção de células mais eficientes cada vez mais elevado (LEVITAN, 2012).

2.5.1 Tipos de rastreadores

Os sistemas de rastreamento solar são classificados pela quantidade de eixos de rotação. Existem dois tipos básicos de configuração de rastreadores: eixo único e eixo duplo. Cada uma dessas configurações possuem características e variações discutidas a seguir.



Figura 28: Rastreador solar de eixo único horizontal. (SOLARCHOICE)



Figura 29: Rastreador solar de eixo único polar. (SOLARCHOICE)



Figura 30: Rastreador solar de dois eixos. (SOLARCHOICE)

A Figura 28 apresenta um rastreador de eixo único horizontal. Essa configuração tem seu eixo de rotação orientado na direção Norte-sul e o coletor posicionado paralelo ao solo, acompanhando o movimento Leste-Oeste do sol. Otimizando dessa forma a orientação do coletor solar. Essa configuração apresenta melhor resultado em latitudes próximas ao equador

Para melhor desempenho em regiões afastadas da linha do Equador, os rastreadores solares de eixo único podem ser instalados com uma determinada inclinação. Essa configuração é chamada de rastreador de eixo único polar e possui o mesmo princípio de funcionamento do rastreador horizontal como pode ser observado na Figura 29.

É importante observar que rastreadores de eixo único apesar de acompanhar o azimute solar possuem inclinação fixa e portanto não preveem a variação anual do ângulo zenital do sol.

A Figura 30 apresenta um rastreador de eixo duplo. Essa configuração permite o posicionamento otimizado dos coletores tanto na orientação quanto na inclinação de forma a trazer um alto índice de aproveitamento da radiação para qualquer hora do dia e em qualquer época do ano.

2.5.2 Componentes do sistema

Para executar a tarefa de rastreamento o sistema deve conter alguns componentes básicos. São eles:

Suportes: são estruturas, geralmente metálicas, projetadas para sustentar o peso do painel e proporcionar a rotação característica do tipo de rastreador.

Sensores: são componentes foto sensíveis capazes de captar a intensidade luminosa e transduzi-la em uma grandeza inteligível ao processador. Podem ou não serem usados em sistemas de rastreamento solar.

Atuadores: são responsáveis por interpretar as informações enviadas pelo processador e imprimir o torque necessário para rotacionar o sistema de captação no ângulo correto, a quantidade desses componentes varia de acordo com o número de eixos do rastreador e suas especificações dependem da dimensão e peso dos coletores.

Controlador: considerado como 'cérebro' do sistema, é responsável por interpretar as informações provenientes dos sensores, no caso em que haja, ou então efetuar através de algoritmos os cálculos necessários para a obtenção do ângulo ótimo de posicionamento. Em seguida deve enviar essas informações para os atuadores para que esses possam posicionar os painéis.

2.5.2.1 Suportes mecânicos

Os sistemas de rastreamento solar necessitam de suportes mecânicos que devem ser cuidadosamente projetados. Além de suportar o peso do painel esses devem possibilitar o grau de movimento necessário para o sistema. Por estar sempre em movimento podem apresentar manutenção constante. Rastreadores solares de dois eixos estão ainda mais propensos a falhas mecânicas. A construção deve ser leve e resistente.

2.5.2.2 Sensores fotoelétricos

A finalidade de um sensor fotoelétrico é converter um sinal luminoso em um sinal elétrico que possa ser usado pelo processador. São componentes dispensáveis nos sistemas de rastreamento solar

mas que quando utilizados, conferem uma simplificação significativa no processamento.

Existem vários tipos de componentes sensíveis a luz que podem ser utilizados como sensores, entre eles estão o fotodiodos, fototransistores e a termopilha. Porém, os mais comumente encontrados nessa aplicação são os resistores dependente de luz ou DRs da sigla em inglês 'Light Dependent Resistors'. Esses sensores, também chamados de foto resistores, possuem uma superfície à base de Sulfeto de Cádmio que é sensível a luz e varia sua resistência elétrica de forma inversamente proporcional à intensidade de luz incidente. São montados com resistores em série para o terra, formando um divisor de tensão. A medida que há um aumento da incidência de luz o foto resistor diminui sua resistência à passagem de corrente elétrica e a tensão do resistor em série aumenta. Quando há pouca incidência de luz, a resistência do LDR é alta e portanto a tensão que cai sobre o resistor em série diminui. Apesar de ter uma resposta espectral bastante ampla, superando a capacidade do olho humano, o LDR é um dispositivo lento, sendo usado muito mais em aplicações de automação em função da luz do que de controle ou sensoriamento de variações rápidas de luz (BERTOLI, 2012). A Figura 31 ilustra as características elétrica e construtiva bem como o símbolo e aparência desse componente.

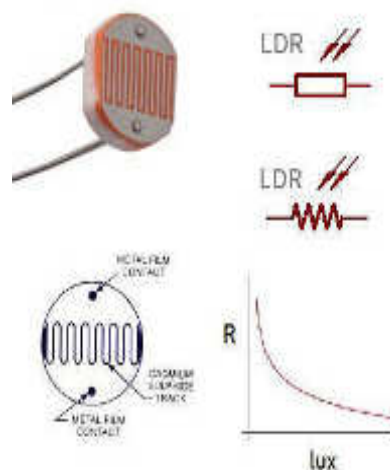


Figura 31: Características LDR.
(SCIENCEPROG)

2.5.2.3 Atuadores

Os atuadores são componentes de torque capazes de rotacionar um eixo, como é o caso de um motor elétrico de corrente contínua. Motores elétricos convencionais são máquinas destinadas a transformar energia elétrica em mecânica através de interações eletromagnéticas entre ímãs permanentes e bobinas elétricas ou eletroímãs e podem possuir escovas ou não. Nos motores elétricos escovados, a parte imóvel (estator) contém os ímãs permanentes e na parte móvel (rotor)

encontra-se a bobina. O comutador, dotado de um material isolante entre os polos, é responsável por energizar o eletroímã. Pequenos contatos móveis, também conhecidos como escovas, garantem a continuidade da rotação invertendo o sentido da corrente elétrica durante as revoluções. Nos motores elétricos sem escova os papéis são invertidos e enquanto as bobinas encontram-se no estator, os ímãs permanentes são posicionados no rotor. As bobinas são energizadas sequencialmente de forma a induzir o movimento do rotor também através da força eletromagnética.

Para a aplicação de rastreadores solares é conveniente que esses atuadores possuam alguma espécie de controle do ângulo de rotação, essa característica além de aumentar a precisão do posicionamento, também facilita a sua leitura. Entre os componentes com essa característica destacam-se os motores de passo e os servo motores.

Os Servo Motores são constituídos por um motor elétrico de corrente contínua escovado, um sensor de posição, um circuito de controle que normalmente utiliza o protocolo PPM (modulação por posição de pulso) e engrenagens para aumentar seu torque. Sua conexão é feita através de três cabos sendo um o sinal de controle e os outros dois a fonte elétrica de corrente contínua. O circuito de controle é responsável por receber o sinal e a posição do eixo e em seguida acionar o motor no sentido necessário para rotacioná-lo na posição desejada. É importante salientar que o circuito de controle também pode efetuar a leitura dos sensores sem que haja nenhum comando de movimentação, apenas com a finalidade de saber qual a posição em que o motor se encontra. Apesar de apresentar um controle preciso do ângulo de posicionamento esse componente geralmente é limitado a uma liberdade de 180 graus de rotação. Os servo motores não apresentam capacidade elevada de torque, porém são leves e de baixa complexidade. A Figura 32 ilustra todas as partes desse componente.



*Figura 32: Componentes de um servo motor.
(UNESP)*

Os motores de passo são peças muito mais robustas, não possuem escovas e podem ser unipolares ou bipolares. Um motor de passo unipolar tem dois enrolamentos por fase, um para cada sentido da corrente. Os motores bipolares têm um único enrolamento por fase, fazendo uma melhor utilização dos enrolamentos já que há sempre duas bobinas atuando no rotor ao mesmo tempo, conferindo maior torque. São dotados de uma capacidade de torque elevada, possuem liberdade de rotação de 360 graus e alta precisão de posicionamento. Os 'drivers' acionam as bobinas com a intensidade de corrente necessária para o posicionamento adequado. São componentes pesados e possuem certa complexidade de utilização. As Figuras 33 e 34 apresentam as características construtivas desses motores bem como um 'driver' bastante utilizado no seu acionamento.



Figura 33: Driver para motor de passo ULN2003. (AUTOCORE)

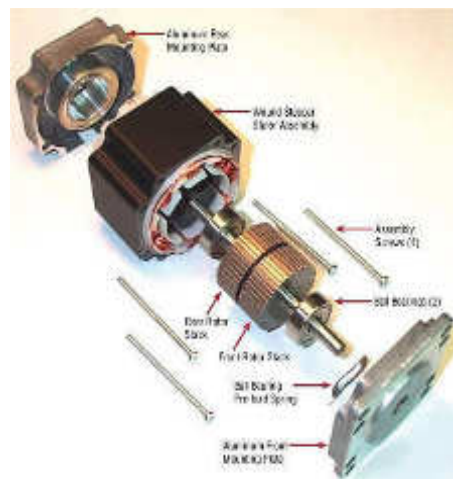


Figura 34: Características construtivas de um motor de passo. (AUTOCORE)

2.5.2.4 Processador

O componente que melhor desempenha a função de processamento é o microcontrolador que é capaz de realizar funções programáveis que necessitariam de um circuito complexo e com um grande número de componentes para desempenhar a mesma tarefa. As linguagens de programação mais utilizadas são as linguagem C e Assembly e é comum encontrarmos esses componentes em aplicações de automação residencial e industrial. O microcontrolador é um circuito integrado que possui internamente uma CPU (unidade central de processamento) e todos os periféricos essenciais para o seu

funcionamento. Os microcontroladores são classificados em famílias, podendo ser fabricados com diferentes arquiteturas, operar em diferentes frequências e serem integrados com diferentes periféricos, dependendo da aplicação para qual foram designados. A Figura 35 apresenta um microcontrolador muito popular na década de 90 fabricado pela Intel, uma das principais fabricantes desse tipo de componente.



Figura 35: Intel 8051. (WIKIPEDIA 8051)

A CPU normalmente opera com barramentos de 8, 16 ou 32 bits e é formada por uma unidade lógica aritmética (ULA), uma unidade de controle (UL), uma Unidade de gerenciamento de memória (MMU) e os registradores. Os periféricos essenciais para seu funcionamento, são a memória de programa e a memória de dados. A memória de programa é responsável por armazenar as instruções que o microcontrolador deve executar, deve ser apagável e de somente leitura. Atualmente o tipo FLASH é o mais utilizado em uma recente substituição aos tipos ROM e EPROM populares até a década de 90. A memória de dados mais utilizada é a do tipo RAM (memória de acesso randômico) que tem por função armazenar as informações de dados utilizadas pelo programa. Essas memórias são voláteis, portanto não preservam o seu conteúdo quando retirada a fonte de alimentação. É comum que os microcontroladores tragam incorporados ao seu chip outros periféricos como dispositivos de seleção de entrada e saída, contadores e temporizadores, dispositivo de controle de interrupção, gerador de 'Clock', Conversores Analógico-digital, entre outros.

2.6 Arduino

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de placa única desenvolvida na Itália a partir do ano de 2005 com o intuito de popularizar o aprendizado em escolas. Possui licença de hardware livre, isto é, seu projeto pode ser encontrado em detalhes (incluindo diagramas, 'layout' e rotinas de baixo nível) possibilitando sua confecção por qualquer empresa ou pessoa, pulverizando sua produção. Projetada com um microcontrolador Atmel AVR, a plataforma oferece muitos recursos que visam descomplicar a criação de projetos, entre eles:

1. Todos os componentes necessários para o funcionamento adequado do microcontrolador bem como vias de acesso a todos os seus pinos periféricos;
2. Entrada para alimentação e reguladores de voltagem adequados;
3. Suporte de entrada e saída (I/O) analógica e digitais embutido;
4. Linhas de comunicação serial para interface com outros dispositivos;
5. Interface USB para conexão com o computador.
6. Ambiente de desenvolvimento e linguagem de programação padrão;

Dependendo do modelo da placa utilizado é possível encontrar quantidades diferentes de entradas e saídas e variados tipos de periféricos incorporados. Os diversos tipos de placas Arduino encontradas comercialmente são mostradas na Figura 36. As funcionalidades que não encontram-se incorporadas à plataforma podem ainda serem implementadas através de placas de expansão também chamadas de 'shields'. A seguir será discutido em detalhe a placa Arduino UNO, uma das mais populares da família bem como as placas de expansão.

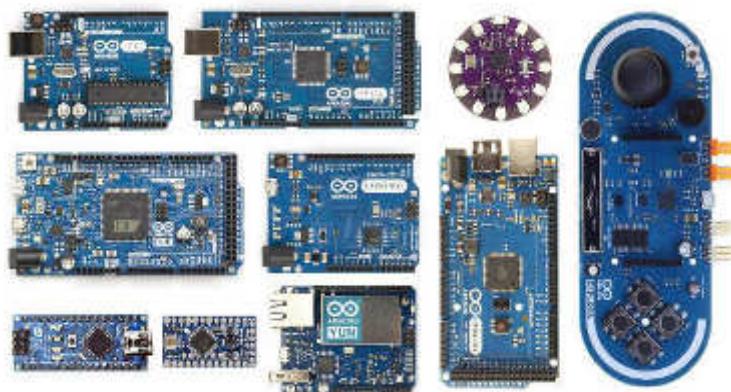


Figura 36: Placas da família Arduino. (FILIFEFLOP)

2.6.1 Arduino UNO Rev. 3

O Arduino Uno Revisão 3, é uma placa de prototipagem eletrônica baseada no ATmega328. Dispõe de acesso a todos os pinos do microcontrolador, um ressonador cerâmico de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, programação ICSP (In-Circuit Serial Programming) e um botão de reset. Além disso está integrada à plataforma um microprocessador Atmega16U2 programado para desempenhar a função de conversor USB-Serial responsável pela conexão com o computador. O Arduino Uno pode ser alimentado através da ligação USB ou com uma fonte de alimentação externa. A fonte de alimentação é selecionada automaticamente e o intervalo recomendado é de 7 a 12 volts. A Figura 37 traz uma ilustração tridimensional da placa.

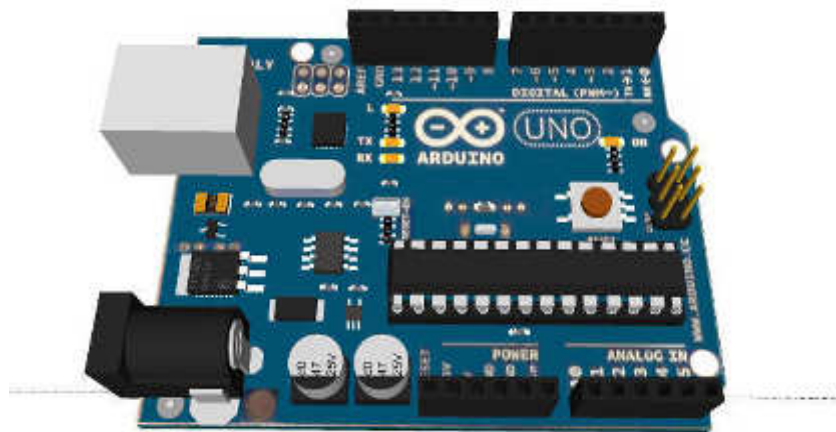


Figura 37: Arduino UNO.(ENGINEER ZERO)

Todas as funcionalidades embutidas na plataforma, sejam entradas e saídas (analogicas ou digitais), periféricos e protocolos de comunicação estão implementadas no hardware do microcontrolador Atmel328 e são acessadas por bibliotecas previamente desenvolvidas e amplamente testadas. A plataforma possui um ambiente de desenvolvimento integrado que facilita o uso dessas funcionalidades. Para as funcionalidades que não estão contempladas no Atmel328, a plataforma desenvolveu um sistema modular de expansão que foi denominado de Escudos (do inglês Shields). A seguir será discutido cada uma das funcionalidades embutidas no microcontrolador, como é feito o acesso através da placa, o sistema de Escudos para expansão das funcionalidades, o ambiente de desenvolvimento e bibliotecas.

2.6.2 Atmega328

O Atmega328 é um microcontrolador da Atmel, de 8bits, com arquitetura Harvard modificada, pertencente à família AVR e com tecnologia RISC. Nessa arquitetura, a CPU é ligada às memórias de programas e de dados por barramentos diferentes, possibilitando a busca e execução simultânea de instruções. A memória de programas tem capacidade de 32 KB e é do tipo FLASH, enquanto a capacidade da memória de dados é de 2 KB, do tipo SRAM. Como outros microcontroladores AVR, o ATmega328 possui ainda uma memória do tipo EEPROM (1 KB), porém esta memória está ligada na via de conexão aos periféricos e portanto não é acessada pelas instruções normais de acesso a memória. A Figura 38 apresenta o diagrama de blocos dessa arquitetura. Esse microcontrolador possui ainda uma CPU AVR do tipo "enhanced core", e através dos seus 28 pinos disponibiliza portas de Entrada/Saída digital (PORT B, C e D), três timers (TCx, dois de 8 bits e um de 16 bits), um conversor A/D, um comparador analógico e as interfaces seriais SPI, TWI (compatível com I2C) e USART (ATMEGA328). O diagrama de pinos, mostrado na Figura 39, localiza cada uma das funcionalidades disponibilizadas e que serão discutidos a seguir.

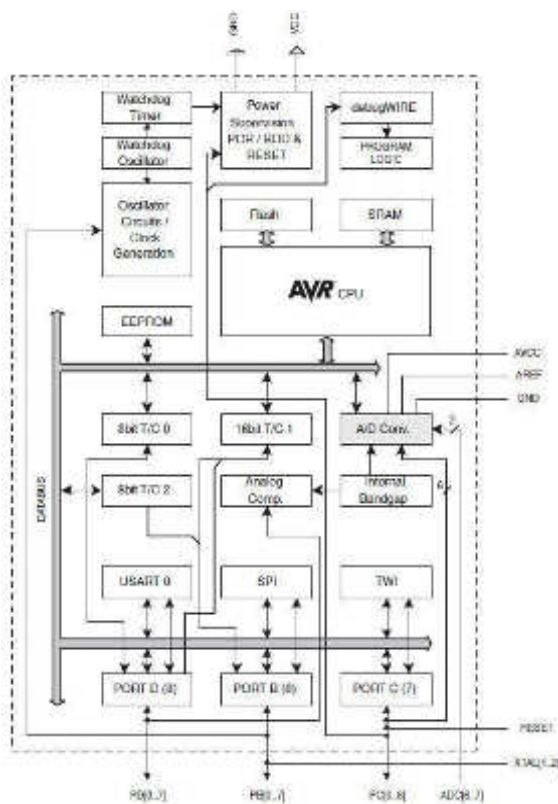


Figura 38: Arquitetura Atmega328.
(ATMEGA328)

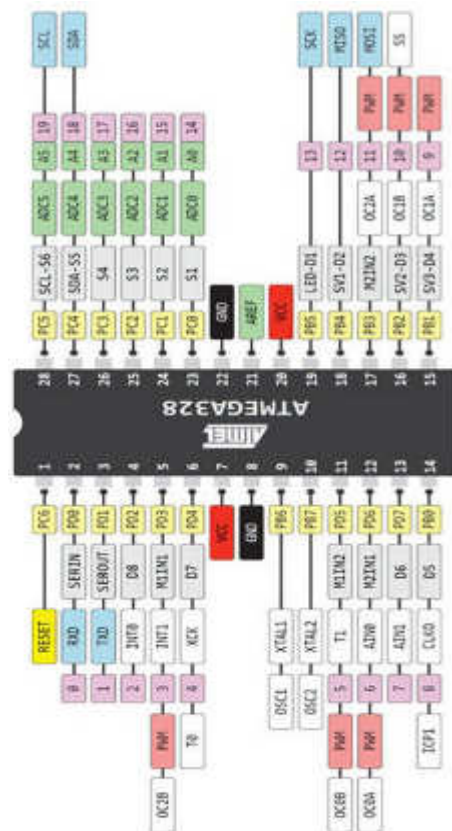


Figura 39: Atmega 328 diagrama de pinos.(SOUZA, 2013)

2.6.2.1 CPU

A principal função da CPU é garantir a correta execução do programa. Para tal, é necessário acessar as memórias, realizar cálculos, controlar os periféricos e administrar interrupções. A CPU AVR utiliza a tecnologia RISC para criar instruções de baixa complexidade e aumentar a eficiência do processamento. O processamento foi otimizado para a linguagem C e seu compilador foi desenvolvido em conjunto com o hardware eliminando gargalos e possibilitando códigos enxutos. Uma alta performance aliada a um baixo consumo de energia. A CPU da família AVR possui uma generosa coleção de 32 registradores de uso geral, todos de 8 bits. Esses registradores armazenam dados dinâmicos dentro da própria CPU, eliminando a necessidade de acessar a memória SRAM apenas para salvar algum dado e depois acessá-la novamente após alguns ciclos de máquina para recuperá-lo. Essa prática além de economizar energia também confere um processamento mais rápido pois permite a CPU ler, executar e armazenar novamente o conteúdo de um registrador em um único ciclo de máquina. Os seis últimos registradores podem ser usados aos pares como três registradores de 16 bits (X, Y e Z) para endereçamento indireto da memória. (QUADROS, PARTE 2)

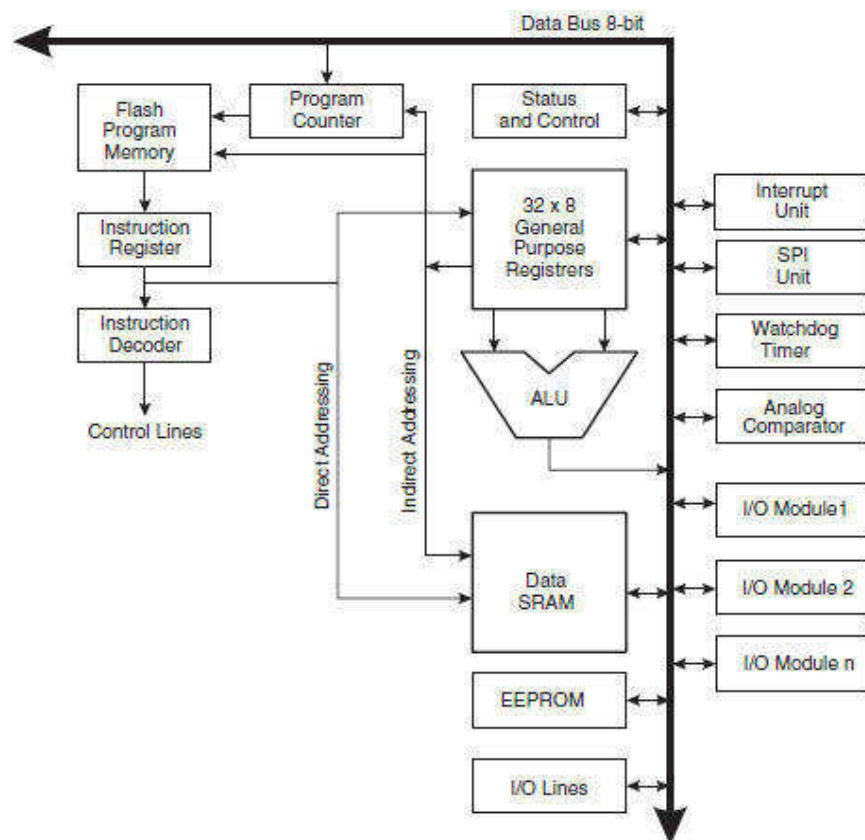


Figura 40: Diagrama de blocos de uma CPU AVR.(ATMEGA328)

A Unidade Lógica Aritmética (ALU) trabalha com 8 bits em conexão direta com os registradores e suporta operações lógicas e aritméticas entre dois registradores ou entre um registrador e uma constante. Todas as operações lógicas e aritméticas são executadas em um ciclo, exceto pela multiplicação que demora dois ciclos. Após uma operação aritmética o registrador de Status é atualizado. A Figura 40 apresenta o diagrama de blocos da CPU AVR

2.6.2.2 Entradas analógicas

O Uno tem 6 entradas ligadas a um conversor A/D, rotuladas de A0 a A5. Esse conversor possui 10 bits de resolução, isso quer dizer que ao receber um valor de tensão pelas portas analógicas, o conversor faz uma amostragem discreta e retorna um valor de 0 a 1024 que representa o valor da entrada. Esse conversor aceita uma tensão de entrada compreendida entre 0 e 5 volts, que corresponderia os valores 0 e 1024, respectivamente. Existem três opções de referência: a tensão de alimentação, uma referência interna de 1,1V ou uma tensão externa (fornecida no pino Aref). As entradas analógicas são utilizadas para leitura de sensores, e conexão com componentes analógicos e para a implementação da interface TWI.

2.6.2.3 TWI

O módulo TWI (Two Wire Interface) implementa o padrão I2C, uma forma de comunicação que utiliza apenas dois sinais (SDA e SCL) para interligar em "varal" múltiplos mestres e escravos. Entre os seus recursos, está o de conferir automaticamente o endereço, reduzindo o trabalho do software. Os pinos A4 (SDA) e A5 (SCL) são utilizados para essa implementação.

2.6.2.4 Entradas e Saídas Digitais

Cada um dos 14 pinos digitais do Arduino UNO pode ser usado tanto como entrada quanto como saída. Eles operam a uma tensão de 5 volts e podem prover ou receber um máximo de 40 mA. Todos os pinos E/S digital possuem um resistor de pull-up (também controlado independentemente) e diodos de proteção. Os pinos D3, D5, D6, D9, D10, e D11 podem fornecer saída PWM (Pulse Width Modulation)

de 8 bits, essenciais para aplicações RF (Rádio Frequência). A maioria dos pinos de E/S digital possuem ainda funções especializadas como o controle de interrupções externas e a implementação de protocolos USART e SPI.

2.6.2.5 Interrupções externas

Os pinos D2 e D3 podem ser configurados para disparar uma interrupção por um valor baixo, uma borda de subida ou queda, ou uma mudança de valor. É possível controlar a geração de interrupção pino a pino e ela independe do pino ter sido configurado como entrada ou saída.

2.6.2.6 USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*)

A USART, mais conhecida como comunicação serial, é extremamente flexível e opera em bidirecional, com 5 a 9 bits de dados, 1 ou 2 bits de parada e geração/detecção de paridade. Possui capacidade para detecção de erros de overrun (caracteres perdidos por lentidão) e framing (caracteres com formato inválido). Permite a geração de interrupções de recepção de caractere, pronto para transmitir e final da transmissão. No Arduino UNO os pinos D0 (RX) e D1 (TX) são utilizados para a comunicação dos dados em série, inclusive para o carregamento de programas. Para tanto, estes pinos são ligados aos pinos correspondentes do ATmega8U2 USB-TTL chip serial.

2.6.2.7 SPI

A comunicação SPI utiliza quatro fios (MISO, MOSI, SCLK e SS) para comunicação serial full-duplex de alta velocidade entre um mestre e vários escravos, diferentemente da USART que permite apenas um mestre e um escravo. Capaz de operar tanto em modo mestre como escravo o UNO utiliza os pinos D10 (SS), D11 (MOSI), D12 (MISO) e D13 (SCK) para implementação desse protocolo de comunicação.

2.6.2.8 LED embutido, Reset , Aref e pinos de energia

O pino digital D13 possui um LED associado que acende quando a E/S digital correspondente se encontra em nível lógico alto e apaga quando está em nível lógico baixo. O pino Reset reinicializa o microcontrolador quando colocado em nível baixo e o Aref fornece uma nova tensão de referência para o conversor A/D (desde que seja respeitado o limite de 5 volts). Os pinos de energia são os seguintes:

- VIN: A tensão de entrada para a placa Arduino quando está sendo alimentada por uma fonte externa. É possível tanto fornecer quanto acessar a tensão de alimentação através desse pino.
- 5V: Este pino produz um 5V regulado por um regulador de tensão.
- 3V3: A alimentação de 3,3V gerada pelo regulador.
- GND: Pinos de terra.
- IOREF: Este pino fornece a tensão de referência com o qual o microcontrolador opera.

2.6.3 Shields

Os Shields são placas de circuito que se encaixam perfeitamente à plataforma Arduino expandindo suas funcionalidades. Geralmente trocam dados com a placa principal através do módulo SPI, no modo escravo, deixando de ocupar entradas e saídas adicionais.

Essas placas conferem uma enorme versatilidade e modularidade para a plataforma. O potencial de funcionalidades disponibilizadas pelos Shields é muito amplo e existe hardware para atender as aplicações mais robustas como por exemplo: posicionamento através de GPS, comunicação via rede GPRS (telefonia) ou Ethernet, interface com uma memória SD, acesso à data e hora através de um chip RTC (Real Time Clock), comunicação Bluetooth, etc. Os Shields ainda podem ser literalmente empilhados uns sobre os outros de forma a incrementar suas funcionalidades. A Figura 41 ilustra esse conceito demonstrando como seria a conexão entre dois Shields e uma placa Arduino UNO.



Figura 41: Modularidade e versatilidade da plataforma através dos Shields

2.6.4 Programação e bibliotecas

O ambiente integrado de desenvolvimento (IDE) para a programação da plataforma é distribuído gratuitamente e também pode ser modificado sob a licença de software livre e a linguagem de programação utilizada chama-se Wiring que é uma adaptação da linguagem C/C++ para a plataforma. Quando se trata de usar os periféricos disponíveis ou na hora de utilizar os protocolos de comunicação para expandir funcionalidades através dos Shields, os códigos de baixíssimo nível, como geração de ondas em formatos específicos, palavras e endereços hexadecimais, raramente precisam ser programados. Para isso, existem bibliotecas que são nativas ou podem ser incorporadas ao código que entregam os valores através de funções com uma sintaxe de mais alto nível. Todas as funcionalidades do Atmega328 possuem bibliotecas nativas e por ser uma plataforma aberta as contribuições são massivas de uma comunidade que cresce a cada dia.

2.6.5 Bootloader

Uma vez que todo software a ser executado no AVR precisa estar na Flash, o programa feito na IDE do Arduino (sketch) precisa ser gravado lá. Para dispensar o uso de um gravador externo, a gravação da Flash é feita por um software que reside na própria memória, o Bootloader. O Bootloader é o primeiro software executado pelo microcontrolador após um Reset (Boot) e carrega na Flash um software que recebe esteja disponível via serial (loader).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos conceitos apresentados, foi construído um rastreador solar microcontrolado utilizando-se de sensores fotoelétricos. O rastreador foi acoplado a um painel fotovoltaico de bancada e submetido a ensaios de performance. Como foi visto, a função primordial desse dispositivo é minimizar o ângulo de incidência entre os raios solares e o painel, garantindo melhor aproveitamento da radiação solar, e armazenar os dados de posicionamento e potência entregue pelo painel para uma avaliação futura. O protótipo foi construído usando um suporte pan/tilt, uma base de GPS para carro, quatro sensores LDR, dois servo motores e uma placa Arduino UNO expandida com um Datalogger Shield. A seguir serão descritos cada um desses itens utilizados.

3.1 Painel fotovoltaico

Para conduzir os ensaios foi utilizado um modelo de painel fotovoltaico de silício monocristalino da marca DFRobot como os que podem ser vistos na Figura 42. As características referentes à performance elétrica do painel, fornecidas pelo fabricante e apresentadas na Tabela 1 foram medidas em condições padrão: intensidade luminosa de 1000W/m², espectro AM1.5 e temperatura da célula de 25°C.



Figura 42: Painel solar DFRobot 9v 220mA

Potência nominal	2Wp
Voltagem operacional:	9V
Corrente operacional:	220 mA
Voltagem em circuito aberto:	9,6 V
Corrente de curto:	500 mA
Temperatura operacional:	40 a 80
Tamanho:	135mm X 125mm
Peso:	250g
Eficiência:	16%

Tabela 5: Especificações técnicas do painel

3.2 Suportes

Duas estruturas foram utilizadas como suporte mecânico para o protótipo. Para oferecer sustentação ao painel fotovoltaico e ao mesmo tempo movimento nos dois eixos necessários (azimutal e de inclinação), usou-se um suporte (PAN/TILT) de câmera de vigilância acoplado aos dois servomotores. Essa peça foi denominada suporte do painel e pode ser visto em detalhe na Figuras 44 e 43.



Figura 43: Suporte Pan/Tilt e servo motores



Figura 44: Suporte Pan Tilt desmontado

Para a sustentação principal, foi usado um suporte veicular para GPS que possui uma ventosa em sua base, que garante uma excelente fixação e uma superfície adequada na parte superior para a fixação do suporte do painel, inclusive com um encaixe articulado que possibilitou um ajuste dos ângulos iniciais do sistema.



Figura 45: Suporte principal do sistema

3.3 Sensores

Os sensores escolhidos foram LDRs de 7mm. Esses componentes apresentam resistência elétrica de algumas centenas de Ohms quando expostos a forte radiação luminosa e aproximadamente 1 M Ω na ausência de luz. Devido a essas características foram escolhidas resistências de 470 Ω para compor o divisor de tensão.



Figura 46: LDR 7 MM

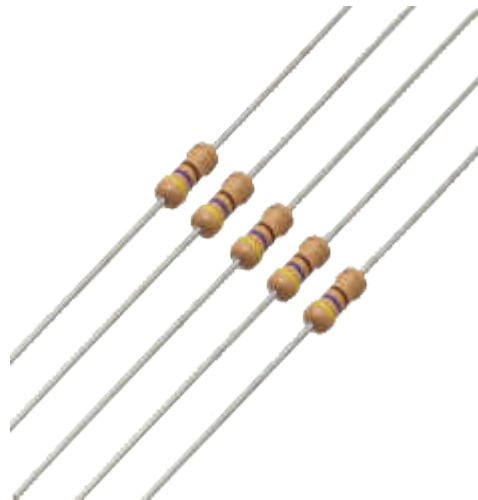


Figura 47: Resistores de 470 Ω

3.4 Atuadores

Para o posicionamento do painel, foram usados dois servo motores, um para o posicionamento da inclinação e outro para o posicionamento do azimute da placa. Foram escolhidos o modelo SG90 da marca TowerPro semelhantes ao da Figura 48. Esse componente se mostrou adequado, apesar da sua limitada liberdade de rotação, pois ao orientar o sistema com a face para o norte, o máximo ângulo entre o sol nascente e o sol poente é de aproximadamente 180 graus. Além disso o SG90 atende ao torque mínimo necessário para movimentar o painel utilizado, possui uma tensão de operação compatível com a plataforma utilizada e confere uma relativa simplicidade ao sistema comparada com as outras opções viáveis (como motores de passo, por exemplo). A manipulação desse componente é feita através da biblioteca <Servo.h>. Essa biblioteca permite tanto a escrita quanto a leitura do ângulo de posicionamento e o passo mínimo de movimentação é de um grau. As especificações estão na Tabela 2.



Figura 48: Micro Servo SG90 TowerPro

Peso:	9g
Tamanho:	22.2 x 11.8 x 31 mm
Torque:	1.8 kgf·cm
Velocidade:	0.1 s/60 grau
Tensão de operação:	4.8 V (~5V)
Intervalo mínimo de comando:	10 μ s
Intervalo de temperatura:	0 °C – 55 °C

Tabela 6: Especificações do Servo motor TowerPro SG9

3.5 Arduino UNO

A plataforma de prototipagem Arduino UNO foi utilizada nesse trabalho desempenhando três principais funções. A primeira função foi a de controlar o rastreador, efetuando a leitura dos sensores e acionando os servomotores para posicionar o painel. A segunda foi a de medir a tensão gerada pelo painel e utilizando as funcionalidades do data logger shield, registrar em uma memória os dados medidos, a posição dos servos motores, a hora e a data. E por fim a de fornecer uma tensão regulada (5 volts) para todos os demais componentes do sistema.

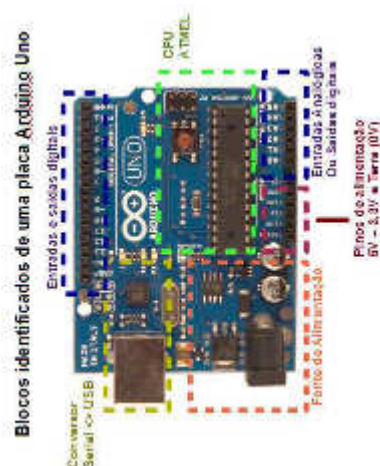


Figura 49: Arduino Uno e pinagem

Microcontrolador::	ATmega328
Voltagem operacional:	5V
Voltagem de alimentação	7-12V
E/S digitais	14 (6 com saída PWM)
Entradas analógicas	6
Corrente contínua por pino	40 mA
Memória Flash	32 KB (ATmega328)
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidade do Clock	16 MHz
Comprimento	68.6 mm
Largura	53.4 mm
Peso	25 g

Tabela 7: Especificações Arduino UNO

3.6 Datal-logger Shield e cartão SD 2Gb

Esse Shield é uma junção de duas importantes funcionalidade quando se trata de fazer um 'datalogger': armazenamento dos dados a serem coletados em uma memória SD e controle de tempo RTC (Real Time Clock) através do chip DS1307. A data e a hora precisam ser configuradas apenas uma vez e a permanência dos dados é garantida através de uma bateria CR. Abaixo segue uma foto do escudo e do cartão de memória utilizado.

Durante os testes observou-se uma incompatibilidade da funcionalidade de RTC da placa e os sensores conectados às entradas analógicas do Arduino. Para contornar esse problema foi implementado um relógio via software usando uma biblioteca <Rclib.h>.

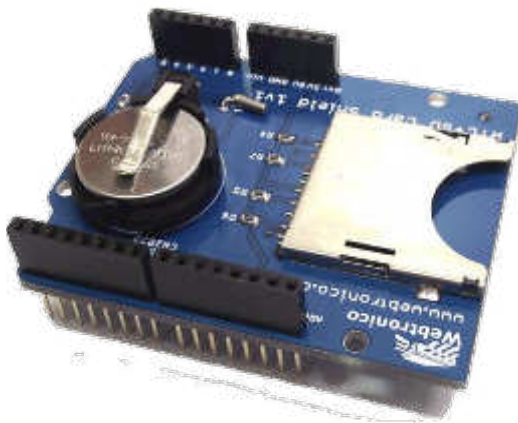


Figura 50: Datalogger Shield



Figura 51: Memória SD com capacidade de 2Gb

3.7 Fonte AC

Para energizar o sistema foi utilizada uma fonte AC 127V convencional com saída de 9V e 1A.

3.8 Plataforma de sensoriamento

Levando em conta o funcionamento de um LDR, que apresenta menor resistência para maior incidência de luz, construiu-se um módulo de sensoriamento capaz de rastrear a posição do sol em um eixo. Esse módulo é constituído por 2 resistores dependentes de luz (LDRs) posicionados lado a lado e ligados em série, cada um, a uma resistência de 470Ω . Entre os sensores foi colocado um septo de forma que em uma situação de desalinhamento com o sol, apenas um dos sensores estaria recebendo maior incidência de radiação enquanto o outro estaria na sombra do anteparo. Antagonicamente, quando o módulo estivesse em um ângulo próximo de 90 graus com o sol ambos os sensores estariam recebendo praticamente a mesma radiação solar. Ambas situações são demonstradas na Figura 52.

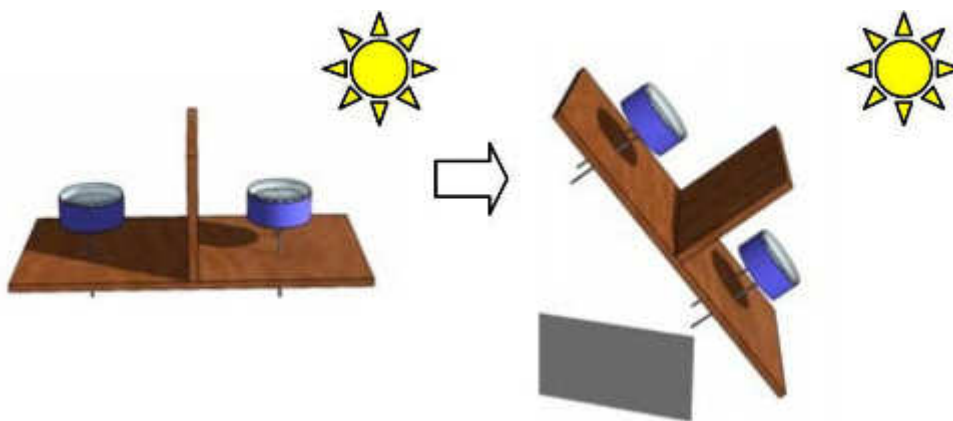


Figura 52: Princípio de rastreamento solar com sensores LDR

O sistema de sensoriamento utilizado é composto por dois módulos como os que foram descritos, dispostos em forma de cruz. A dupla de sensores horizontal ao plano do solo é responsável por 'perceber' o alinhamento do ângulo azimutal enquanto a dupla perpendicular atua sobre a inclinação. As quedas de tensão sofridas pelas resistências em série foram medidas individualmente, pela própria plataforma de controle, de forma que quanto maior fosse essa tensão, maior seria a incidência de radiação sobre o LDR associado a ela. Para a confecção do módulo de sensoriamento utilizou-se uma placa de fenolite ilhada onde foram soldados os quatro sensores LDRs e cada dos seus resistores, associados em série. No centro dos sensores foi fixado um aparato em forma de "X" e instalados seis terminais de conexão com a placa controladora, um para cada sensor e dois para a alimentação. Para facilitar a compreensão, a Figura 53 mostra o esquema do módulo de sensoriamento e a denominação utilizada para cada sensor.

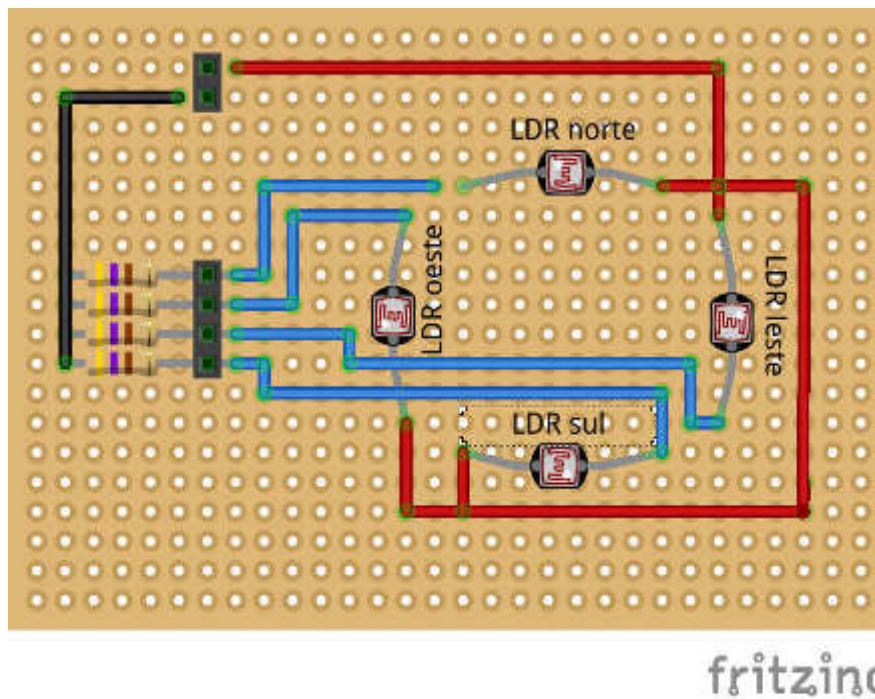


Figura 53: Esquema do módulo de sensoriamento

3.9 Rastreamento solar

Uma vez construído o módulo de sensoriamento, para efetuar o rastreamento é necessário interpretar as informações provenientes atuar de forma satisfatória. Se o princípio desse método de sensoriamento é que cada um dos quatro sensores gerem tensões diferentes em seus terminais, de acordo com a incidência de radiação em sua superfície, estar perpendicular ao sol significa obter medições semelhantes de tensão entre eles. Quando o microcontrolador faz a leitura das tensões dos sensores, o programa é capaz de identificar qual a intensidade da radiação incidente em cada um deles e acionar os motores para igualá-las. A tomada de decisão de qual sentido é necessário rotacionar cada eixo, é baseada na comparação entre as duplas de sensores leste-oeste e norte-sul. Se a leitura do sensor leste for maior que a leitura do sensor oeste, indica que o motor responsável por esse posicionamento deverá rotacionar o sistema no sentido anti-horário e vice-versa. De forma análoga, se a leitura do sensor norte for maior que a leitura do sensor sul, indica que o outro motor deverá inclinar o sistema até que haja leituras semelhantes nos terminais desses sensores. Para efeitos práticos foi definida uma tolerância configurável de discrepância entre as duplas de sensores antes que houvesse acionamento dos motores.

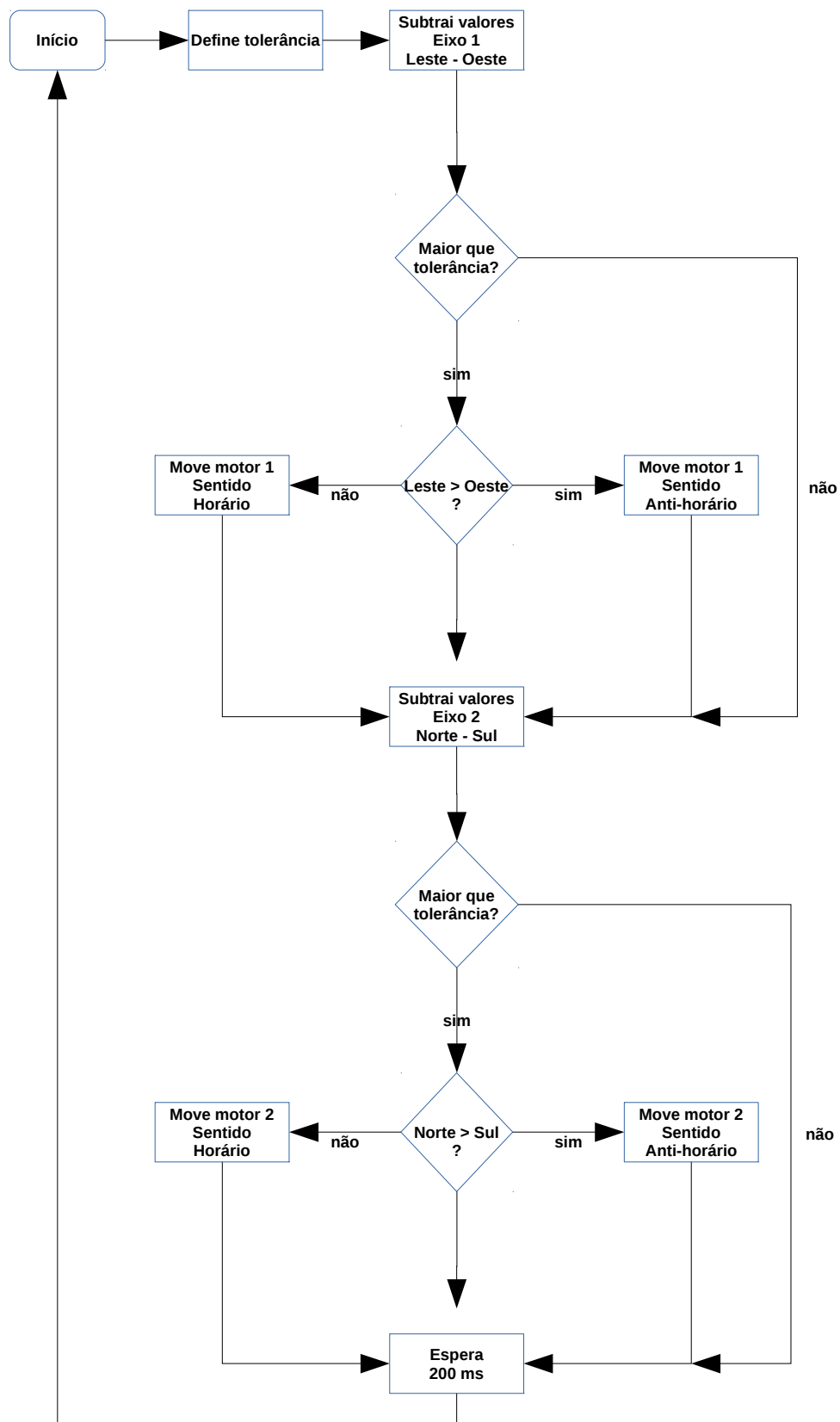


Figura 54: Rotina de rastreamento

3.10 Montagem do sistema

Após reunir todos os componentes iniciou-se o processo de montagem do sistema que será descrito na forma de itens:

1. Para a sustentação do painel acoplado ao suporte do rastreador, foi utilizado fita dupla face de elevada aderência. Os terminais positivo e negativo de saída do painel foram conectados, respectivamente, à entrada analógica A1 e ao terra da plataforma de controle. Já para o painel que permaneceu fixo, foi utilizada uma estrutura de acrílico aproveitada da capa de um DVD. Os terminais positivo e negativo de saída desse painel foram conectados, respectivamente, à entrada analógica A0 e ao terra da plataforma de controle.
2. Como visto anteriormente, a conexão entre a plataforma de sensoriamento e a controladora é feita por seis fios. Quatro para a leitura dos sensores foram conectados às entradas analógicas A2, A3, A4 e A5 e dois para a alimentação conectados aos pinos de terra e 5 volts regulados da placa. Era imprescindível que a fixação do módulo de sensores fosse feita paralela ao plano do painel e de que ambos se movimentassem juntos. Houve também um cuidado para que não houvesse projeção de sombra do módulo no coletor em qualquer posição. Escolheu-se então por fixar os sensores na base da estrutura de acrílico do painel, com uma distância adequada, calculada empiricamente.
3. Os motores foram acoplados em suas devidas posições ao suporte pan/tilt e parafusados para garantir sustentação. Em seguida foram devidamente alimentados pelos pinos de Terra e 5 volts regulados da placa. Seus circuitos de controle foram conectados a placa controladora pelos pinos de saída digital D7 e D8 que receberam os sinais responsáveis pelo posicionamentos da inclinação e do azimute, respectivamente.
4. A instalação do escudo de coleta de dados é feita de forma direta e imediata. As placas literalmente encaixam-se uma na outra e apenas é necessário incluir ao programa as bibliotecas de comunicação e interface com os módulos para utilizar o armazenamento de dados na memória SD.
5. Já com o sistema montado, foram executados testes com os motores que permitiram constatar que para realizar o trabalho necessário para mover o painel o consumo foi de 60mA a 100 mA, já para o estado de inatividade o consumo cai para 5 mA.

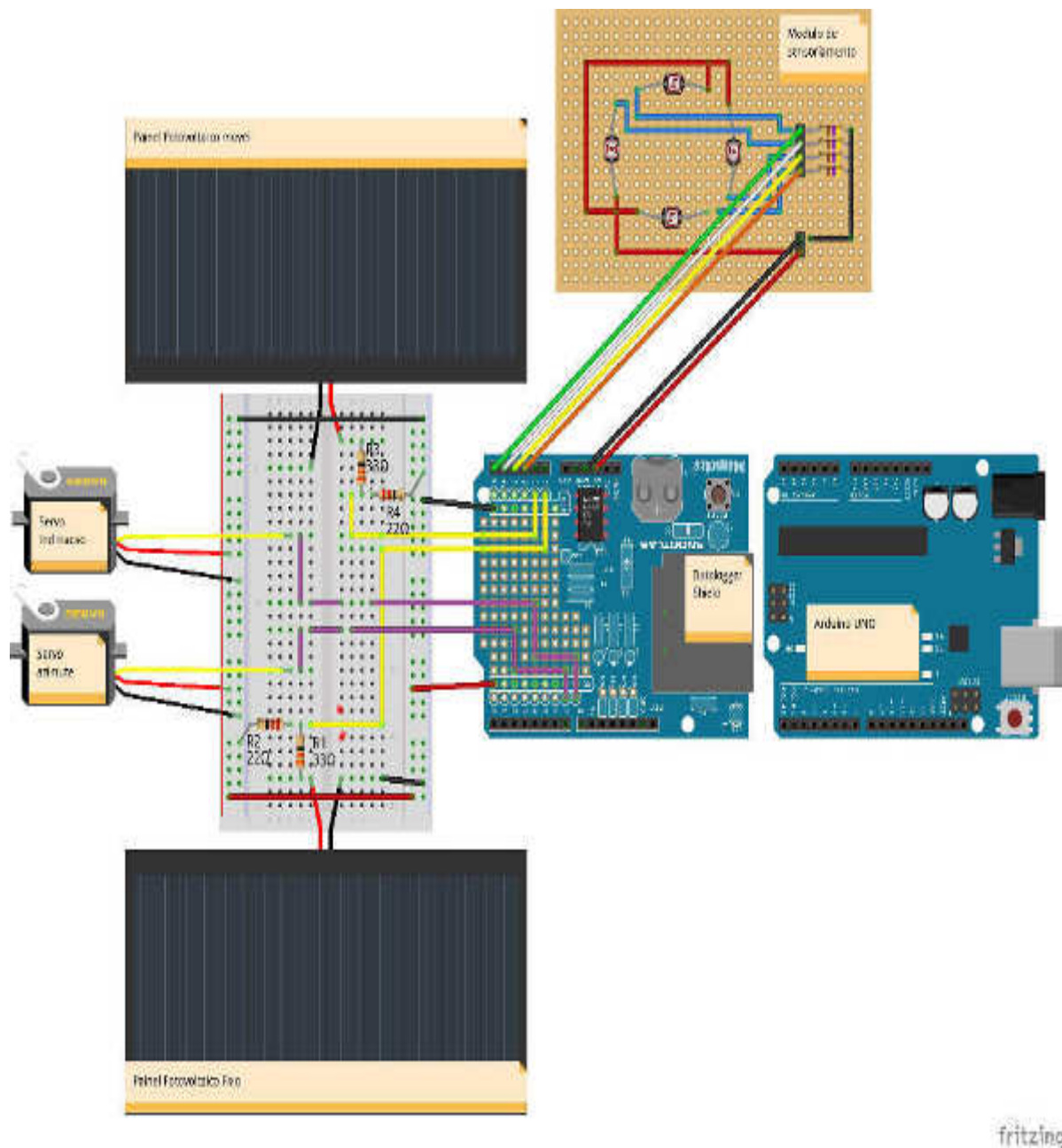


Figura 55: Esquema da montagem do sistema (desenvolvido usando o software Fritzing).

3.11 Procedimento de medição

O procedimento de medição tem como objetivo coletar tanto a tensão de saída do painel fotovoltaico como o ângulo de posicionamentos dos motores para posteriormente possibilitar o cálculo do ângulo de incidência dos raios solares sobre o painel.

3.11.1 Medição da potência do painel

Como foi visto anteriormente, o painel fotovoltaico é uma fonte de corrente e por isso é necessário conectá-lo a uma carga dissipativa e medir sua tensão para em seguida através da Lei de Ohm calcular a potência fornecida. As cargas devem ser cuidadosamente escolhidas para que a tensão aplicada à entrada analógica da placa controladora não exceda o limite de 5 volts limite da placa. Para viabilizar esse método de medição é preciso utilizar um divisor de tensão e fazer as devidas compensações no programa para obter a corrente correspondente gerada pela placa.

3.11.2 Medição de tensões usando a placa Arduino UNO

A medição de tensões usando as entradas analógicas da plataforma é feita através da função `AnalogRead(pin_number)`. Ao executar essa linha de código, que é uma função de uma biblioteca nativa da plataforma, o microcontrolador usa os recursos de conversor A/D para amostrar a tensão disponível no pino programado e retornar um número inteiro correspondente a esse valor. Considerando que o limite da tensão dos pinos de entrada analógica é de 5 volts e que essa tensão representa o valor discreto 1024 (10 bits de resolução), o valor retornado pela função deve ser submetido a uma regra de 3 para que seja descoberta a tensão analógica disponível no pino de entrada correspondente naquele instante. Devido a velocidade em que é efetuada essa operação, podem haver imprecisões de leitura correspondente a espúrios e anomalias no percurso do sinal de entrada. Isso pode ser contornado fazendo-se várias medições sequenciais e extraindo a média aritmética entre elas. Empiricamente foi constatado 100 amostras é um número adequado para uma precisão aceitável, quando comparado com um multímetro. Ainda assim, podem haver imprecisões nas medidas e por isso é necessário realizar uma calibração.

3.11.2.1 Calibração para uma medição precisa de tensões

Com o multímetro mediu-se na saída dos pinos de alimentação a exata tensão fornecida pelo regulador da plataforma quando alimentado com uma fonte estável de 9 volts. O resultado foi 5.015 volts que foi utilizado como o limite de tensão da entrada analógica. Em seguida, usou-se a mesma fonte para alimentar o divisor de tensão utilizado para medir a voltagem do painel. Com o multímetro primeiramente foi medida a tensão da fonte e em seguida a tensão sobre cada um dos resistores de carga. A divisão desses dois valores deve ser usado usado para calcular a corrente fornecida pelo painel.

3.11.3 Medição dos ângulos de posicionamento

A obtenção dos ângulos de posicionamento dos motores é feita de forma direta via código (software) fazendo a leitura dos sensores embutidos nos próprios motores, no entanto para validar essas leituras foi necessária realizar uma calibração individual de cada um deles.

Com o sistema em repouso e com o auxílio de um prumo digital, garantiu-se que o motor responsável pelo movimento de inclinação encontrava-se posicionado em zero graus, ou inclinação nula, de forma que cada passo de um grau do motor correspondesse a um grau de inclinação. Dessa forma, se ao efetuar a leitura do sensor do motor e esse acusar 60 graus, é possível afirmar que o ângulo de inclinação do painel tem o mesmo valor.

Por outro lado, com o auxílio de uma bússola digital apontada para o norte verdadeiro, garantiu-se que o motor responsável pelo azimute do painel encontrava-se na posição de 90 graus. Essa configuração garante que o sistema tenha 90 graus de liberdade para leste e 90 graus de liberdade para oeste, totalizando os 180 graus de liberdade de movimento do servomotor. Dessa forma, a leitura do sensor de posicionamento desse motor deve ser subtraída de 90 para encontrar seu ângulo azimute correspondente (uma leitura de 85 graus corresponderia a 5 graus positivos, ou 5 graus leste enquanto que uma leitura de 95 graus corresponde a um azimute de 5 graus negativos). Os resultados obtidos nesse procedimento deverão ser ajustados para compreender valores entre -180 e 180 graus para que nesse formato possam ser posteriormente utilizados para o cálculo do ângulo de incidência entre os raios e o painel.

3.11.4 Procedimento com um único painel

Esse experimento tem como objetivo apenas analisar a performance do rastreador solar e garantir que a estrutura foi dimensionada adequadamente para suportar um longo período de testes e de constante movimentação. A plataforma controladora foi programada para efetuar o rastreamento do sol e, a cada 5 minutos, utilizando as funcionalidades do escudo de expansão, registrar a hora, os ângulos de posicionamento de cada amostragem e gravar no cartão de memória. Foi acoplado um painel fotovoltaico com características desconhecidas porém com peso e dimensões semelhantes aos que, posteriormente, seriam usados no procedimento com dois painéis solares independentes.

3.11.5 Procedimento com dois painéis solares independentes

Este procedimento mediu simultaneamente as potências entregues ao longo do dia, de dois painéis fotovoltaicos de 9 volts, um acoplado ao sistema de rastreamento e o outro painel de mesmo fabricante e mesma potência que permaneceu fixo. Para esse experimento foram utilizadas cargas dissipativas que foram conectadas às entradas analógicas do controlador e os terminais negativos foram devidamente aterrados. Os valores das resistências escolhidas para compor o divisor de tensão foram de 33Ω e 22Ω de 2 Watts de potência devido a alta dissipação de calor dessa configuração. Com o auxílio de uma bússola digital e um sensor de inclinação, o painel fixo foi posicionado voltado para o norte geográfico e inclinado com relação a horizontal de 23 graus. O microcontrolador foi programado para efetuar o rastreamento do sol a cada cinco minutos, registrar a tensão de saída de ambos os painéis e os ângulos em que se encontravam posicionados os motores de inclinação e azimute, do painel acoplado ao rastreador, no momento da amostragem. Novamente, utilizando as funcionalidades do escudo de expansão grava-se no cartão de memória todos os dados antes de retornar ao início. Para esse procedimento achou-se pertinente registrar as temperaturas de cada painel. As amostras foram feitas a cada aproximadamente 60 minutos de forma manual usando-se termistores e um multímetro.

3.12 Condução dos ensaios

Escolhido um dia em que o céu se apresentou sem nuvens porém admitindo-se que nuvens pudessem sombrear o local do ensaio, foi escolhido um ângulo horário para início de registro das informações de aproximadamente -60 graus (8 da manhã no horário solar). O local da instalação dos painéis fotovoltaicos está abrigado do vento, porém para garantir sustentação adequada ao sistema, a ventosa do suporte principal foi fixada em uma superfície plana e lisa, orientada para o norte verdadeiro com o auxílio de uma bússola digital.

Utilizando a fonte de 9V conectado à rede elétrica, o sistema foi energizado dando início ao experimento. O sistema funciona de forma autônoma e durante o ensaio o registro dos dados de posicionamento e potências foi feito de forma automática, pela plataforma e salvo no cartão de memória. Foram realizadas leituras discretas da temperatura do painel, a cada 1 hora, através de um termistor e um multímetro. Foi escolhido um ângulo horário para término de registro das informações de 60 graus (16h no horário solar).

3.13 Ensaio efetuados e seus resultados

No dia nove de maio de 2015, na cidade de São Paulo (Latitude: -23.5489, Longitude: -46.6388), foi feito um primeiro ensaio com um único painel. Essa data corresponde ao dia 129 do ano e possui, nessa localidade, uma média histórica de irradiância de aproximadamente 3,90kWh/m²*dia, segundo o CRESESB. Os testes foram realizados conforme especificado, por um período de 8 horas (das 8 as 16) aproximadamente. Apesar do dia estar ensolarado, havia uma pequena incidência de nuvens pela manhã. A temperatura média, registrada pelos órgãos de meteorologia foi de 20 graus Celsius. A cada 5 minutos, a posição do painel foi ajustada automaticamente pelo sistema e amostragens dos ângulos de posicionamento foram realizadas e armazenadas, de forma autônoma, no cartão de memória.

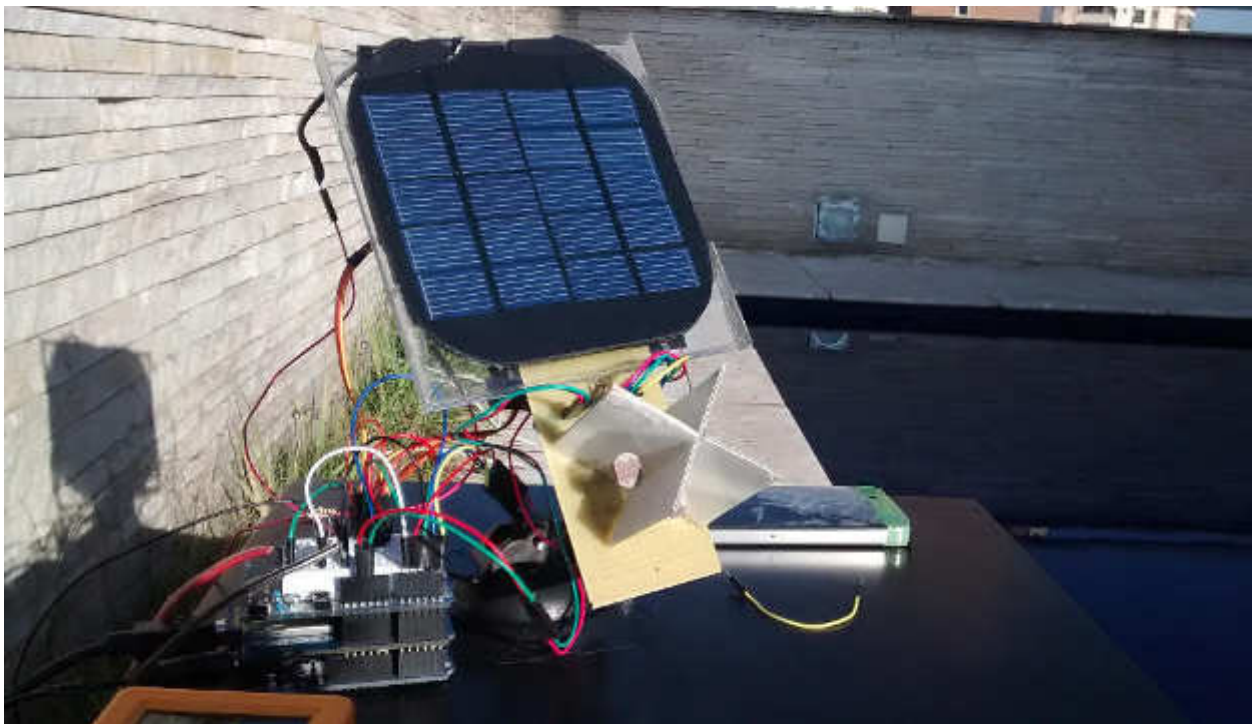


Figura 56: Protótipo 1 no local de testes

Os resultados dos ângulos de inclinação do painel ao longo do dia, junto com os valores teóricos do zênite solar, são apresentados no gráfico da Figura 57. Os dados referentes aos ângulos de azimute do painel, amostrados simultaneamente à inclinação, e do azimute solar teoricamente calculado são exibidos no gráfico da Figura 58. As discrepâncias entre os valores desejados, de inclinação e azimute, e os obtidos estão nos gráficos das Figuras 59 e 60, respectivamente.

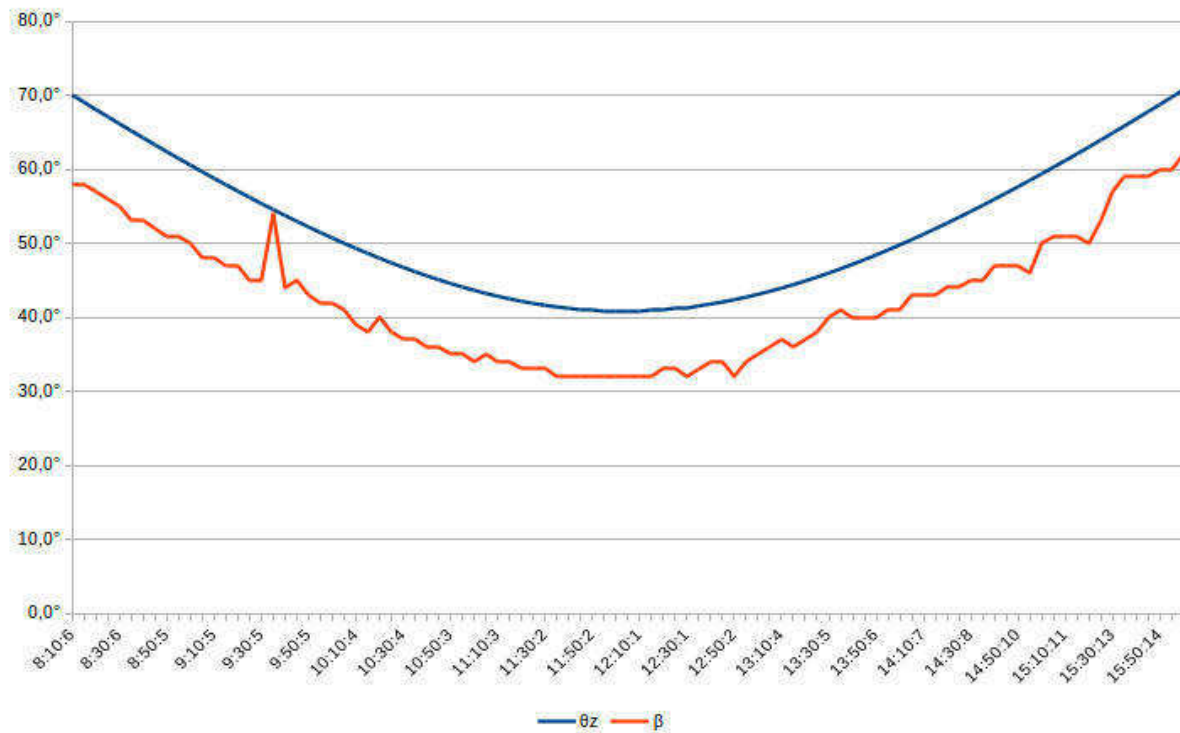


Figura 57: Comparativo entre a variação do ângulo de inclinação da base do painel fotovoltaico e o ângulo zenital solar, ao longo do dia.

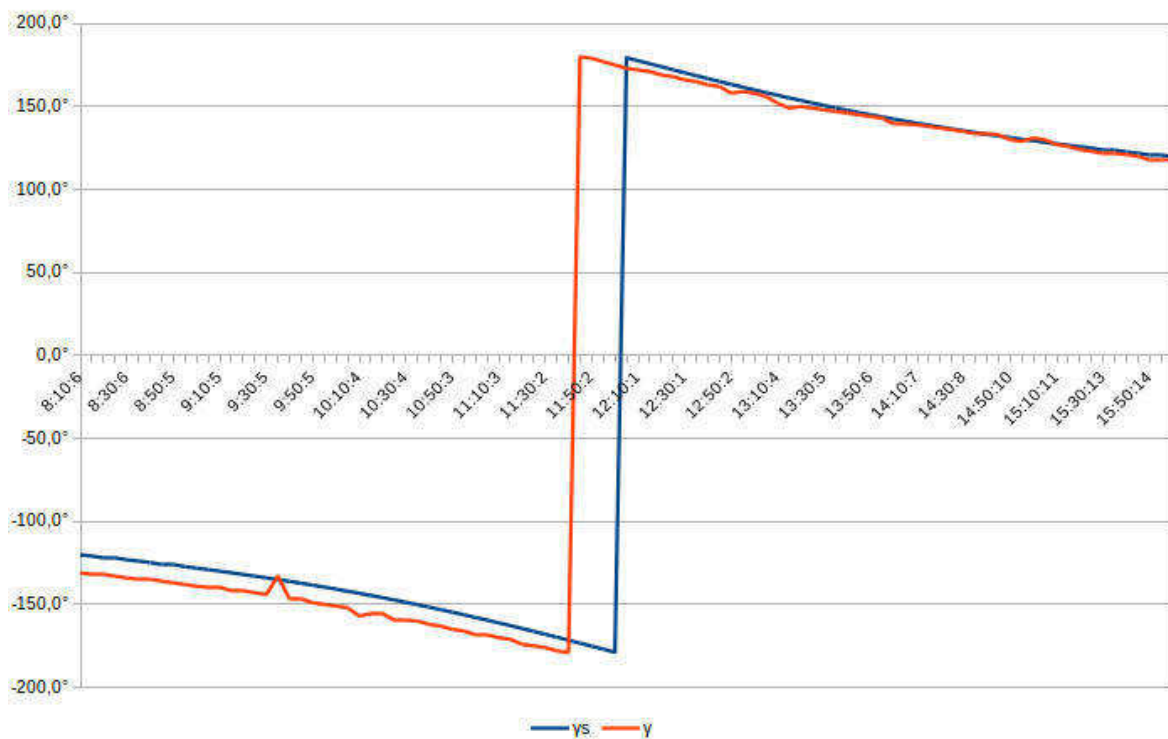


Figura 58: Comparativo entre a variação do ângulo de azimute da base do painel fotovoltaico e o ângulo de azimute solar, ao longo do dia.

Usando os valores dos ângulos de posicionamento obtidos pelo rastreador e baseado nos conceitos apresentados no segundo capítulo, foi calculado o ângulo de incidência entre os raios solares e o coletor tanto para a posição rastreada quanto para a posição fixa. A sobreposição dos dois gráficos gerados a partir desses valores é apresentado na Figura 61.

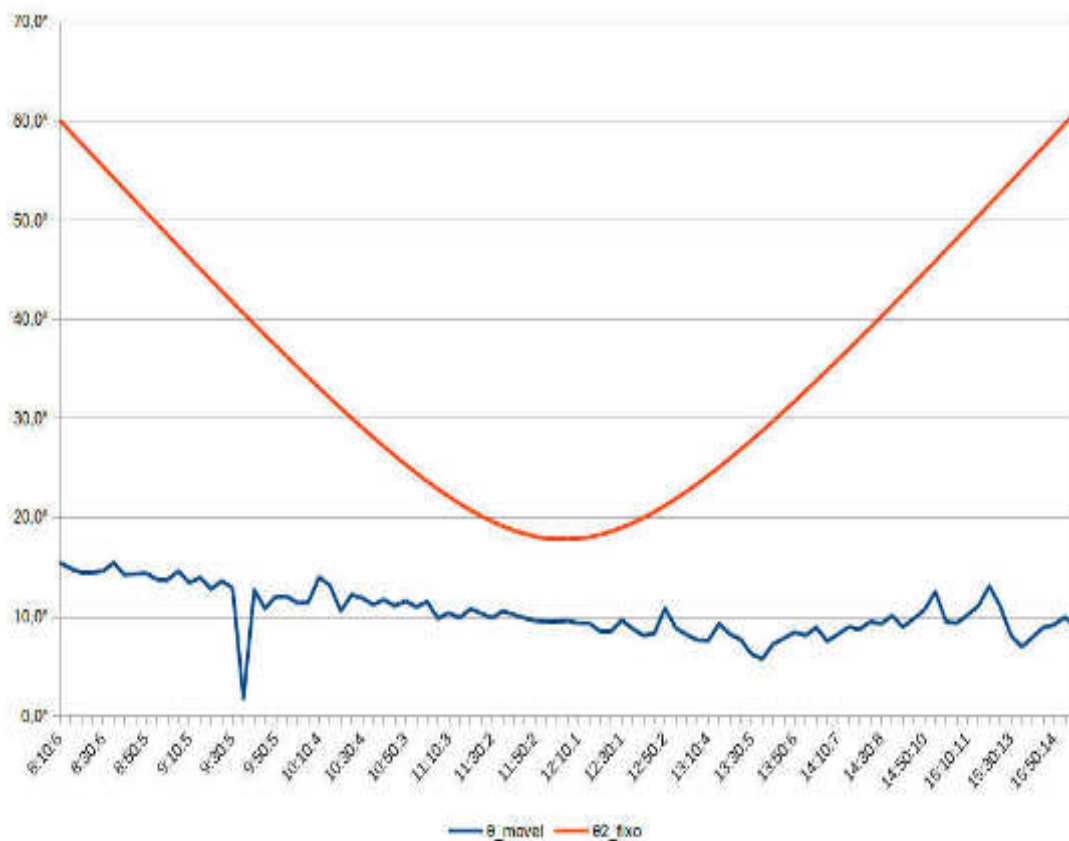


Figura 61: Comparativo entre a variação do ângulo de incidência ao longo do dia para as posições fixa e rastreada

No dia vinte e dois de maio de 2015, na cidade de São Paulo (Latitude: -23.5489, Longitude: -46.6388), foi feito mais um ensaio, porém com dois painéis. Essa data corresponde ao dia 142 do ano e possui, nessa localidade, uma média histórica de irradiância de aproximadamente 3,70kWh/m²*dia, segundo o CRESEB. Os testes foram realizados conforme especificado no procedimento, por um período de 7 horas (das 9 as 16) aproximadamente. Apesar do dia estar ensolarado no início do experimento, houve a incidência de várias nuvens na parte da tarde. A temperatura média registrada foi de 22 graus Celsius, segundo órgãos de meteorologia. A posição do painel foi ajustada constantemente e automaticamente pelo sistema, enquanto as amostragens das potências entregues por cada placa e os ângulos de posicionamento, foram realizadas a cada 5 minutos e armazenadas, de forma autônoma, no cartão de memória.



Figura 62: Protótipo final no local de testes

Os resultados dos ângulos de inclinação do painel que rastreia o sol ao longo do dia, junto com os valores teóricos do ângulo zenital solar, são apresentados no gráfico da Figura 63. Os dados referentes aos ângulos de azimute desse mesmo painel, amostrados simultaneamente à inclinação, e do azimute solar teoricamente calculado são exibidos no gráfico da Figura 64. As discrepâncias entre os valores desejados, de inclinação e azimute, e os obtidos estão nos gráficos das Figuras 65 e 66, respectivamente.

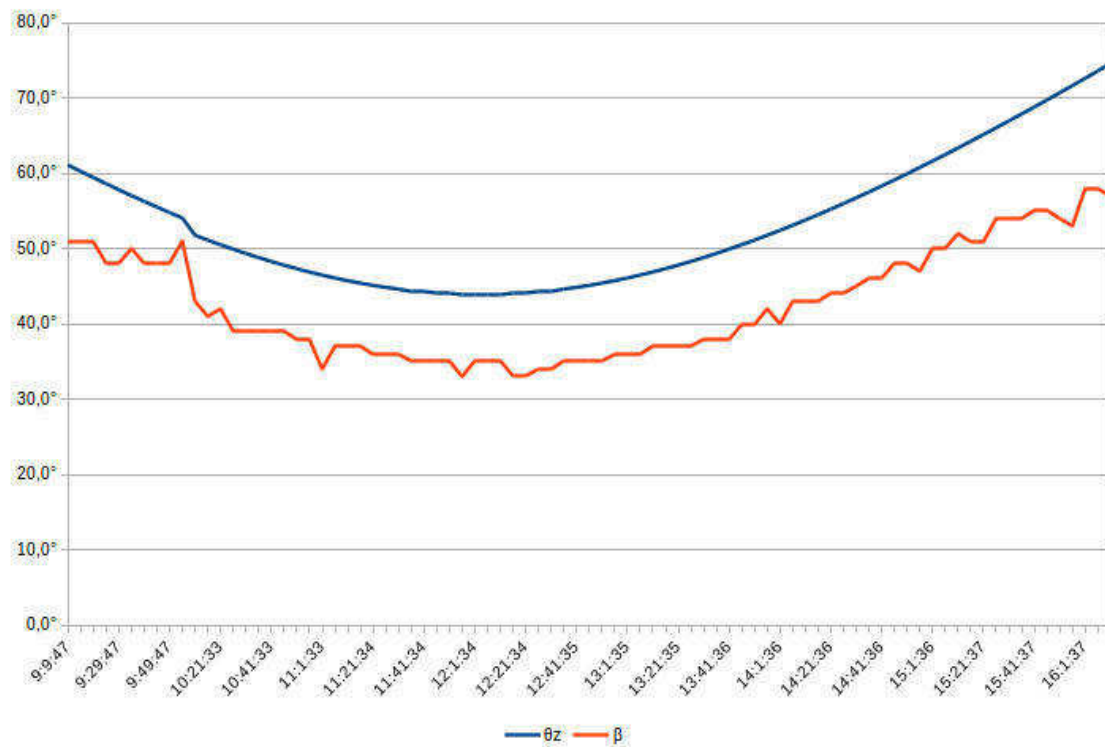


Figura 63: Comparativo entre a variação do ângulo de inclinação da base do painel fotovoltaico e o ângulo zenital, ao longo do dia.

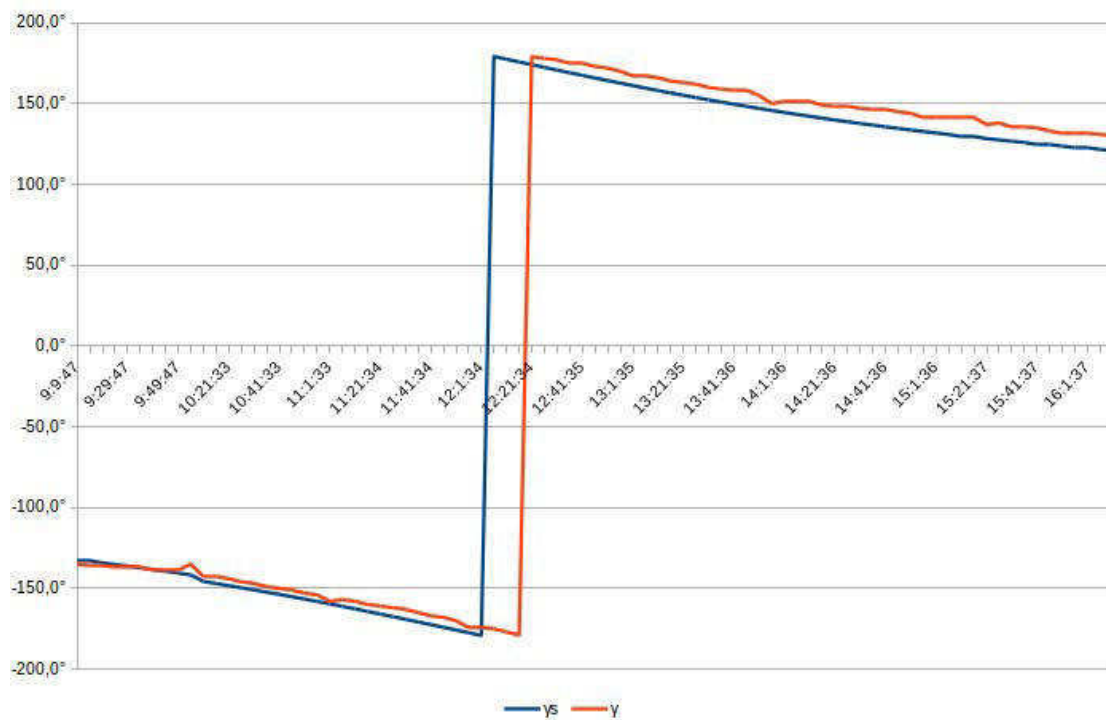


Figura 64: Comparativo entre a variação do ângulo de azimute da base do painel fotovoltaico e o azimute solar, ao longo do dia.

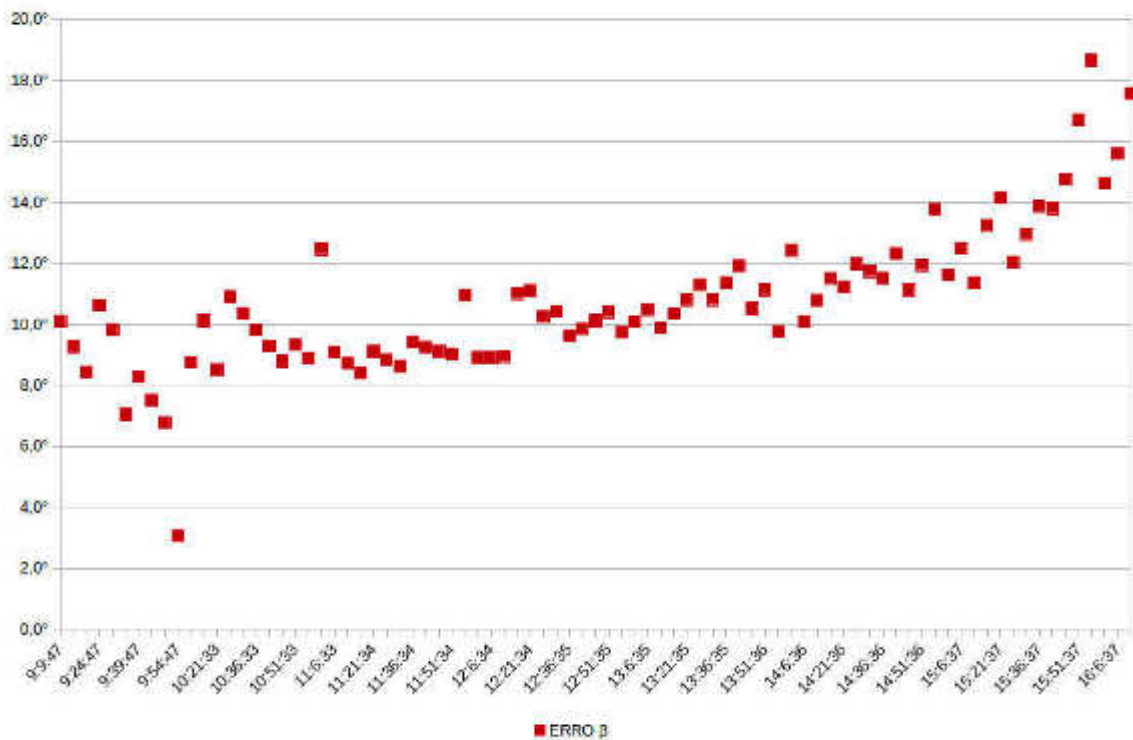


Figura 65: Diferença percentual entre os valores de inclinação medidos e ângulo zenital solar calculado

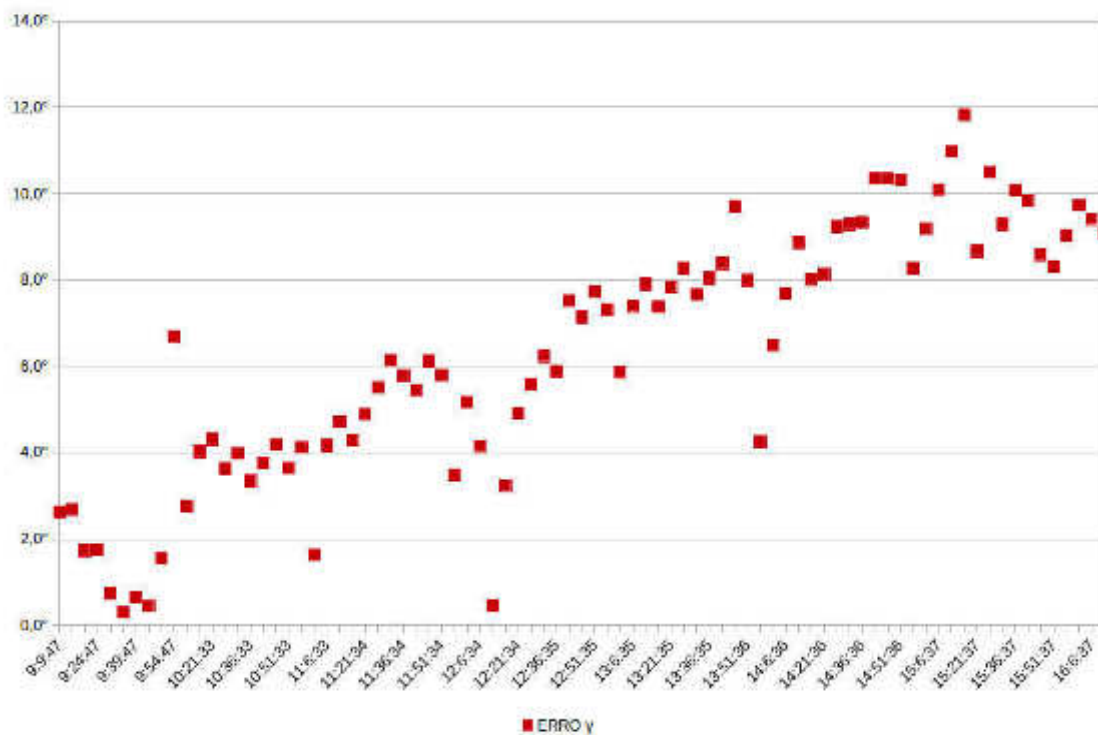


Figura 66: Diferença percentual entre os valores de azimute medidos e o ângulo azimutal solar calculado

Usando os valores dos ângulos de posicionamento obtidos pelo rastreador e baseado nos conceitos apresentados no segundo capítulo, foi calculado o ângulo de incidência entre os raios solares e o coletor tanto para a posição rastreada quanto para a posição fixa. A sobreposição dos dois gráficos gerados a partir desses valores é apresentado na Figura 67.

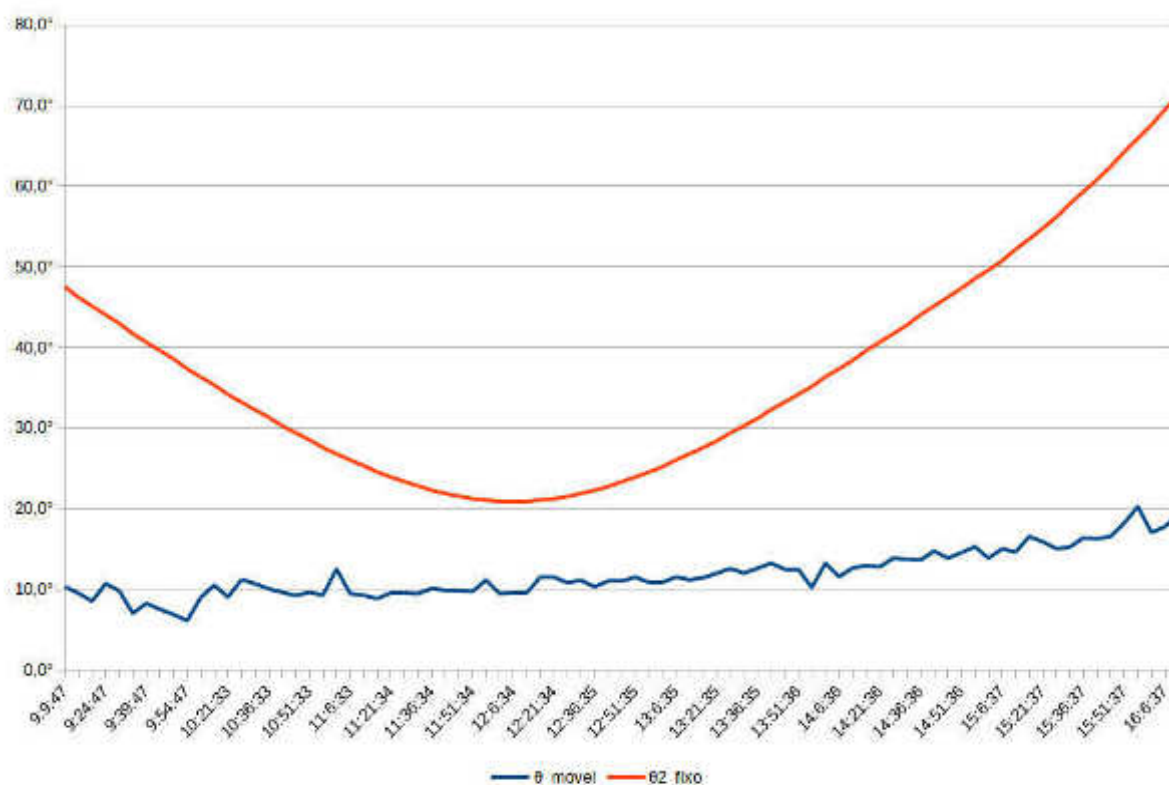


Figura 67: Comparativo entre a variação do ângulo de incidência ao longo do dia para as posições fixa e rastreada

A Figura 68 apresenta o gráfico resultante da sobreposição das potências entregues às cargas dissipativas, de mesmo valor.

A Figura 69 apresenta o gráfico resultante da sobreposição das temperaturas de ambos os painéis, ao longo do tempo.



Figura 68: Comparativo entre a variação da potência entregue a cargas de mesmo valor pelos painéis fotovoltaicos, ao longo do dia.



Figura 69: Comparativo entre as temperaturas dos painéis fixo e móvel ao longo do tempo

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A avaliação dos dados coletados da potência média entregue pelo sistema rastreador e fixo, foram respectivamente de 1,37 e 1,07 Watts, o que permitiu concluir que o painel acoplado ao rastreador apresentou um ganho de potência da ordem de 27%, em média, daquele apresentado pelo sistema fixo inclinado.

Tabela 8: Análise do ganho do sistema de rastreamento sobre o sistema fixo

rastreador		fixo	
Σ Potência:	112,32 [W]	Σ Potência:	88,05 [W]
n_amostras:	82	n_amostras:	82
MÉDIA:	1,37 [W]	MÉDIA:	1,07 [W]
ganho		27,56%	

A diferença entre as potências entregues pelos sistemas é acentuado nas extremidades (início e final do dia) como pode ser observado no gráfico da Figura 69 e praticamente inexistente durante o período em que o sol se encontra com o ângulo zenital máximo. Isso é esperado e acontece porque o posicionamento otimizado fixo visa aproveitar o máximo da energia quando o sol está no ápice da sua trajetória e a radiação incidente é maior, justamente pra essa época do ano. O gráfico da Figura 70 define o ganho percentual por amostragem durante o período do ensaio.

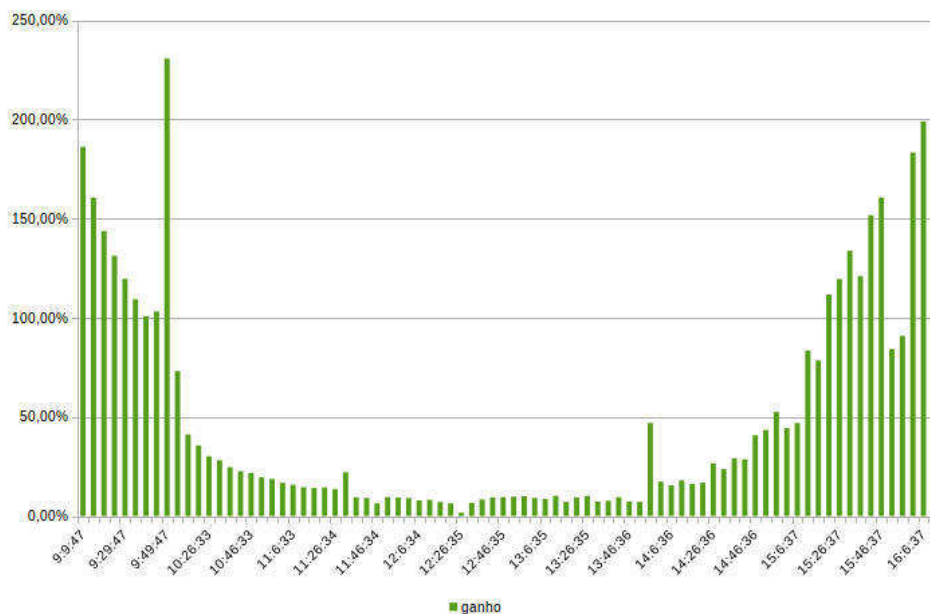


Figura 70: Ganho percentual da potência entregue, ao longo do tempo.

Apesar de não haver sido medido, o consumo da energia gasta pelo sistema rastreador (controlador, sensores e motores), ao longo das 7 horas de ensaio, foi estimado e apresentado na Tabela 10.

Tabela 9: Estimativa do consumo energético do sistema

estimativa consumo sistema			
Motores		Controlador + sensores	
standby		corrente	0,02 [A]
corrente	5,00E-003	tensão	5,00 [V]
tensão	5,00 [V]	potência	0,1150 [W]
potência	0,0250 [W]	tempo	100,00%
tempo	96,67%	energia	0,1150 [Wh]
energia	0,0242 [Wh]		
operação		energia	0,1150 [Wh]
corrente	0,10 [A]	duração	7 h
tensão	5,00 [V]	energia total consumida	0,8050 [Wh]
potência	0,5000 [W]		
tempo	3,33%		
energia	0,0167 [Wh]		
operação +standby			
energia	0,0408 [Wh]		
duração	7 h		
energia total consumida	0,5717 [Wh]		

Como pode ser visto na Tabela 9, a estimativa de consumo energético do sistema permitiu concluir que o sistema utilizou-se de uma energia equivalente a aproximadamente 21% da energia gerada para manter-se em operação, o que equivale dizer que o ganho líquido de energia gerada foi de 79%.

Tabela 10: Ganho líquido do sistema

rastreador		ganho líquido	
potência média	1,37 [W]	energia consumida	0,5717 [Wh]
energia gerada	9,5886 [Wh]	Motores	5,96%
		ganho líquido	94,04%
		energia consumida	1,4490 [Wh]
		Controlador	15,11%
		ganho líquido	84,89%
		Energia Total Consumida	2,0207 [Wh]
		ganho líquido	78,93%

Foram calculados, para o segundo ensaio, os ângulos horários (ω) exatos de início e término do experimento e de posse desses valores, foi calculada a irradiação extraterrestre horária (I_0) disponível. O resultado desses cálculos são apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11: Cálculo do ângulo horário.

HL	ω
9:9:47	-43,6°
16:11:37	61,9°

Tabela 12: Cálculo da irradiação extraterrestre horária para o período do experimento

cidade	São Paulo
Latitude (Φ)	-23,55°
Longitude	-46,70°
L0	45,0°
mes	5
dia	22
	Dia do ano
COR	0
n	142
	Declinação solar (δ)
δ	20,34°
I_0	2,07E+07 [J/m ²]
	5,7476 [kWh/m ²]

Com esses valores, foi calculada a energia gerada ao longo das 7 horas de ensaio e, baseado no parâmetro de potência nominal, foi estimada a radiação incidente em cada painel. Os resultados estão na Tabela 13.

Tabela 13: Irradiação coletada pelos painéis fixo e rastreador ao longo das 7 horas de ensaio.

potência média	1,37 [W]	1,07 [W]
energia	9,5886 [Wh]	7,5168 [Wh]
potência nominal	2,0000 [Wp]	2,0000 [Wp]
irradiação incidente	4,7943 [kWh/m ²]	3,7584 [kWh/m ²]

Levando em conta as condições climáticas dos dias em que foram feitos os ensaios, pôde ser constatado que o sistema apresenta uma eficiência de rastreamento maior em condições de céu claro e que, nessas condições, o ângulo de incidência variou entre 0° e 20° . Com a presença de nuvens, a eficiência de rastreamento fica seriamente comprometida e por vezes insatisfatória conforme mostra a Figura 67, a partir das 15h. A irradiação coletada pelo painel fixo e pelo painel acoplado ao rastreador, permitiram o cálculo das frações da radiação horária extraterrestre incidente (I_0) captadas pelos sistemas. Essas informações são mostradas na Tabela 14.

Tabela 14: Fração de I_0 coletada por cada sistema

	rastreador	fixo
potência média	1,37 [W]	1,07 [W]
energia gerada	9,5886 [Wh]	7,5168 [Wh]
potência nominal	2,0000 [Wp]	2,0000 [Wp]
irradiação coletada	4,7943 [kWh/m ²]	3,7584 [kWh/m ²]
% de I_0	83,41%	65,39%

É possível notar ainda que existe uma maior dificuldade do sistema em rastrear o ângulo zenital solar do que o ângulo azimutal. Isso se dá provavelmente pelas características construtivas do módulo de sensoriamento em ter o septo de separação, ao que tudo indica, menor do que deveria aliada a imprecisão intrínseca desse tipo de componente.

Houve significativa diferença de temperatura entre os painéis. Devido ao menor ângulo de incidência dos raios sobre o painel acoplado ao rastreador, este apresentou em média uma temperatura 3,5 °C mais elevada. No entanto, apesar da temperatura do painel que rastreia sol manter-se maior que a do painel fixo por todo o experimento, não se conseguiu avaliar sua influência na eficiência global, visto que mesmo nos momentos de pico da temperatura, o sistema não apresentou um ganho negativo.

4.1 Análise econômica

Para uma aplicação prática seria necessário fazer várias adaptações ao protótipo tanto para adequar às dimensões e peso das placas comerciais quanto para que houvesse uma maior economia no consumo de energia, aumentando assim a eficiência global do sistema. No entanto, é possível fazer uma estimativa baseada nos dados coletados. Essa análise econômica prospectiva descreve a viabilidade financeira da instalação de um sistema de rastreamento solar em uma aplicação residencial que já possua instalado um sistema de geração de energia fotovoltaica do tipo off-grid, de uma única placa de 250Wp, de aproximadamente 20Kg, com a mesma localização onde foram feitos os experimentos.

4.1.1 Perfil de consumo e tarifação de energia

O perfil de consumo de uma residência ao longo do ano e o custo da energia elétrica, considerando todos os impostos e desconsiderando o painel fotovoltaico já instalado pode ser visto no gráfico da Figura 70 e na Tabela 16, respectivamente.

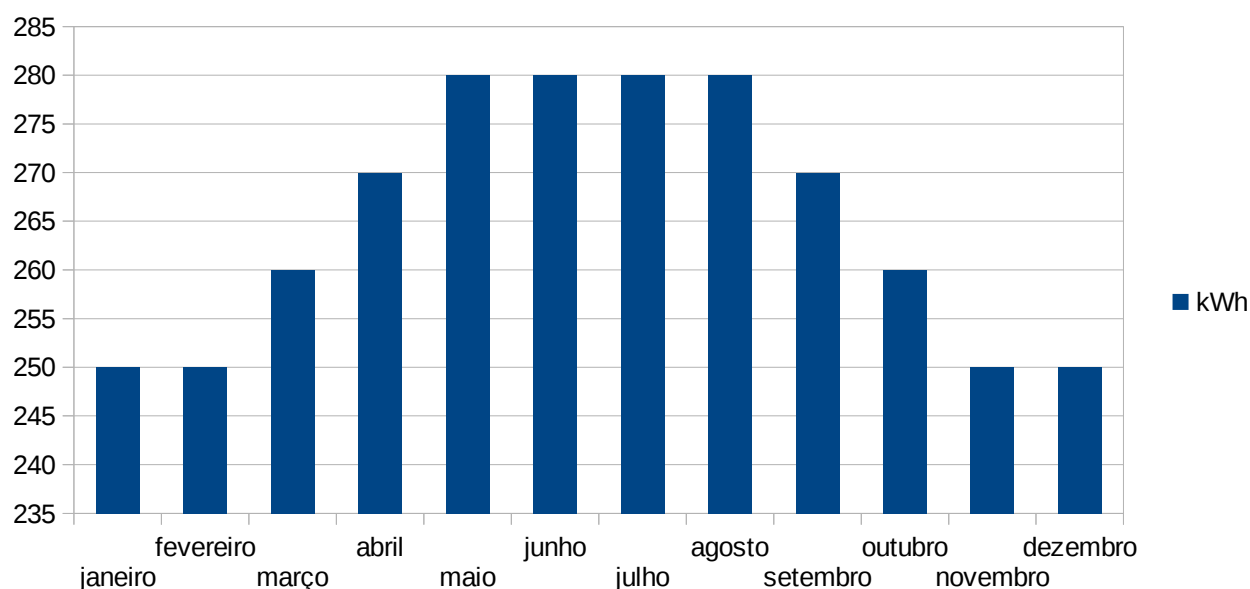


Figura 71: Perfil de consumo anual de energia elétrica da aplicação residencial

Tabela 15: Custo da energia elétrica da residência com impostos

mês	kWh	valor fornecimento	ICMS	COFINS	PIS/PASEP	ICMS COFINS	ICMS PIS/PASEP	TOTAL
janeiro	250,0	R\$ 106,68	R\$ 35,56	R\$ 5,50	R\$ 1,19	R\$ 1,83	R\$ 0,40	R\$ 151,16
fevereiro	250,0	R\$ 106,68	R\$ 35,56	R\$ 5,50	R\$ 1,19	R\$ 1,83	R\$ 0,40	R\$ 151,16
março	260,0	R\$ 110,94	R\$ 36,98	R\$ 5,72	R\$ 1,24	R\$ 1,91	R\$ 0,41	R\$ 157,21
abril	270,0	R\$ 115,21	R\$ 38,40	R\$ 5,94	R\$ 1,29	R\$ 1,98	R\$ 0,43	R\$ 163,25
maio	280,0	R\$ 119,48	R\$ 39,83	R\$ 6,16	R\$ 1,34	R\$ 2,05	R\$ 0,45	R\$ 169,30
junho	280,0	R\$ 119,48	R\$ 39,83	R\$ 6,16	R\$ 1,34	R\$ 2,05	R\$ 0,45	R\$ 169,30
julho	280,0	R\$ 119,48	R\$ 39,83	R\$ 6,16	R\$ 1,34	R\$ 2,05	R\$ 0,45	R\$ 169,30
agosto	280,0	R\$ 119,48	R\$ 39,83	R\$ 6,16	R\$ 1,34	R\$ 2,05	R\$ 0,45	R\$ 169,30
setembro	270,0	R\$ 115,21	R\$ 38,40	R\$ 5,94	R\$ 1,29	R\$ 1,98	R\$ 0,43	R\$ 163,25
outubro	260,0	R\$ 110,94	R\$ 36,98	R\$ 5,72	R\$ 1,24	R\$ 1,91	R\$ 0,41	R\$ 157,21
novembro	250,0	R\$ 106,68	R\$ 35,56	R\$ 5,50	R\$ 1,19	R\$ 1,83	R\$ 0,40	R\$ 151,16
dezembro	250,0	R\$ 106,68	R\$ 35,56	R\$ 5,50	R\$ 1,19	R\$ 1,83	R\$ 0,40	R\$ 151,16

4.1.2 Potencial solar

Considerando a superfície coletora instalada com a face voltada para o Norte em um ângulo de inclinação de 30 graus, a refletividade do solo de 0,5 e a média mensal de radiação incidente sobre o plano horizontal extraída do Atlas Solarimétrico, foram calculadas as médias mensais de radiação incidente sobre o plano inclinado, conforme o modelo de radiação total apresentado no segundo capítulo, no dia médio de cada mês. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 72 e o memorial de cálculo exemplificando a planilha usada para o mês de janeiro na Tabela 16.

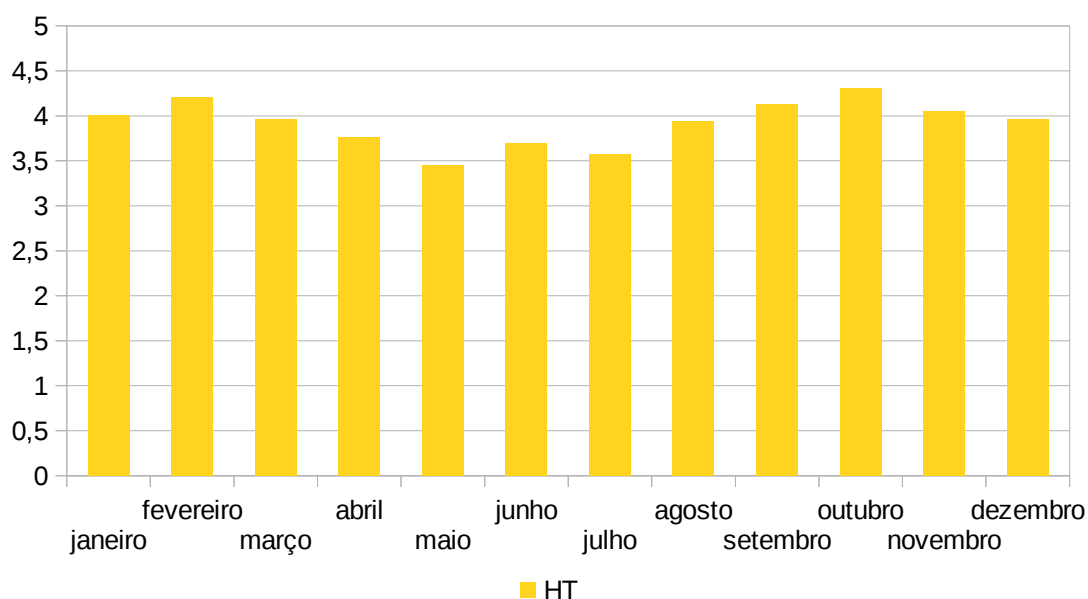


Figura 72: Médias mensais de radiação solar incidente sobre o plano inclinado

Tabela 16: Memorial de cálculo de H_T para o mês de janeiro

cidade	São Paulo
Latitude (Φ)	-23,55°
Longitude	-46,72°
L0	45,0°
Beta	30,0°
γ	180,0°
ρ	0,5
\bar{H}	1,60E+07 [J/m ² .dia]
\bar{H}_0	4,23E+07 [J/m ² .dia]
mes	1
dia	17
	Dia do ano
COR	0
n	17
	Declinação solar (δ)
δ	-20,92°
	Hora Solar (HS)
B	-63,2967032967
E	-9,9682264424
CorHora	5,9483073371
ω_s	99,6°
N	13.28 h

ω_s^*	99,59°		
ω_s^*	87,52°		
\bar{R}_b	A	0,927319364	0,7928915769
		-0,0612643264	
	B	0,8660550376	
		0,8443346731	
		0,2479395582	
1,0922742313			

\bar{K}_T	0,3782774192	
\bar{H}_d/\bar{H}	0,5591505827	
\bar{H}_b/\bar{H}	0,4408494173	
\bar{R}	0,9047340346	
\bar{H}_T	14,48E+006	4,0118 [kWh/m ² .dia]

4.1.3 Potência gerada pelo sistema fixo instalado

A partir desses resultados e da relação de energia gerada e potência nominal apresentada no segundo capítulo, foi calculada a potência anual gerada pelo painel de 250 Wp mês a mês. Os dados foram apresentados literais na Tabela 17 e graficamente na Figura 73.

Tabela 17: Cálculo anual de energia gerada pelo painel de 250 Wp.

mês	H_T	250,0 Wp
janeiro	4,0118 [kWh/m ² .dia]	31,09 [kWh/mês]
fevereiro	4,2047 [kWh/m ² .dia]	29,43 [kWh/mês]
março	3,9634 [kWh/m ² .dia]	30,72 [kWh/mês]
abril	3,7610 [kWh/m ² .dia]	28,21 [kWh/mês]
maio	3,4536 [kWh/m ² .dia]	26,77 [kWh/mês]
junho	3,6982 [kWh/m ² .dia]	27,74 [kWh/mês]
julho	3,5719 [kWh/m ² .dia]	27,68 [kWh/mês]
agosto	3,9391 [kWh/m ² .dia]	30,53 [kWh/mês]
setembro	4,1272 [kWh/m ² .dia]	30,95 [kWh/mês]
outubro	4,1272 [kWh/m ² .dia]	33,34 [kWh/mês]
novembro	4,0548 [kWh/m ² .dia]	30,41 [kWh/mês]
dezembro	3,9671 [kWh/m ² .dia]	30,75 [kWh/mês]
TOTAL anual		357,61 [kWh]

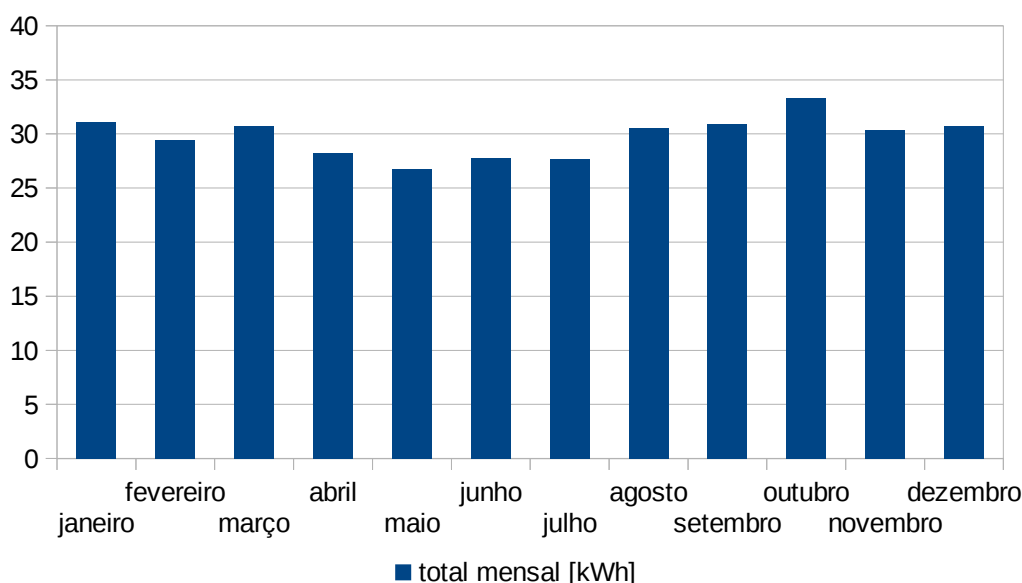


Figura 73: Produção anual de energia pelo painel de 250 Wp (gráfico)

4.1.4 Implantação do rastreador

Com base nos resultados da fração de irradiação extraterrestre coletada no ensaio e o índice de claridade médio do mês de maio, foi definido que um valor de K_T maior ou igual a 0,4 seria considerado o mínimo necessário para o pleno funcionamento do sistema, valores de índice de claridade inferiores resultariam em um mal funcionamento do sistema. O cálculo da frequência de ocorrência de um índice de claridade mínimo é apresentado na Tabela 17 e sua distribuição gráfica mostrada na Tabela 18.

Tabela 18: Cálculo da frequência mensal de $K_T \geq 0,4$

mês	\bar{K}_T	$K_T \geq 0,4$
janeiro	0,3783	46,49%
fevereiro	0,3999	50,69%
março	0,3923	49,20%
abril	0,4016	50,97%
maio	0,4028	51,18%
junho	0,4488	58,99%
julho	0,4184	53,83%
agosto	0,4278	55,43%
setembro	0,4167	53,53%
outubro	0,4167	53,53%
novembro	0,3860	47,99%
dezembro	0,3738	45,61%

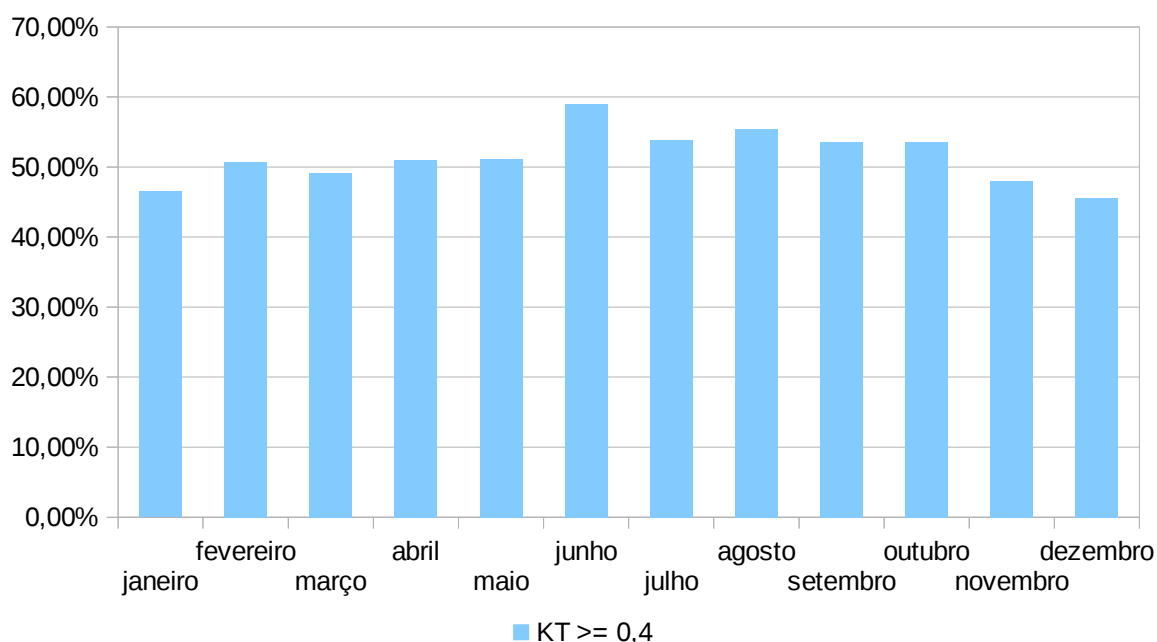


Figura 74: Gráfico com a ocorrência de um K_T satisfatório ao longo do ano

Considerou-se que a radiação incidente sobre o painel acoplado ao rastreador é uma soma de duas componentes ao longo do ano:

1. Na fração de tempo em que o índice de claridade é satisfatório ($K_T \geq 0,4$) o aproveitamento solar em relação a radiação sobre o plano inclinado é a mesma apresentada durante o ensaio, ou seja, em torno de 30% maior, conforme a Tabela 8.
2. Para os momentos em que o índice de claridade é insatisfatório ($K_T < 0,4$), assume-se que o sistema rastreamento estaria desligado e o painel permaneceria na posição fixa inclinada ($\gamma=180^\circ$ e $\beta=30^\circ$), apresentando o mesmo aproveitamento da radiação.
3. O consumo do sistema não pode ser escalado pois no protótipo a potência dissipada pelo microcontrolador é significativa devido à ordem de grandeza. Para essa aplicação essa potência pode ser considerada desprezível e por isso adotou-se um valor de consumo intermediário de 6%, apenas considerando os motores de passo e o driver.

Levando em conta essas considerações, foi adotada a equação (30) para descrever a radiação captada pelo rastreador, em função da radiação disponível no plano inclinado, ao longo do ano. Os resultados são apresentados na Tabela 19. A partir da tabela foi gerado um gráfico comparativo entre os dois sistemas que pode ser visto na Figura 75.

$$I_{\text{rastreador}} = \{ [1,3 * \overline{H}_T * OC(K_T \geq 0,4)] * (1 - \text{Consumo}) \} + [1 - OC(K_T \geq 0,4) * \overline{H}_T] \quad (30)$$

Tabela 19: Cálculo da intensidade de radiação captada pelo rastreador

mês	\overline{H}_T	Rastreador	ganho	consumo
janeiro	4,0118 [kWh/m ² .dia]	4,3733 [kWh/m ² .dia]	9,01%	6,00%
fevereiro	4,2047 [kWh/m ² .dia]	4,6778 [kWh/m ² .dia]	11,25%	312,92 [Wh/dia]
março	3,9634 [kWh/m ² .dia]	4,3963 [kWh/m ² .dia]	10,92%	
abril	3,7610 [kWh/m ² .dia]	4,1865 [kWh/m ² .dia]	11,32%	
maio	3,4536 [kWh/m ² .dia]	3,8460 [kWh/m ² .dia]	11,36%	
junho	3,6982 [kWh/m ² .dia]	4,1826 [kWh/m ² .dia]	13,10%	
julho	3,5719 [kWh/m ² .dia]	3,9987 [kWh/m ² .dia]	11,95%	
agosto	3,9391 [kWh/m ² .dia]	4,4238 [kWh/m ² .dia]	12,30%	
setembro	4,1272 [kWh/m ² .dia]	4,6177 [kWh/m ² .dia]	11,88%	
outubro	4,3016 [kWh/m ² .dia]	4,8128 [kWh/m ² .dia]	11,88%	
novembro	4,0548 [kWh/m ² .dia]	4,4867 [kWh/m ² .dia]	10,65%	
dezembro	3,9671 [kWh/m ² .dia]	4,3688 [kWh/m ² .dia]	10,13%	
	média	4,3642 [kWh/m ² .dia]		

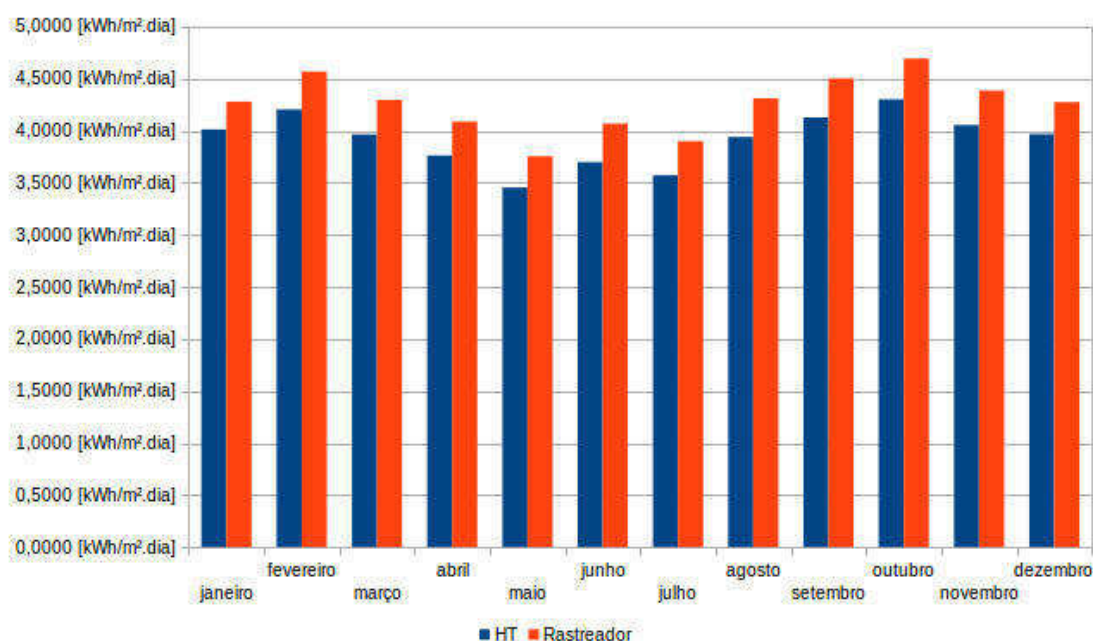


Figura 75: Comparativo entre a radiação média mensal disponível no plano horizontal (\bar{H}), no plano inclinado (\bar{H}_T) e no rastreador solar

Com base nos resultados obtidos, calculou-se a produção anual de energia pelo mesmo painel de 250Wp, porém agora acoplado ao sistema de rastreamento. Os resultados de ambos os sistemas são mostrados na Tabela 20 e a distribuição mensal do ganho na Figura 76.

Tabela 20: Produção anual de energia pelo painel de 250Wp acoplado ao rastreador

		Potência nominal		250,0 Wp			
		Quantidade		1			
		FIXO		RASTREADOR			
mês	média mensal	total mensal	média mensal	total mensal	ganho mensal		
janeiro	1.002,96 [Wh/dia]	31,09 [kWh/mês]	1.093,32 [Wh/dia]	33,89 [kWh/mês]	9,01%		
fevereiro	1.051,17 [Wh/dia]	29,43 [kWh/mês]	1.169,45 [Wh/dia]	32,74 [kWh/mês]	11,25%		
março	990,85 [Wh/dia]	30,72 [kWh/mês]	1.099,07 [Wh/dia]	34,07 [kWh/mês]	10,92%		
abril	940,24 [Wh/dia]	28,21 [kWh/mês]	1.046,64 [Wh/dia]	31,40 [kWh/mês]	11,32%		
maio	863,40 [Wh/dia]	26,77 [kWh/mês]	961,50 [Wh/dia]	29,81 [kWh/mês]	11,36%		
junho	924,56 [Wh/dia]	27,74 [kWh/mês]	1.045,64 [Wh/dia]	31,37 [kWh/mês]	13,10%		
julho	892,97 [Wh/dia]	27,68 [kWh/mês]	999,69 [Wh/dia]	30,99 [kWh/mês]	11,95%		
agosto	984,76 [Wh/dia]	30,53 [kWh/mês]	1.105,94 [Wh/dia]	34,28 [kWh/mês]	12,30%		
setembro	1.031,79 [Wh/dia]	30,95 [kWh/mês]	1.154,42 [Wh/dia]	34,63 [kWh/mês]	11,88%		
outubro	1.075,39 [Wh/dia]	33,34 [kWh/mês]	1.203,20 [Wh/dia]	37,30 [kWh/mês]	11,88%		
novembro	1.013,69 [Wh/dia]	30,41 [kWh/mês]	1.121,68 [Wh/dia]	33,65 [kWh/mês]	10,65%		
dezembro	991,79 [Wh/dia]	30,75 [kWh/mês]	1.092,21 [Wh/dia]	33,86 [kWh/mês]	10,13%		
TOTAL ANUAL		357,607 [kWh]	TOTAL ANUAL	397,998 [kWh]			
		GANHO ANUAL			11,29%		



Figura 76: Distribuição do ganho obtido pela implantação do rastreador ao longo do ano

4.1.5 Custo do sistema

Como foi dito, para uma aplicação prática seria necessário adequar praticamente todas as partes do sistema (exceto pelo controlador e sensores). Foi feita uma estimativa dos custos de um sistema para esse porte mostrada na Tabela 21.

Tabela 21: Lista de materiais

Lista de materiais		
Composte	Preço	quantidade
Motor de passo para 30Kg Com driver	R\$ 150,00	2
Sensor LDR e resistor	R\$ 1,50	4
Kit 'stand-alone' Atmega328	R\$ 20,00	1
Adaptação para o suporte mecânico	R\$ 100,00	1
outros (cabos, conectores, etc.)	R\$ 20,00	1
Preço do sistema	R\$ 426,00	

4.1.6 Viabilidade financeira

Se a energia produzida pelo painel fotovoltaico deixa de ser consumida da rede elétrica existe uma economia monetária anual que pode ser quantificada. Analisando a tarifação de energia da Tabela 14 e o custo anual do serviço, chegamos a um valor de 60 centavos por cada kWh, multiplicados pela produção anual de energia do painel, chega-se a um valor de R\$217,50, conforme a Tabela 22 que deixa de ser pago a distribuidora de energia. O acréscimo de energia gerada pelo mesmo painel com a implantação do sistema rastreador solar, há um aumento ainda maior dessa economia. Ao comparar as potências geradas pelo sistema fixo e rastreador podemos concluir que existe um lucro anual conforme mostrado na Tabela 23.

Tabela 22: Preço anual médio do kWh da residência

TOTAL anual	3180,00 [kWh]
	R\$ 1.922,78
R\$/kwh	0,60 [R\$/kWh]

Tabela 23: Comparação da economia feita pela utilização da energia gerada pelo painel de 250Wp fixo e com o rastreador

PAINEL 250Wp	n	1	economia anual
	fixo	357,61 [kWh]	R\$ 216,23
	rastreador	398,00 [kWh]	R\$ 240,65
		lucro	R\$ 24,42

Com o custo do sistema apresentado e a economia anual proporcionada, foi calculado o Payback simples, o Payback descontado. Considerando uma taxa de desconto de 12% e um período de 10 anos, também foi calculado o VPL e a TIR da implantação do sistema. Os resultados da viabilidade econômica são apresentados na Tabela 24 e nos gráficos das Figuras 79 e 80.

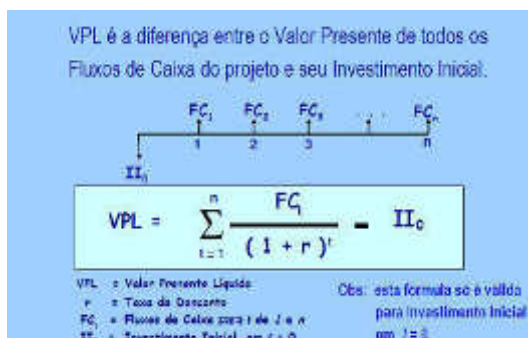


Figura 77: Cálculo VPL utilizado

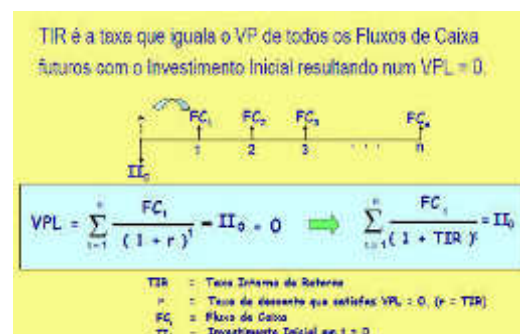


Figura 78: Cálculo TIR utilizado

Tabela 24: Estudo de viabilidade econômica do projeto

Viabilidade Econômica			
Parâmetros Financeiros			
Inv. Inicial Adicional		-R\$ 426	Ilo
Fluxo de Caixa		R\$ 19	FLC
Taxa de desconto		12%	r
Período (anos)		10	n

Ano	FLC	FLCD	FLCA
0	-426	-426	-426
1	19	17	-409
2	19	15	-394
3	19	13	-381
4	19	12	-369
5	19	11	-358
6	19	10	-348
7	19	9	-340
8	19	8	-332
9	19	7	-325
10	19	6	-319

Resultado Financeiro

Payback simples	22,6 anos
Payback Descontado	56,8 anos
VPL	-R\$ 319
TIR	-12,6%

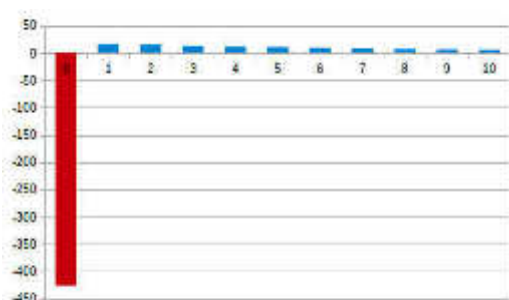


Figura 79: Fluxo de caixa descontado da implantação do sistema rastreador

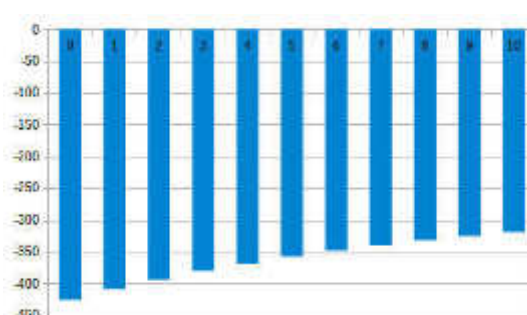


Figura 80: Fluxo de caixa acumulado da implantação do sistema rastreador

5. CONCLUSÃO

A conclusão do trabalho pode ser feita em três frentes distintas. A primeira delas é a eficiência do rastreamento solar propriamente dito, isto é, a capacidade do sistema em posicionar o painel fotovoltaico acoplado perpendicularmente ao sol. A outra análise a ser feita é sobre a potência entregue à carga, pelo painel que rastreia o sol, quando comparada ao sistema fixo de posicionamento. Por último a viabilidade financeira da instalação do sistema.

Os resultados do desempenho de rastreamento executado pelo sistema mostraram-se aceitáveis porém um pouco a quem do ideal. O uso de sensores LDR para o rastreamento solar, além de inserir um erro de posicionamento derivado da imprecisão dos componentes, confere uma limitação de atuação do sistema em condições de alta difusão dos raios o que revela ser uma problemática incontornável para uma aplicação comercial.

Apesar da falta de precisão no posicionamento foi possível observar um aumento significativo, em torno de 27%, da potência gerada pelo painel o que indica que esse aumento pode ser ainda mais expressivo em um sistema de rastreamento mais eficiente. Quanto a eficiência energética do sistema, existe uma boa possibilidade de otimizar o consumo de energia para que esse apresente um ganho líquido ainda maior.

Uma simulação de um sistema que não utilizasse sensores, portanto não tivesse a mesma limitação de atuação e apresentasse o mesmo rendimento do experimento realizado, permitiu concluir que o ganho seria 50% maior.

Apesar da não atratividade financeira do exemplo de projeto proposto, não é correto concluir que não exista espaço pra esse tipo de tecnologia. Além de haver espaço para um aperfeiçoamento do sistema que pudesse conferir um aumento significativo da sua eficiência, a geração distribuída também desempenha um papel de inclusão elétrica e cada aplicação deve ser analisada individualmente levando-se em conta seu valor subjetivo e o objetivo a ser atingido.

Com o uso de sistemas multiplicadores de torque seria possível utilizar motores menos potentes e portanto menos dispendiosos. Isso teria grande impacto na análise financeira já que os motores são os itens mais sensíveis, nesse aspecto.

6. TRABALHOS FUTUROS

A evolução desse trabalho seria implementar um rastreador solar que não faça uso de sensores e calcule o ângulo exato de posicionamento através das equações de geometria solar. Com poucos ajustes também seria possível diminuir o consumo do sistema, aumentando sua eficiência energética. Também seria interessante desenvolver os ensaios ao longo de um ano inteiro e em dias com diferentes índices de claridade.

7. BIBLIOGRAFIA

REN21, Renewables 2014 - Global Status Report, 2014, Brunn - Alemanha.

CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, 2014.

APPEYARD, D., Sun Trackers: Facing the sun. Disponível em:

<<http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-12/issue-3/solar-energy/solar-trackers-facing-the-sun.html>>. Acesso em: Fev 2015

SOLARCHOICE, Solar Trackers. Disponível em: <<http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers>>. Acesso em: Fev 2015

MATHUR, A., What is latitude and longitude of a location?. Disponível em: <<http://readanddigest.com/what-is-latitude-and-longitude/>>. Acesso em: Fev 2015

DUFFIE, J. A.; BECKMAN W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4 edição. USA: ed. Wiley, 2013. 928p.

WIKIPEDIA, Horário Solar aparente. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Hor%C3%A1rio_solar_aparente>. Acesso em:

PACHECO, C. R. F., Avaliação do Potencial de Energia Solar Turma 6, 2013. PECE - USP: Notas de Aula. PDF
TREVELIN, F. C., Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos. USP - Escola de Engenharia de São Carlos, 2014

CRESESB. Energia Solar Princípios e Aplicações, 2006.

BRAGA, R. P., Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações. UFRJ, 2008

GREEN DIARY, What's next: Flexible solar panels. Disponível em: <<http://www.greendiary.com/flexible-solar-panels.html>>. Acesso em: FEV 2015

WIKIPEDIA, Theory of solar cells. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cells>. Acesso em: FEV 2015

CAPTOSOL, Como funciona um sistema de energia fotovoltaica. Disponível em:

<<http://www.captosol.com.br/energia-fotovoltaica.php>>. Acesso em: MAR 2015

PVEDUCATION, Solar Radiation on a tilted surface. Disponível em:

<<http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-radiation-on-tilted-surface>>. Acesso em: MAR 2015

LEVITAN, D., The Solar Efficiency Gap. Disponível em: <<http://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/the-solar-efficiency-gap>>. Acesso em: MAR 2015

BERTOLI, G. C., Sistemas Fotovoltaicos de Geração de Energia: Comparação de Desempenho entre um Sistema com Rastreamento Solar e um Sistema Estático. UNESP, 2012

SCIENCEPROG, Understanding and interfacing LDR – light dependent resistors. Disponível em:

<<http://www.scienceprog.com/understanding-and-interfacing-ldr-light-dependent-resistors/>>. Acesso em: MAR

2015

Dep. Eng. Elétrica, ServoMotor, 2013. Unesp: Notas de Aula. PDF

AUTOCORE, Easydriver + Motor de Passo. Disponível em:

<<http://www.autocorerobotica.blog.br/easydriver.html>>. Acesso em: MAR 2015

WIKIPEDIA, Intel MCS-51. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Intel_MCS-51>. Acesso em: ABRIL 2015

FILIFELOP, O que é Arduino?. Disponível em: <blog.filipeflop.com>. Acesso em: ABRIL 2015

ZERO, E., Arduino: Once More, with Photo Import. Disponível em:

<<https://engineerzero.wordpress.com/2011/01/19/arduino-once-more-with-photo-import/>>. Acesso em: ABR 2015

ATMEL. Datasheet: ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P, 2014.

SOUZA, F., Arduino UNO. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>>. Acesso em: abr 2015

QUADROS D., Microcontrolador Atmel ATmega328 - Parte 2. Disponível em:

<http://dqsoft.blogspot.com.br/2011/07/microcontrolador-atmel-atmega328-parte_06.html>. Acesso em: ABR 2015

Anexo A: Atlas Solarimétrico brasileiro: Radiação Global Diária, média mensal.

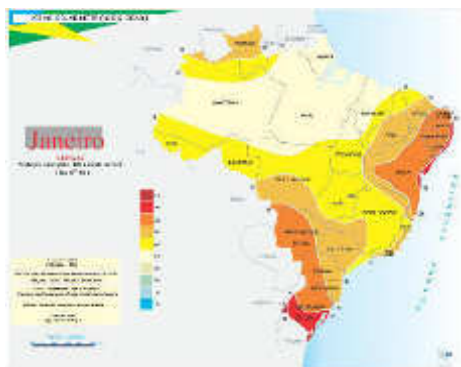


Figura 81: Janeiro

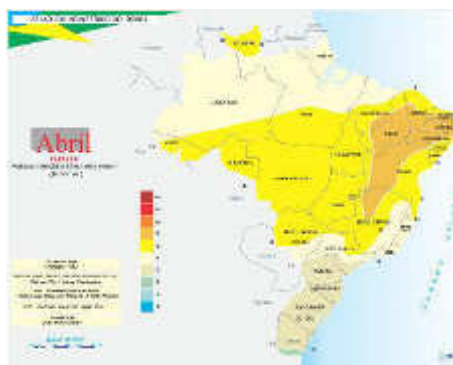


Figura 82: Abril

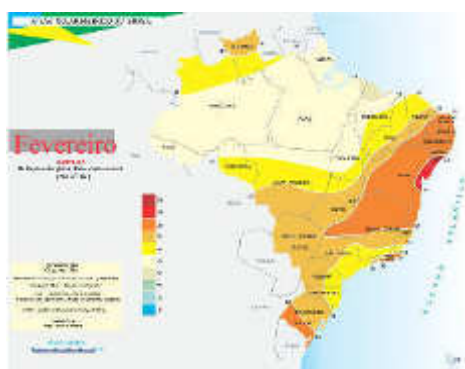


Figura 83: Fevereiro

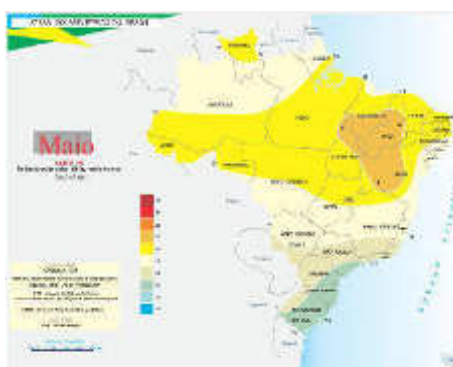


Figura 84: Maio

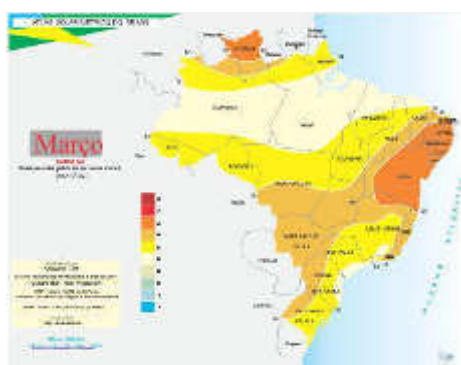


Figura 85: Março

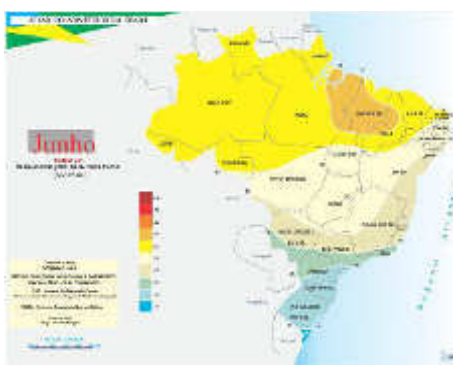


Figura 86: Junho

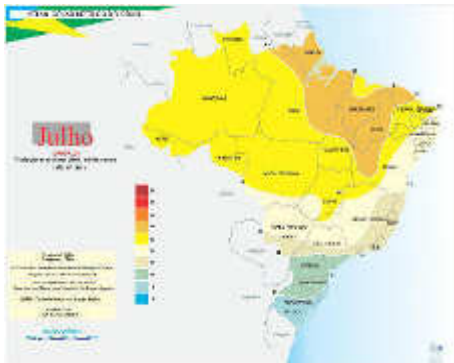


Figura 87: Julho

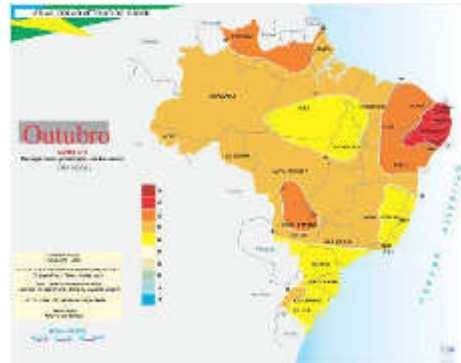


Figura 88: Outubro



Figura 89: Agosto

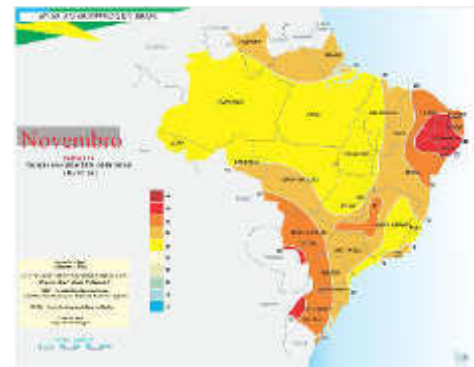


Figura 90: Novembro

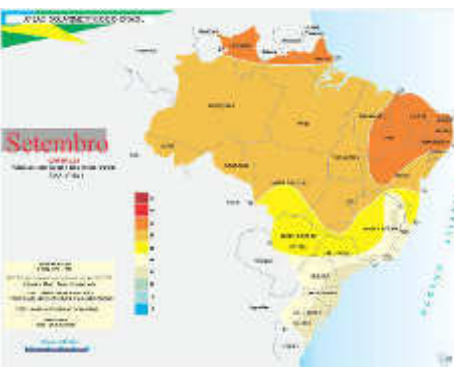


Figura 91: Setembro



Figura 92: Dezembro

Anexo B: Especificações técnicas do painel de 250Wp utilizado

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module type			YLxxxP-29b (xxx=P _{max})						
Power output	P _{max}	W	260	255	250	245	240	235	230
Power output tolerances	ΔP _{max}	W	0 / 5						
Module efficiency	η _m	%	15.9	15.6	15.3	15.0	14.7	14.4	14.1
Voltage at P _{max}	V _{mpp}	V	30.9	30.6	30.4	30.2	29.5	29.5	29.5
Current at P _{max}	I _{mpp}	A	8.41	8.32	8.24	8.11	8.14	7.97	7.80
Open-circuit voltage	V _{oc}	V	38.9	38.7	38.4	37.8	37.5	37.0	37.0
Short-circuit current	I _{sc}	A	8.98	8.88	8.79	8.63	8.65	8.54	8.40

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.
Average relative efficiency reduction of 5% at 200W/m² according to EN 60904-1.

Figura 93: Características elétricas do painel de 250Wp utilizado

GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	1650mm / 990mm / 40mm
Weight	19.1kg

Figura 94: Características gerais do painel de 250Wp utilizado