

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO
DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PATRÍCIA DE ANDRADE PAINES

Santa Maria, RS, Brasil

2014

DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

Patrícia de Andrade Paines

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Gerência de Produção, Linha de Concentração em Métodos Quantitativos para Tomada de Decisão, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção.**

Orientador: Prof. Dr. Felipe Martins Müller

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Paines, Patrícia de Andrade
Desenvolvimento de Kit Didático de Geração de Energia Solar / Patrícia de Andrade Paines.-2014.
100 f.; 30cm

Orientador: Felipe Martins Müller
Coorientadores: Diego Berlezi Ramos, Ilse Abegg
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, RS, 2014

1. Energia Solar Fotovoltaica 2. Kit Didático 3. Ensino-aprendizagem I. Martins Müller, Felipe II. Berlezi Ramos, Diego III. Abegg, Ilse IV. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
Aprova a Dissertação de Mestrado

**DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO
DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR**

Elaborada por
Patrícia de Andrade Paines

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Produção

COMISSÃO EXAMINADORA:

Felipe Martins Müller, Dr. (Orientador/UFSM)

Diego Berlezi Ramos, Dr. (Co-orientador/UNIPAMPA)

Ilse Abegg, Dra. (Co-orientadora/UFSM)

Santa Maria, 30 de janeiro de 2014.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais "Paulo Renato e Fatima",
À minha irmã Kelen e cunhado Fábio pelo incentivo em todos os momentos,
Ao meu sobrinho João Vitor, "anjo" de minha vida.*

*Certas coisas podem ter me feito sofrer,
mas elas simplesmente precisavam
acontecer pra me fazer crescer.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, que diante dos obstáculos e desafios mostrou os possíveis caminhos.

Ao orientador professor Dr. Felipe Martins Müller, pela dedicação, competência e amizade com que conduziu esta orientação de mestrado. Sou-lhe eternamente grata pelo meu crescimento ao longo desse trabalho.

Ao professor Dr. Diego Berlezi Ramos da coordenação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete e a professora Dra. Ilse Abegg da nossa UFSM pela confiança, contribuições técnicas e reconhecimento do trabalho.

Aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção pela disposição de transmitir conhecimento e pela amizade.

Ao professor coordenador Dr. Júlio Cezar Mairesse Siluk, pelo incentivo, apoio, auxílio e conselhos que me disponibilizou durante meu mestrado.

Aos amigos de longa data, Luana Palma, Júlio Senna, Raul Dalla Lana e Mario Luiz Trevisan que sempre acreditaram e torceram por mim.

Ao amigão e colega Nirvan Hofstadler Peixoto, pelos conselhos, críticas e parceria em trabalhos e projetos de estudo.

Aos meus pais pelo incentivo e financiamento de meus estudos, e toda a minha família pela presença constante em minha vida.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo apoio e colaboração na aquisição de dados e equipamentos de medição.

E meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que acreditaram direta ou indiretamente em mim e tornaram possível a elaboração do trabalho.

DECLARAÇÃO

Declaro que este trabalho é o resultado de minha investigação pessoal e de relatórios de projetos e pesquisas, realizado pelos grupos **Desenvolvimento de Kits Didáticos para o Ensino Tecnológico** e **Desenvolvimento de Equipamentos Eletrônicos para Sistemas de Geração de Energias Renováveis**, registrados no Gabinete de Projetos (GAP) sob nº 027932 e nº 027679 respectivamente, que participei de setembro de 2010 a março de 2013, sob responsabilidade e coordenação do professor Saul Azzolin Bonaldo do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, localizado na Universidade Federal de Santa Maria. O seu conteúdo e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto e referencias bibliografias.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria

DESENVOLVIMENTO DE KIT DIDÁTICO DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

AUTOR: PATRÍCIA DE ANDRADE PAINES

ORIENTADOR: FELIPE MARTINS MÜLLER

Data e Local da Dissertação: Santa Maria, 30 de janeiro de 2014.

O trabalho propõe desenvolver um kit didático de geração de energia solar a partir de dados de insolação, temperatura e cargas variáveis para o ensino-aprendizagem em energia solar fotovoltaica, eletrônica e instrumentação. A aplicação desta ferramenta auxiliar possibilitará explorar o máximo potencial do estudante e o aprimoramento dos conteúdos teóricos através de atividades práticas em sala de aula e ambientes externos. O Kit didático oferece ao estudante o contato direto com a realidade física, instrumental e, sucessivamente, despertando a criatividade e soluções de situações-problemas do cotidiano em diversas áreas, através de trabalhos cooperativos e interdisciplinares.

Palavras-Chave: Energia Solar Fotovoltaica; Kit Didático; Ensino-aprendizagem.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF TEACHING KIT OF SOLAR ENERGY GENERATION

The purpose of this study is to develop and education kit of solar energy generation from insolation, temperature and variable charges data for the teaching-learning in photovoltaic, electronics and instrumentation solar energy. The application of this tool will allow exploring the full potential of the student and the improvement of the theoretical contents through hands-on activities in and outside the classroom. The teaching kit provides the learner direct contact with physical and instrumental reality, and successively awakening creativity and solutions to everyday problems in many different areas, through interdisciplinary and altogether learning.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy; Teaching Kit; Teaching-learning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ângulos de orientação do PV.	3
Figura 2 - Tipos de radiação incidente na Terra.	3
Figura 3 - Espectro solar.	6
Figura 4 - Ângulo de incidência dos raios solares (β).	7
Figura 5 - Espectro solar e espectro do silício.	8
Figura 6 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal.	19
Figura 7 - Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica ideal.	20
Figura 8 - Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica na prática.	21
Figura 9 - Efeito da intensidade da luz na curva característica I-V.	22
Figura 10 - Efeito da temperatura na célula na curva característica I-V.	22
Figura 11 - Curva característica I-V típica de uma célula fotovoltaica.	26
Figura 12 - Curva típica de P-V para a célula fotovoltaica.	27
Figura 13 - Parâmetros de potência máxima.	27
Figura 14 - Tipos, células e películas fotovoltaicas.	29
Figura 15 - Ângulo de inclinação dos PV's.	32
Figura 16 - Técnica de tensão constante (CV).	35
Figura 17 - Técnica de Perturbação e Observação (P&O).	36
Figura 18 - Curva característica da P – V.	38
Figura 19 - Técnica de Condutância Incremental (INcCod).	38
Figura 20 - Técnica de Hill Climbing (HC).	39
Figura 21 - Fluxograma do Kit didático de geração de energia solar.	43
Figura 22 - Circuito esquemático para a medição de tensão e corrente.	44
Figura 23 - Resistores soldados de cada célula solar.	45
Figura 24 - Matriz solar composta 12 células solares.	46
Figura 25 - Placa CUSCOPIC.	48
Figura 26 - Gráfico de controle de média da temperatura externa.	56
Figura 27 - Gráfico de controle de desvio padrão da temperatura externa.	57
Figura 28 - Gráfico de controle de média da umidade relativa do ar.	58
Figura 29 - Gráfico de controle do desvio padrão da umidade relativa do ar.	58
Figura 30 - Gráfico de controle do desvio padrão da temperatura célula solar.	59
Figura 31 - Placa CUSCOPIC de geração de energia solar.	62
Figura 32 - Curvas I-V sob diversas condições de iluminação.	64
Figura 33 - Célula exposta a radiação direta de 1025W/m ² .	65
Figura 34 - Modelo de tabela e curva I-V da célula fotovoltaica.	66
Figura 35 - (a) Célula monocristalina e (b) Células solares monocristalina.	67
Figura 36 - (a) Célula policristalina e (b) Células solares policristalina.	68
Figura 37 - Célula amorfo: (a) aplicado em vidro e (b) cobertura de edifícios.	68
Figura 38 - Testes dos tipos de células solares.	69
Figura 39 - Célula exposta a radiação direta de 1025W/m ² .	65
Figura 40 - Curva I-V da célula solar.	71
Figura 41 - Célula solar exposta a insolação direta.	73
Figura 42 - Curva característica I-V de n células associadas em série.	74
Figura 43 - Planilha diária de radiação solar a 400 W/m ² .	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ângulos de instalação dos PV's durante ao longo do ano	4
Tabela 2 - Tecnologia e aplicações das células fotovoltaicas	32
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens das técnicas do MPPT.	40
Tabela 4 - Resistores reais considerando rendimento de 1000 W/m ² .	44
Tabela 5 - Especificações técnicas da célula fotovoltaica SW 0,4W.	46
Tabela 6 - Especificações Técnicas do microcontrolador PIC16F877	49
Tabela 7 - Especificações Técnicas do Sensor DS1822.	49
Tabela 8 - Especificações Técnicas do Sensor SHT11.	50
Tabela 9 - Tipos de sensores e as especificações técnicas.	55

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AC	Corrente alternada
CC	Corrente continua
CdTe	Telúrio de Cádmiio
CiGs	Índio-Gálio-Selênio
CIS	Cobre-Índio-Selênio
CV	Constant Voltage
FF	Fator de Forma
HC	Hill Climbing
I	Intensidade de corrente
I_0	Corrente de saturação reversa do diodo
I_d	Corrente que circula através do diodo
IncCond	Incremental Conductance
I_{pm}	Corrente produzida pela célula no ponto de potência máxima
I_{pv}	Corrente gerada pelo painel
I_{SC}	Corrente de curto-circuito de uma célula fotovoltaica
I-V	Tensão versus corrente
K	Constante de Boltzmann
MPP	Ponto de Máxima Potência
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
P	Potência do módulo
P&O	Perturbation and Observation
P_m	Potência máxima na curva característica de uma célula fotovoltaica
q	Carga elétrica do elétron
R_p	Resistência paralelo de uma célula ou módulo fotovoltaico
R_s	Resistência série de uma célula ou módulo fotovoltaico
T	Temperatura da célula
V	Tensão ou diferença de potencial
V_m	Tensão máxima de uma célula fotovoltaica
V_{oc}	Tensão em circuito aberto

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 Motivação	5
1.1.1 Energia solar fotovoltaica	5
1.1.2 Aplicações da energia solar	9
1.1.3 “Kits” didáticos	11
1.1.4 Aplicações do “Kit” didático	14
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 Justificativa	17
1.4 Organização dos capítulos	18
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO	
2.1 Modelagem matemática da célula solar	19
2.2 Técnicas de rastreamento solar	23
2.3 Características elétricas do painel fotovoltaico	25
2.4 Fatores que afetam o rendimento da célula fotovoltaica	29
2.5 Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência	34
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	
3.1 Desenvolvimento do “kit” didático	42
3.1.1 Matriz solar	43
3.1.2 Placa de dados	47
3.1.3 Microcontrolador PIC16F877	48
3.1.4 Sensor de temperatura DS1822	49
3.1.5 Sensor de temperatura e umidade relativa do ar STH11	50
3.1.6 Registrador de tempo	50
3.1.7 Programação e software de controle	51
3.1.8 Armazenamento de dados	51
3.1.9 Instrumentos de medição	52
3.2 Validação do banco de dados	53
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	
4.1 Planos de ensino técnico	61
4.1.1 Atividade experimental I	61
4.1.2 Atividade experimental II	64
4.1.3 Atividade experimental III	67
4.1.4 Atividade experimental IV	71
4.1.5 Outras atividades experimentais	76
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO	
5.1 Considerações finais	77
5.2 Trabalhos futuros	78
REFERÊNCIAS	80
ANEXOS	85

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O grande interesse na geração de energia limpa e inesgotável depende das tecnologias disponíveis, das condições climáticas de uma determinada região e do fator econômico. Para a conversão da energia solar em energia elétrica utilizável usam-se células fotovoltaicas.

O aproveitamento da energia solar a partir de sistemas de geração adequadamente dimensionados e economicamente viáveis é possível através de estudos solarimétricos da região. Porém tais informações nem sempre estão prontamente disponíveis devido à grande extensão territorial, da instalação e manutenção de instrumentos de medição solar, conforme estudos de Guimarães (2003).

Considerando as possibilidades e a empregabilidade da energia solar torna-se indispensável ao profissional ou estudioso das áreas de energias renováveis e tecnológicas, o conhecimento aprofundado dos princípios e métodos de geração elétrica a partir do recurso solar. Por isso, é importante que os profissionais conheçam o funcionamento deste tipo de conversão energética.

A utilização da energia elétrica fotovoltaica é adequada para aplicações em sistemas de pequeno porte no meio urbano e rural, pois é produzida a partir de células de material semicondutor que agrupadas caracterizam um painel fotovoltaico (PV) com dimensões relativamente pequenas de 1 a 2 m² ou agrupamento de módulos fotovoltaicos através de ligações em série, paralelas ou mistas. Possibilita o aumento da área de incidência obtendo diferentes valores de tensão ou corrente, permitindo efetuar o controle da energia produzida pelo painel. Por suas reduzidas dimensões, é possível instalar os PV em pequenos espaços, garantindo que os mesmos receberão a máxima incidência solar durante o período.

Segundo Duffie (1991), para obter a máxima incidência de energia solar, devem ser consideradas as seguintes condições:

a) Posicionamento solar em relação a Terra: Para quantificar a energia proveniente do sol é necessário conhecer os fatores geográficos do local, tais como:

- Declinação solar;
- Latitude local;
- Ângulo azimutal;
- Altitude solar;
- Ângulo horário;
- Ângulo de inclinação do PV;

O ângulo de incidência pode ser relacionado com o ângulo de altitude solar α , ângulo de azimute solar α_s , e a dois ângulos que definem a orientação do painel: o ângulo β de inclinação do painel (em relação ao plano horizontal) e o ângulo α_w de azimute do painel (formado pela direção Norte-Sul com a projeção no plano horizontal da normal ao painel). Essa relação é definida por:

$$\cos i = \cos \alpha \cos(\alpha_s - \alpha_w) \sin \beta + \sin \alpha \cos \beta$$

No caso de incidência normal, $\alpha_s = \alpha_w$, $\alpha = 90^\circ$ e $i = 0$. Se o painel for horizontal, fica $\beta = 0$ e $i = 90^\circ$. No Brasil, o nível de irradiação é 15% maior do que numa área horizontal, ou seja, ângulo de inclinação ($\beta = 0$).

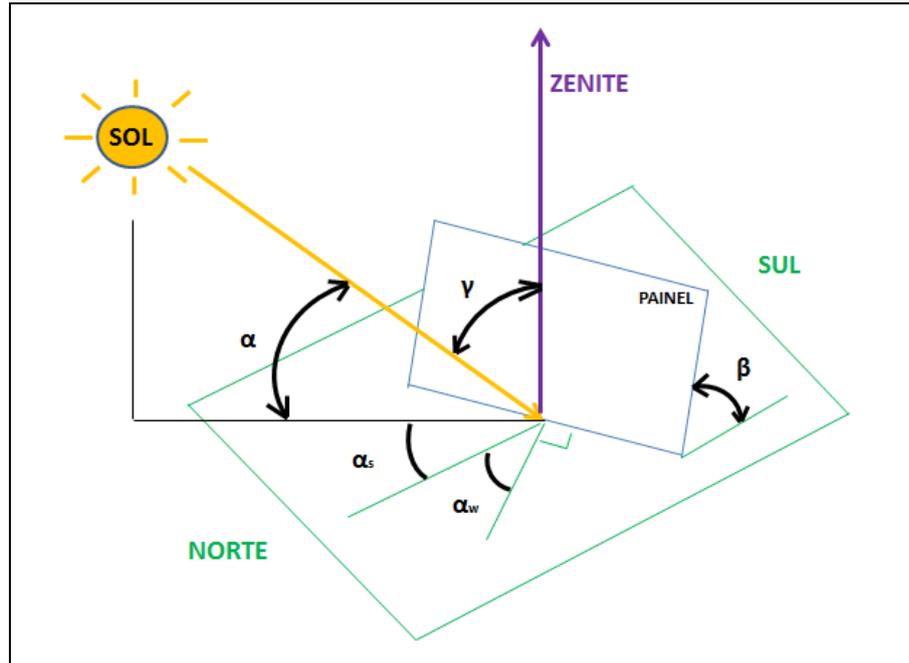


Figura 1 – Ângulos de orientação do PV (γ = ângulo entre a posição do Sol e observador, α = ângulo de azimute do painel e β = ângulo de inclinação do painel).

b) Componentes da radiação solar: Parcela da quantidade total da radiação solar atinge a superfície terrestre, pois a atmosfera reduz a radiação solar através dos fenômenos da reflexão, absorção (ozônio, vapor de água, oxigênio, dióxido de carbono) e dispersão (partículas de pó, poluição). A Figura 2 demonstra as parcelas de cada tipo de radiação solar incidente sobre a atmosfera e superfície terrestre.

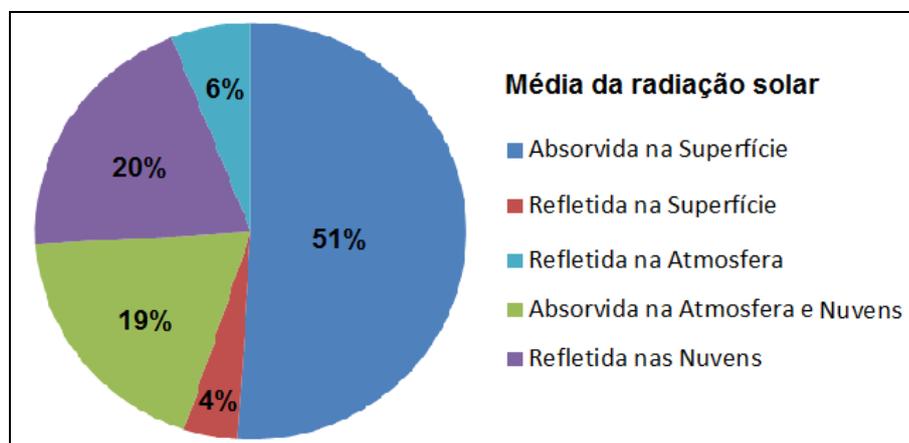


Figura 2 – Tipos de radiação incidente na Terra.

c) Orientação e inclinação do PV: Visam maximizar a quantidade de radiação solar incidente aproveitável na superfície do PV. A inclinação do painel depende da latitude do lugar da instalação e aos movimentos de translação da Terra em torno do Sol. A Tabela 1 demonstra os ângulos apropriados em relação à latitude e os movimentos de translação para a instalação dos PV's.

Tabela 1 – Inclinação dos PV's durante ao longo do ano.

Latitude do lugar	Ângulo no inverno	Ângulo no verão
0 a 15°	15°	15°
15 a 25°	Latitude	Latitude
25 a 30°	Latitude + 5°	Latitude - 5°
30 a 35°	Latitude + 10°	Latitude + 10°
35 a 40°	Latitude + 15°	Latitude + 15°
> 40°	Latitude + 15°	Latitude + 20°

O projeto de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos corresponde modo a captar a máxima radiação solar a inclinação do PV durante ao longo do ano, observando o solstício de Verão em que a duração do dia é máxima e o solstício de Inverno em que a duração do dia é mínima.

Logo, a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos pode ser processada por meio de interface eletrônica de potência específica, injetada na rede elétrica de distribuição ou armazenada em baterias que garante acumular a energia gerada durante o dia, para sua utilização durante períodos sem sol (à noite ou em dias nublados ou chuvosos).

1.1 Motivação

1.1.1 Energia solar fotovoltaica

A energia solar oferece um grande potencial para conversão em energia elétrica, capaz de suprir parte importante das necessidades de energia do planeta. Porém, este processo de incorporar avanços e desenvolvimentos tecnológicos de pesquisa em energia fotovoltaica (LUQUE e HEGEDUS, 2003).

A energia solar radiante é uma das fontes primárias principais, abundante e inesgotável, menos poluente, silenciosa, limpa e menor interferência direta no meio ambiente. Como fonte de energia renovável pode ser ampliada conforme a necessidade (modularidade); tem baixa manutenção, com curtos prazos de instalação e operação; integrada em projetos de construções civis e elétricas; a energia gerada pode ser acumulada em baterias; permite um sistema autônomo, sustentável e independente, sem a necessidade de linhas de transmissão e ser conectados a rede elétrica. Pode ser utilizada em locais remotos e de difícil acesso, em pequena e média escala, evitando investimentos em linhas de transmissão e distribuição de energia; assim como baixa manutenção e alta durabilidade do sistema.

Dentre suas principais desvantagens encontra-se o alto custo de investimento e seu rendimento que depende da radiação incidente, temperatura ambiente e tecnologia de fabricação das células fotovoltaicas, assim como o uso de grandes áreas para a captação de energia em quantidade suficiente para que o empreendimento se torne economicamente viável.

O emprego desta tecnologia é predominante em sistemas autônomos e integrados; para aplicações em telecomunicações, eletrificação rural e para alimentação de bombas d'água. Os sistemas conectados à rede utilizam um número elevado de PV's, e sem armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede e fonte complementar do sistema elétrico de grande porte ao qual está conectada. O arranjo de PV's é conectado diretamente a inversores e logo em seguida à na rede elétrica. Os sistemas exigem complexidade no projeto de

inversores para satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação solar, tais como termoeletrico (calor) e fotovoltaico (luz) sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. O efeito termoeletrico caracteriza-se pelo surgimento de uma diferença de potencial (*ddp*) provocada pela junção de dois metais, ou seja, quando tal junção está a uma temperatura mais elevada do que as outras extremidades dos fios. E o efeito fotovoltaico, os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, por meio do uso de células fotovoltaicas ou fotocélulas (CRESESB, 2006).

As fotocélulas são elementos constituídos por diversos materiais semicondutores de conversão direta da luz solar e sensíveis para geração de maior potencial elétrico, já que a maior parcela de energia fornecida pelos raios do sol está na faixa visível do espectro solar. A Figura 3 demonstra o comparativo das distribuições do espectro da radiação solar incidente na atmosfera sob influência da massa de ar de AM = 0 e AM = 1,5.

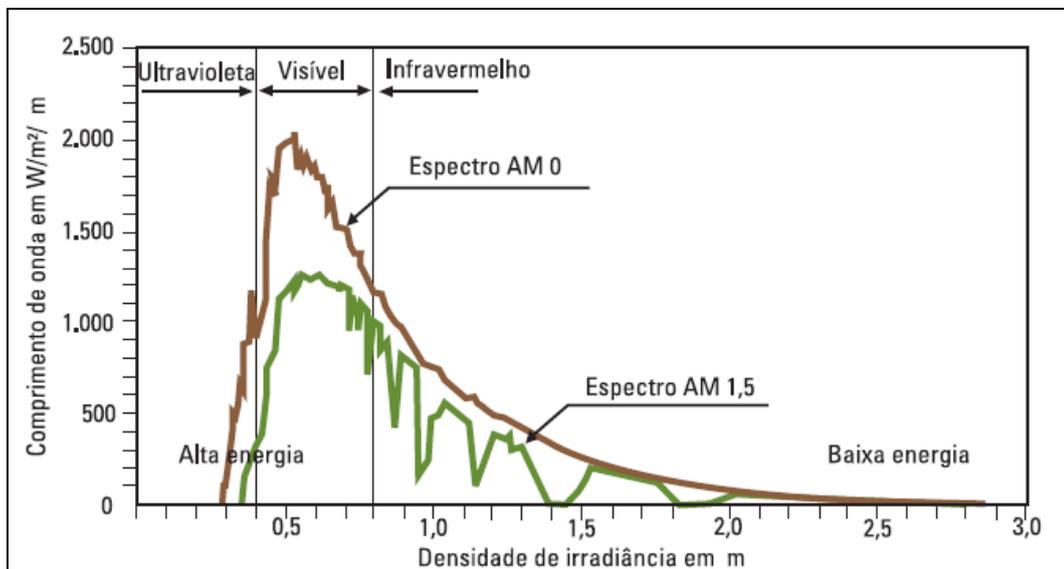
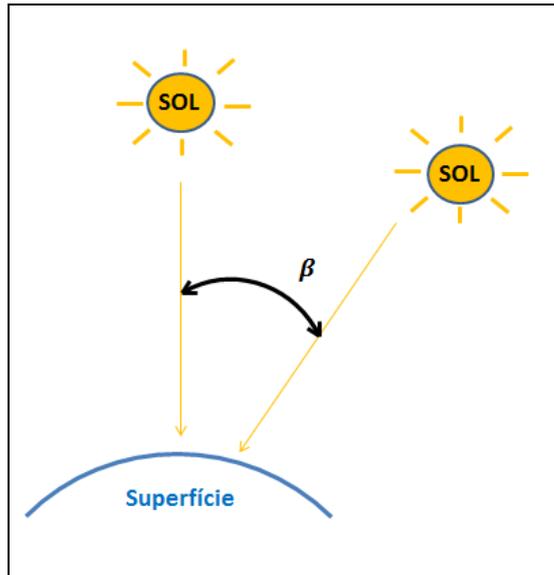


Figura 3 – Espectro solar.
Fonte: (CRESESB, 1999).

A massa de ar (AM) é um fator de alterações e efeitos na radiação solar incidente. As alterações do deslocamento de massa de ar são provocadas pela

diferença de pressão e temperatura entre as diversas áreas da superfície e efeitos quanto ao ângulo de incidência (β) dos raios solares através da atmosfera que depende da altura solar e da massa de ar atravessada (fig. 4). A relação entre a posição do Sol e a AM é definida do seguinte modo:



$$AM = \frac{1}{\text{sen}\beta}$$

Figura 4 – Ângulo de incidência dos raios solares (β).

O percurso dos raios solares de maior ou menor massa de ar atravessada influencia diretamente na quantidade de energia solar, ou seja, quanto maior a AM, maior será a trajetória da radiação solar e conseqüentemente, maior será a perda de energia (CRESESB, 1999).

A Figura 5 demonstra a semelhança de resposta relativa entre o comportamento das curvas do espectro solar a $AM = 1,5$ e o espectro de uma célula solar de silício durante um período de tempo.

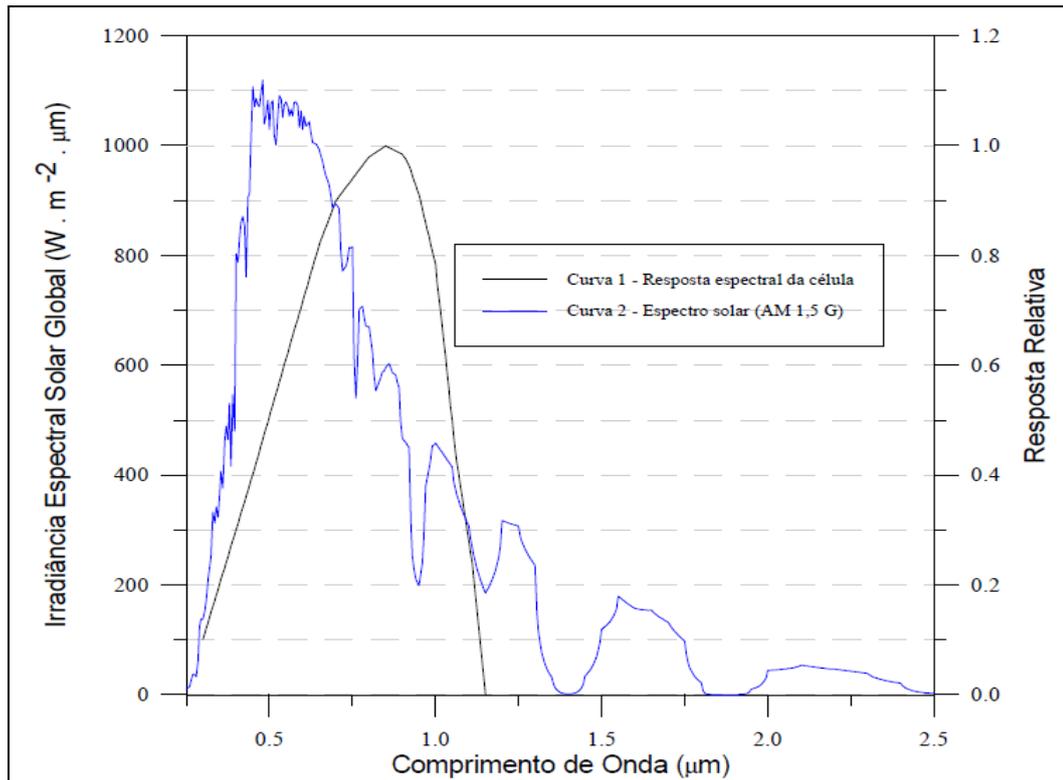


Figura 5 – Espectro solar e espectro do silício.
 Fonte: (HECKTHBEUER, L. A., 2001).

De acordo com Krenzinger et al. (2002), uma célula solar fornece pouca energia, cerca de 0,6 V e uma densidade de corrente de curto-circuito da ordem de 150 mA/cm², quando exposta a uma radiação solar de 1 kW/m². Para se conseguir a tensão e corrente suficientes para alimentar o sistema, é necessário o agrupamento em módulos, que são diversos painéis fotovoltaicos conectados em arranjos.

A potência máxima varia com a temperatura e a radiação incidente, tendo uma influência direta na intensidade de corrente e tensão nos terminais do módulo ou painel fotovoltaico.

É desejável que o módulo fotovoltaico seja posicionado no ponto de operação de máxima potência durante um determinado intervalo de tempo, e de acordo com as condições de temperatura e radiação solar incidente, para obter o Ponto de Máxima Potência (MPP) e a curva característica da corrente e tensão (I-V). Para tanto, ao instalar o PV, busca-se o alinhamento ótimo em relação a componente de irradiação direta.

1.1.2 Aplicações da energia solar

A tecnologia de sistemas fotovoltaicos tem provado sua viabilidade e importância nas diversas áreas de aplicações através da capturar, conversão, distribuição e uso da luz do sol para fins práticos, tais como:

a) Agropecuária

Captação de energia solar para a produtividade e cultivo de vegetais, frutas e flores permitindo durante todo o ano a produção e o crescimento em ambientes fechados de culturas especiais e não naturalmente adequadas ao clima local. Para o bombeamento de água, secagem de folhas, grãos e sementes, estufa para filhotes de ninhada e fermentação de esterco de animais para adubagem, geração e produção de energia elétrica e ou mecânica. E atualmente, tem sido usada em prensas de uva e em estufas de aquecimento solar para o amadurecimento de frutos.

b) Meteorologia

Possibilita monitorar e operar como torre micrometeorológica composta por sensores em ambientes externos ou internos. Oferecem dados de qualidade e precisos para validação de modelos matemáticos, estimativas e estudos climáticos dos dados instantâneos de temperatura, insolação e umidade relativa do ar (mínima máxima e média).

c) Medidor de energia solar

Equipamento de instrumentação eletrônica para medição de sistemas de energia renovável. Possibilita analisar as condições de irradiação de um determinado local; determinar a demanda energética de um sistema alternativo de energia; dimensionar os sistemas fotovoltaicos e estimar a geração de energia elétrica. Sistema eletrônico de aquisição de dados e de

controle para verificação dos valores reais de horas de iluminação solar, potencial solar e eficiência energética.

d) Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos

Dimensionamento de componentes necessários para instalação do sistema fotovoltaico. As baterias, sistema mais eficaz e econômico de armazenamento de a energia elétrica gerada; conversores que têm como função a transformação da corrente contínua das baterias (12, 24 e 48 V) para alternada (220 V); e de reguladores que protegem as baterias de sobrecarga, descarga excessiva e indicador de carga, corrente de carga e consumo das baterias. Visa o máximo aproveitamento da energia fornecida pelas placas fotovoltaicas, assim como a essencial garantia de proteção e utilização das baterias.

e) Medidor de radiação solar

Modelo proposto de piranômetro que utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino para efetuar a medição e registro de radiação solar incidente com interface com um computador. Possibilita ilustrar melhor as potencialidades e as especificações do sistema de aquisição de dados relativas à radiação solar em um local durante um tempo.

f) Centros de pesquisas

Desenvolvimento de pesquisa, inovação e ensino de fontes renováveis nas universidades, e centros de pesquisa nas áreas de equipamentos de medição, materiais e desenvolvimento de novos tipos de células solares fotovoltaicos para geração de energia.

g) Projetos arquitetônicos

Técnicas e soluções de redução de consumo de energia, tais como de iluminação e condicionadores de ar. Pode ser incorporados em estruturas já

existentes ou integrados a um “projeto solar”, que inclui brilho , fluxo de calor e tempo de uso.

h) Tecnologias térmicas

O sistema fotovoltaico pode ser usada para aquecimento de água, aquecimento e resfriamento de ambientes (mantém a temperatura do espaço em uma faixa confortável e redução da necessidade de aquecimento auxiliar e equipamentos de refrigeração) e geração de calor do processo, utilizada principalmente para aquecimento de piscinas e caldeiras.

i) Tratamento de água

A energia solar pode ser usada para tratamento e desinfecção de águas residuais sem produtos químicos ou eletricidade; destilação solar para ser usada como soro fisiológico ou água salobra potável, sistema mais econômicos para fins domésticos descentralizada.

1.1.3 “Kits” didáticos

Os “kits” didáticos são ferramentas alternativas para a introdução e aprendizado de novas tecnologias, visto que possibilita a realização de experimentos por meio de desenvolvimento de atividades em diversas áreas do ensino. Podem ser produtos eletrônicos, hardwares ou softwares que possibilitam ser utilizados como “ferramentas didáticas de abordagem” de conteúdos teóricos e procedimentos de atividades experimentais.

A importância das atividades experimentais para estudantes de nível médio à superior é indiscutível. Deste modo, o ponto de partida desse projeto considera que atividades experimentais são importantes para a formação do educando e dedica-se a construção de aparatos para auxiliar na experimentação dos conceitos, teoremas e leis da física apresentados em sala de aula (MAGNO et al. ,2004).

O uso de “kits” didáticos no ensino-aprendizagem, segundo Rothe-Neves et al. (2004), é importante tanto para motivar e desafiar estudantes e professores, como também para não limitar o acesso aos métodos tradicionais, que por sua vez, podem dificultar o entendimento e ocultar problemas inerentes a sistemas reais.

Para Carmo et al. (2008), o “kit” didático torna possível associar as teorias, experimentos práticos e funções de componentes eletrônicos tanto no desenvolvimento, operação e comandos do sistema quanto à aplicações em diversas áreas educacionais, tecnológica e inovação.

Em Abegg e Berlezi (2013) relata-se a utilização de recursos tecnológicos que permite aos estudantes um aprendizado mais adequado dos pré-requisitos técnico-teóricos necessários para o desenvolvimento de seu aprendizado ao longo do curso formativo profissional.

Para Moreno (2006), a educação tecnológica enfrenta diversos desafios, seja na relação ensino-aprendizagem, seja com relação às demandas sociais, ou ainda com os problemas oriundos do ensino médio ao superior.

Coelho et al.(2001) *apud* D.S. Bernstein (1998) citam que os exercícios práticos e em laboratório devem estar organizados e sincronizados com as aulas e exercícios teóricos. Entre os objetivos dos trabalhos práticos tem-se:

- Adquirir experiências e implementação utilizando-se experimentos e instalações atrativas;
- Balancear o treinamento teórico e prático;
- Envolver os estudantes em atividades de grupo no desenvolvimento de atividades práticas;
- Aplicar o conhecimento adquirido nas aulas teóricas em laboratório.

Então os “kits” didáticos são direcionados para o ensino em diversas áreas da física, química, biologia, matemática, assim como componentes multidisciplinares do ensino. Eles proporcionam novas maneiras de implementar produtos com interfaces homem-máquina; elaborar materiais didáticos interativos; dimensionar sistemas eletrônicos; estimar a geração de energia elétrica; desenvolver sistemas de aquisição de dados; e controle e monitoramento das atividades práticas realizadas pelo aluno.

Portanto, a necessidade na busca de uma ferramenta didática que permita realizar estes processos de forma prática, fácil e compacta durante as aulas convencionais em sala de aula, desafiam professores e, principalmente, alunos a buscar novas ideias e aplicações ao uso de novas fontes renováveis de energia, no caso o estudo da energia solar.

A aplicação e uso de kits ou módulos didáticos traz uma dinâmica ao aprendizado diferenciado e estimulante, que possibilita o estudante e professor a conhecer e experimentar sua utilização de forma confiável, segura, rápida e compacta.

- Confiável: eliminar erros de montagens e danos aos componentes;
- Segurança: evitar acidentes ao aluno, professor, sala de aula e laboratório;
- Rápida: montagem, manutenção e instalação simples em qualquer local interno ou externo, exercícios teóricos e práticos com visualização imediata;
- Compacta: projetado e desenvolvido em escala reduzida de fácil manuseio com todos os aplicativos utilizados em um sistema em escala real.

Para o ensino de sistemas de geração de energia a partir da fonte solar, o kit didático envolve conceitos, funcionalidade, materiais e aplicação em aulas práticas, que permite o estudante visualizar e a associação teórica descrita de todos os materiais eletrônicos com a prática e manuseio dos equipamentos de medição.

Para o ensino e formação técnica é importante a instrumentalização do futuro profissional para preencher à demanda das indústrias, mas também não deve se restringir apenas a reprodução e treinamento de tecnologias implantadas e em uso. A intenção de empreender novos projetos não pode ser levada adiante sem a atuação de diversos profissionais. Neste processo, o técnico aparece como um fator indispensável para a aplicação prática e desenvolvimento de um produto final.

Por definição, o técnico trabalha não só no projeto, mas principalmente com a construção física, implantação e treinamento, fases imprescindíveis em qualquer projeto de sucesso. Logo, para o desenvolvimento de “kits” didáticos, o projeto deve estar de acordo com cinco fases distintas:

- Entender: busca de novas mídias existentes para ensino, materiais didáticos que acompanham os kits poderiam incluir a descrição dos experimentos;
- Estudar: a usabilidade, ergonomia, qualidade dos dados obtidos, facilidade de utilização e à qualidade do material didático (quando fornecido);
- Projetar: projeto de um kit didático e seu respectivo material didático que busque sempre que possível, atender aos requisitos desejados e às deficiências identificadas em kits convencionais;
- Construir: o kit didático proposto será construído, e eventuais ajustes no projeto também serão feitos, caso necessário;
- Analisar: será colocado em utilização, dados coletados serão analisados, e a opinião de alunos, professores e especialistas no assunto será fundamental para que eventuais ajustes no projeto sejam feitos.

As realizações das atividades experimentais propostas poderão ser realizadas antes e durante a apresentação da teoria sobre o tema tratado, de forma clara e didática. O aluno deve ter um pré-conhecimento de eletrônica e instrumentos de medidas que serão utilizados durante as realizações das práticas.

Ao final do trabalho, espera-se um “kit” didático de nível técnico e acessível para auxiliar professores do ensino com experimentos em sala de aula. A interface homem-máquina deverá incorporar a aquisição dos dados obtidos nos experimentos e esperado uma precisão da leitura dos dados suficiente para aplicação didática.

1.1.4 Aplicações do “Kit” didático

O kit didático de geração de energia solar projetado para servir como ferramenta de ensino em aulas práticas, principalmente, de energias renováveis, eletrônica, acionamentos elétricos e instrumentação possibilitando uma maior interação, compreensão conceitual e prática, e desafios aos estudantes e professores.

Como finalidade específica de todo material didático o desenvolvimento e criatividade, assim como argumentação, raciocínio e instigar ao questionamento à

reconstrução, conforme relato de Demo (1998. p.45). Oferecer acesso às novas possibilidades e vantagens de conhecimento, experimentação, utilização de equipamentos de medição e proporcionar novas soluções nas áreas de geração de energia solar, meteorológica, geografia, matemática, agrícola, meio ambiente, pecuária, elétrica e entre outras.

Tem como objetivo principal estimular e desafiar o estudante a desenvolver sistemas de geração de energia solar, sedimentar o aprendizado em sala de aula, sendo multidisciplinar possibilitando sua utilização nas mais diversas disciplinas. A metodologia aplicada na confecção do kit didático e etapas do seu desenvolvimento propõem a facilidade de aplicação, experimentação didática e testes de conceitos básicos de projeto.

O kit didático de geração de energia solar introduz os princípios de energia fotovoltaica solar através de experiências práticas, os fundamentos e aplicações, e o incentivo ao uso de uma fonte de energia renovável e limpa.

As etapas inovadoras compõem em:

- Investigação bibliográfica;
- Utilização de diferentes componentes eletrônicos;
- Operação das células solares;
- Instalação de um sistema de aquisição de dados;
- Coleta, armazenamento e análise de dados;
- Interpretação dos dados;
- Montagem e operação;
- Geração e medição da energia elétrica;
- Cálculos e dimensionamento;
- Energia gerada a diferentes cargas;
- Áreas de aplicações apropriadas do uso da energia solar.

Assim como a revisão dos conceitos e o manuseio básico de:

- Estudo dos tipos de células solares;
- Utilização de energia renovável;
- Materiais de baixo custo e de qualidade.

Para o desenvolvimento das atividades didáticas envolvendo o estudo de geração de energia elétrica a partir da utilização de painéis solares fotovoltaicos, é indispensável à abordagem de conceitos que poderão ser discutidos e revisados através dos experimentos práticos criados.

Ao compreender cada etapa do funcionamento do sistema de energia solar, entenderá também as etapas de monitoramento, geração dos comandos e sequência de acionamento de cada dispositivo que será utilizado na confecção do kit didático.

Com o desenvolvimento do kit didático para o ensino-aprendizagem em cursos técnicos, tecnológicos e graduação, é possível sua utilização como uma nova ferramenta de tecnologia, inovação e incentivo ao uso de fontes renováveis de energia, aplicações e experimentos didáticos nas mais diversas áreas. Assim, pode-se, por exemplo, ser aplicado na agricultura no bombeamento de água, controle de estufas e irrigação; na meteorologia na previsão e coleta de variáveis climáticas, tais como temperatura, umidade, insolação; no meio ambiente no monitoramento do desmatamento; na geração de energia elétrica e como material didático.

O kit didático além de despertar e desafiar o aluno na busca de novas criações e aplicações possui entre outras vantagens, o baixo custo na sua confecção, também funcionará como “caixa aberta”, ou seja, permite facilidade de manuseio, manutenção e ajustes, assim como troca de funções e programação que será realizada pelo próprio aluno.

Visa facilitar o transporte para sala de aula e/ou laboratórios, por ser portátil possibilita sua utilização em locais externos e de difícil acesso. Com isto permite também ser usado como equipamento de medição para levantar o potencial de geração de energia elétrica através da energia solar em diferentes pontos de uma região ou estado, onde ainda não se possui redes de distribuição de energia elétrica de concessionárias. Determinando-se o potencial de geração pode-se investir em sistemas de geração através de painéis fotovoltaicos para atender a demanda de energia elétrica a comunidades isoladas e propriedades rurais locais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolvimento um “kit” didático de geração de energia solar para execução de atividades práticas a fim de contribuir para melhoria do ensino- aprendizagem em cursos técnicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um kit didático de nível técnico para o ensino de sistema de geração solar;
- Propor um material didático interativo, seguro e durável;
- Propor modelos de planos de aula para a realização das atividades práticas;
- Incentivar o aproveitamento de fontes renováveis.

1.3 Justificativa

No processo de ensino-aprendizagem em energia fotovoltaica solar é importante o auxílio de ferramentas didáticas nas atividades práticas que auxiliam a compreensão e aquisição de conhecimentos por parte dos alunos. Os “kits” didáticos são ferramentas apropriadas para o ensino, pois possibilitam demonstrar de forma prática, os conceitos, princípios de funcionamento e outras aplicações, permitindo a interação entre alunos e professor em todas as fases teórico-práticas. Desta forma, justifica-se o desenvolvimento desta ferramenta mais adequada ao cotidiano do aluno e especificamente direcionada para o ensino-aprendizagem.

1.4 Organização dos capítulos

Esta dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

No capítulo introdutório é realizado um enquadramento ao tema da dissertação, assim como a motivação, objetivos e justificativa no estudo de energia solar fotovoltaica, kits didáticos para o ensino-aprendizagem e aplicações.

No capítulo dois é apresentado a referencial teórico referente a energia solar fotovoltaica, assim como a modelagem de uma célula solar, suas características elétricas, fatores que afetam o rendimento e os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPP) dos painéis solares.

No capítulo três aborda-se a descrição e desenvolvimento do kit didático de geração de energia solar e seus respectivos componentes necessários e validação do banco de dados do sistema de aquisição.

No capítulo quatro serão abordados os planos de ensino propostos para as atividades práticas utilizando o kit didático no ensino técnico.

E finalizando, no capítulo cinco são apresentadas as considerações finais e trabalhos futuros, posteriormente as referências consultadas e anexos utilizados durante a realização da dissertação de mestrado.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Modelagem matemática de uma célula solar

Através dos estudos realizado por Villalva et al. (2009), a modelagem de uma célula fotovoltaica ideal, é emprego da Equação de Schokley da teoria de semicondutores, que descreve matematicamente as características I-V da célula fotovoltaica ideal, como mostra a equação:

$$I = I_{pv,cell} - I_{0,cell} \left[\exp\left(\frac{qv}{akT}\right) - 1 \right]$$

Onde $I_{pv,cell}$ é a corrente gerada pela luz incidente, I_d é a equação de Diodo Shockley, $I_{0,ccell}$ é a fuga de corrente no diodo, q é a carga do elétron ($1.60217646 \times 10^{-19} \text{C}$), k é a constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T é a temperatura da junção p-n (em Kelvin), e a é a idealidade do diodo constante. A Figura 6 mostra o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal.

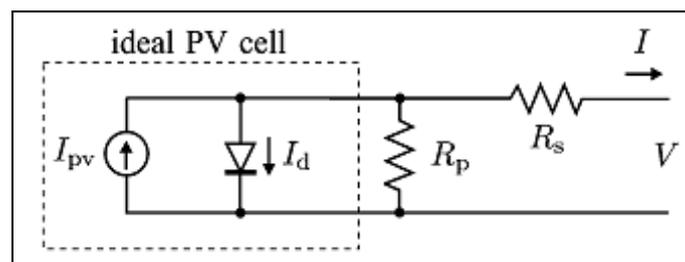


Figura 6 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal.
Fonte: (VILLALVA et al. ,2009).

As curvas características I-V relativas ao circuito equivalente (fig. 7) dependem das características internas do dispositivo (R_s e R_p) e influências externas, tais como o nível de radiação solar e temperatura. A energia gerada pela célula fotovoltaica depende linearmente da irradiação solar e da temperatura, de acordo com a equação abaixo.

$$I_{pv} = \left(I_{pv,n} + K\Delta T \right) \frac{G}{G_n}$$

Em que I_{pv} é a corrente gerada na condição nominal (25°C e 1KW/m²), em ampéres, $T = T_r - T_n$ (temperatura real e nominal em Kelvin), G (W/m²) é a radiação na superfície do dispositivo e G_n é a irradiação nominal.

A partir da equação anterior, originam-se as curvas características I-V como mostra a Figura 7.

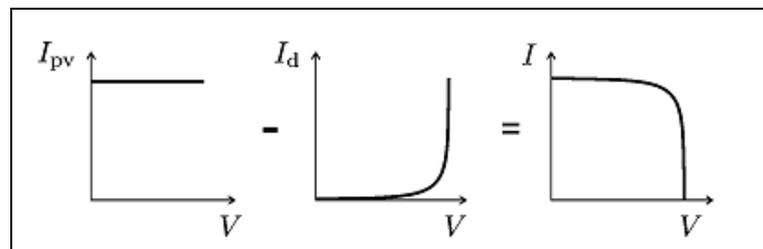


Figura 7 - Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica ideal.
Fonte: (VILLALVA et al., 2009).

Entretanto na prática, a equação elementar de uma célula fotovoltaica ideal não representa a característica da curva I-V. Em composições com painéis fotovoltaicos conectados em série, a observação das características nos terminais do painel requer a inclusão de parâmetros adicionais, como mostra a equação abaixo, (VILLALVA et al., 2009).

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

Onde V_t é a tensão térmica das células N_s conectadas em série. Células ligadas em paralelo aumentam a corrente, e células ligadas em série aumentam a tensão de saída. R_s é a resistência equivalente em paralelo.

Essa nova equação origina a curva característica I-V dos três pontos de observação do gráfico, são eles:

- Curto-circuito ($0, I_{sc}$),
- MPP (V_{mp}, I_{mp}),
- Circuito aberto ($V_{oc}, 0$).



Figura 8 - Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica na prática.
Fonte: (VILLALVA et al. ,2009).

Essa equação descreve o modelo com um único diodo, como o apresentado na Figura 1. Um diodo extra pode ser usado para representar o efeito da combinação de painéis fotovoltaicos. A simplicidade do modelo com um único diodo como método de ajuste de parâmetros é um modelo para desaines de eletrônica de potência que procuram um circuito equivalente para a simulação de dispositivos fotovoltaicos com conversores de energia.

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é influenciado pela intensidade luminosa e pela temperatura das células. Uma condição padrão para as curvas características é definida para a radiação de 1000 W/m^2 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na

célula. A corrente gerada pelo módulo aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa (CRESESB, 1999).

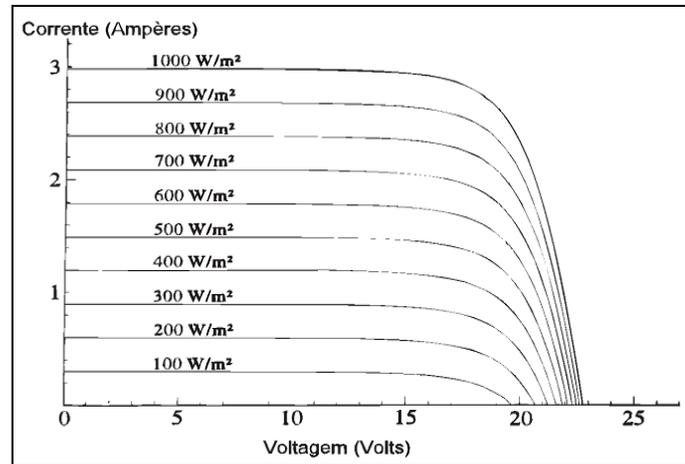


Figura 9 - Efeito da intensidade da luz na curva característica I-V.
Fonte: (VILLALVA et al. ,2009).

A incidência de um nível de insolação e a variação da temperatura ambiente implicam numa variação de temperatura nas células que compõem os módulos fotovoltaicos. Com o aumento do nível de insolação e da temperatura da célula, reduz-se a eficiência do módulo, pois a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura e a corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível (CRESESB, 1999).

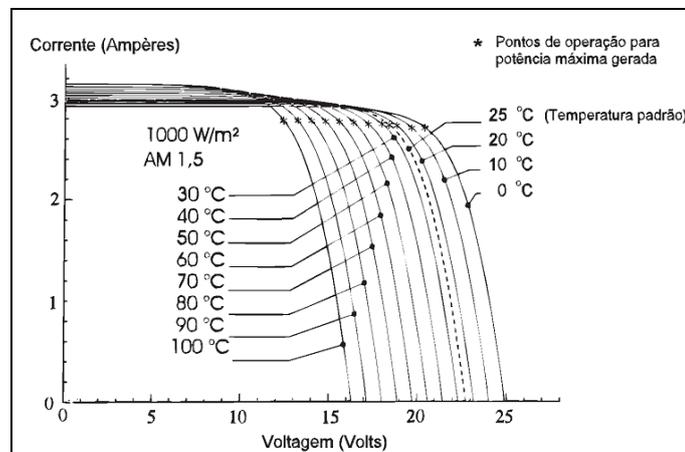


Figura 10 - Efeito da temperatura da célula na curva característica I-V.
Fonte: (VILLALVA et al. ,2009).

Martins et al. (2011) ressaltam que em um arranjo fotovoltaico, a tensão e a corrente de saída oscilam em função da radiação solar e da temperatura ambiente, tornando impossível assegurar a operação do sistema em um ponto específico com máximo rendimento. Na maior parte das aplicações, o ponto de operação desejado é aquele que a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico é otimizada por técnicas de rastreamento solar eletrônica.

2.2 Técnicas de rastreamento solar

As técnicas de rastreamento solar podem ser realizadas por localizadores solares físicos (hardwares), algoritmos (softwares) ou híbrido (softwares e hardwares) na busca do aumento da eficiência dos painéis solares que permitem uma constante orientação segundo a inclinação e ângulo azimute para que o ponto de máxima potência seja sempre atingido.

a) Localizadores físicos

O sistema é constituído por sensores integrados em um circuito elétrico microcontrolador de motores e engrenagens a partir da interpretação de dados coletados de insolação e temperatura por sensores específicos durante um determinado local e período. Há dois tipos de localizadores físicos: o seguidor solar de um eixo e dois eixos de rotação.

- Seguidor solar de um eixo de rotação

Podem efetuar o seguimento do Sol ao longo do dia, orientando-se segundo o ângulo azimute para que os módulos possam estar sempre na perpendicular à radiação solar.

- Seguidor solar de dois eixos de rotação

Mantêm sempre uma orientação ótima em relação ao Sol e maiores produções de energia. Estes sistemas são utilizados em instalações ligadas à rede de média e grande dimensão em locais de boa radiação e área disponível.

b) Localizadores algoritmos

O sistema dividido em algoritmo de rastreamento que recebe as informações do arranjo fotovoltaico, executa os cálculos, define o melhor ponto de operação e estágio de potência responsável por fazer o arranjo fotovoltaico operar no ponto definido pelo algoritmo.

- Estágio de potência

É o posicionado entre o arranjo fotovoltaico e a carga, processando toda a potência gerada. O estágio é constituído por um conversor CC-CC, controlado através da razão cíclica D . Quando operando como um rastreador do ponto de máxima potência (MPPT), o conversor CC-CC é controlado de maneira a extrair a máxima potência possível e entregá-la a carga.

- Arranjo fotovoltaico alimentando carga resistiva

O arranjo fotovoltaico e carga compartilham a mesma corrente e estão submetidos à mesma tensão. Consequentemente o ponto de operação é definido pela intersecção da curva de geração do arranjo fotovoltaico com a curva da carga referente à resistência da carga, visando maximização da potência gerada.

- Módulo fotovoltaico alimentando carga com característica de fonte de tensão

São usados para suprir cargas com características de fonte de tensão. Aplicado em sistemas fotovoltaicos para carga de baterias e sistemas interligados à rede em dois estágios, em que a saída do conversor aplicado

ao rastreamento é mantida constante pelo segundo estágio. O tipo de carga e a característica estática do conversor influenciam diretamente no comportamento do rastreamento.

c) Localizadores híbridos

Para compensar a baixa eficiência das células solares e o alto custo de instalação dos PV's, o máximo aproveitamento da capacidade de geração de energia elétrica é obtido através da operação no Ponto de Máxima Potência (MPP). Seguel (2009) afirma quando maior o tempo possível de operação dos painéis fotovoltaicos no MPP, maior a eficiência global do sistema. Para garantir essa situação é necessária uma técnica para procurar este ponto. As técnicas baseadas nesse princípio são chamadas de Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking).

As principais técnicas MPPT desenvolvidas são de Tensão Constante (CV – Constant Voltage), Perturbação e Observação (P&O – Perturbation and Observation), Condutância Incremental (IncCond – Incremental Conductance) e Hill Climbing (HC), técnicas que variam em muitos aspectos quanto a complexidade, velocidade de convergência, custos, sensores necessários, escala de eficácia e implementação em hardwares (SEGUEL, 2009). Na seção 2.5 (pág.34) serão descritas cada técnica e seu princípio de funcionamento.

2.3 Características elétricas do painel fotovoltaico

A potência dos módulos fotovoltaicos é representada pela potência máxima de pico (P_{mp}) em relação à tensão e corrente de funcionamento. Para isto, é necessário o estudo da tensão e corrente do módulo em diferentes condições, tais como:

a) Tensão de circuito aberto (V_{oc})

É o máximo valor da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico, quando nenhuma carga está conectada a ele (a vazio). O seu valor é fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

b) Corrente de curto-circuito (I_{sc})

É o valor máximo da corrente de carga nominal, portanto à corrente gerada por efeito fotovoltaico. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

c) Curva característica da corrente e tensão (I-V)

De acordo com as mudanças de condições de carga, novos valores de corrente e tensão são medidos, os quais podem ser representados no gráfico da curva característica I-V, (fig. 11). Normalmente estas curvas estão associadas às condições climáticas em que foram submetidas, de intensidade da radiação, temperatura ambiente, vento, massa de ar e sujidade.

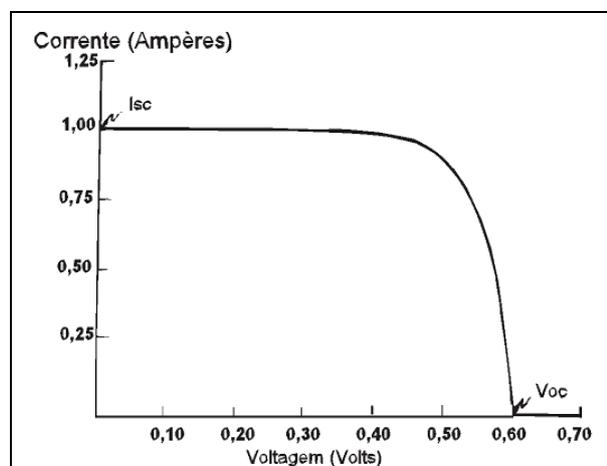


Figura 11 - Curva característica I-V típica de uma célula fotovoltaica.
Fonte: (CRESESB, 1999).

Para cada ponto de operação da curva I-V, a relação entre a corrente e tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. Para extrair o máximo potencial de um módulo fotovoltaico, existe somente uma tensão e uma corrente correspondente, conforme a Figura 12.

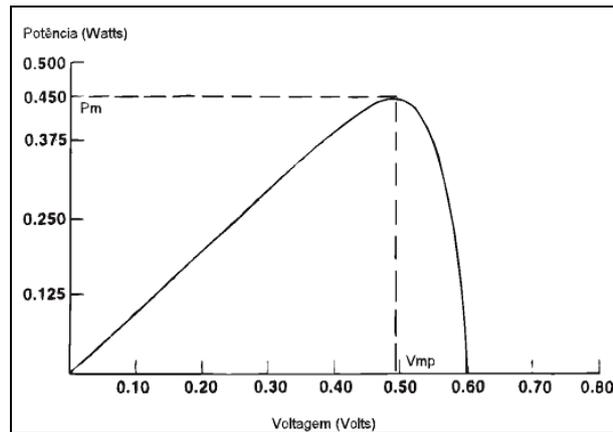


Figura 12 - Curva típica de P-V para a célula fotovoltaica.
Fonte: (CRESESB, 1999).

O ponto de potência máxima corresponde ao produto da tensão de potência máxima (V_{mp}) e corrente de potência máxima (I_{mp}). Os valores P_m , V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} e I_{sc} são os cinco parâmetros que especificam o produto sob dadas condições de radiação, temperatura de operação e massa de ar. A Figura 13 mostra a curva característica I-V superposta à curva de potência para análise dos parâmetros.

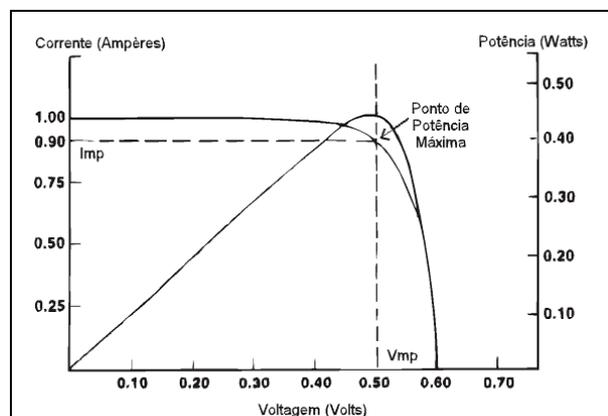


Figura 13 - Parâmetros de potência máxima.
Fonte: (CRESESB, 1999).

d) Fator de Forma (*FF*)

O Fator de Forma (*FF*) é expresso quanto à curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama I-V. Quanto melhor a qualidade das células no módulo, mais próxima retangular será a curva característica I-V (CRESESB, 1999).

Portanto conhecida à curva característica I-V de uma célula ou um módulo fotovoltaico pode-se calcular:

- Potencia Máxima (P_m)

$$P_m = I_{mp} V_{mp}$$

- Eficiência (η)

$$\eta = (I_{mp} V_{mp}) / (A / I_c)$$

- Fator de Forma (*FF*)

$$FF = (I_{mp} V_{mp}) / (I_{SC} / V_{OC})$$

Onde

I_{mp} = corrente de potência máxima de pico;

V_{mp} = tensão de potência máxima de pico;

I_{SC} = corrente em curto-circuito;

V_{OC} = tensão de circuito aberto;

I_c = diferença entre a luz incidente e a potência luminosa incidente em W/m².

A = área retangular útil da curva característica I-V do módulo em m².

2.4 Fatores que Afetam o rendimento da célula fotovoltaica

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é influenciado quanto ao tipo ou material, intensidade luminosa e temperatura das células solares. Uma condição

padrão é definida a radiação de 1000 W/m^2 e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ na célula para determinar as curvas características de I-V.

a) Tipos de células

A eficiência de conversão fotovoltaica da energia solar de está em função ao tipo de material e o processo de fabricação principalmente. Existem diversos tipos, células e películas fotovoltaicas demonstradas pelo fluxograma na Figura 14 a seguir:

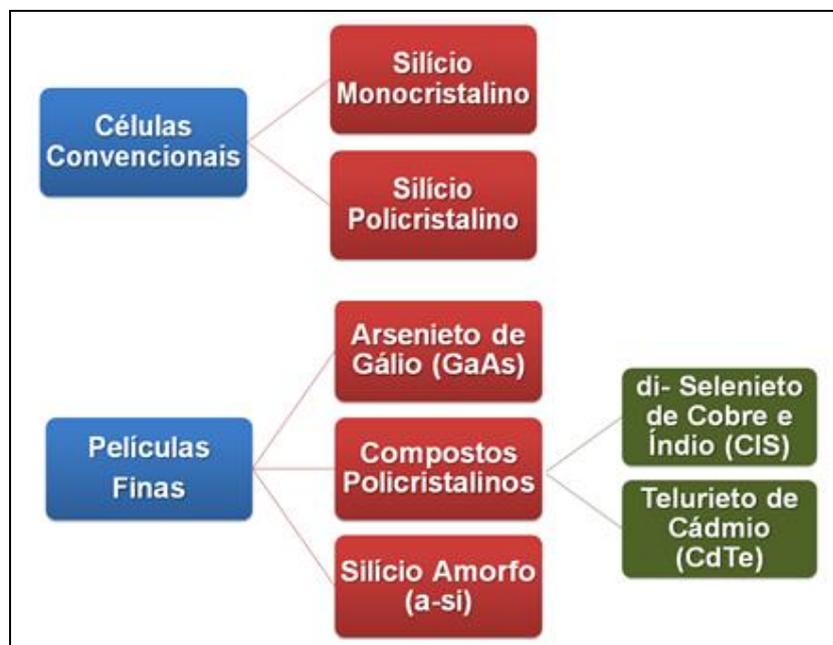


Figura 14 - Tipos, células e películas fotovoltaicas.

O silício, um dos elementos mais abundante encontrado na superfície terrestre e o principal semicondutor utilizado nas células fotovoltaicas, propicia uma solução energética sustentável de baixo custo. Descrição das principais células existentes no mercado:

- Silício monocristalino

As células são formadas em fatias de um único cristal, previamente crescido e fatiado, é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico. A grande experiência na sua fabricação e pureza do material garantem alta confiabilidade do produto e altas eficiências. Devido às quantidades de material utilizado e à energia envolvida na sua fabricação, esta tecnologia apresenta sérias barreiras para redução de custos, mesmo em grandes escalas de produção e elevado período de retorno do investimento.

- Silício policristalino

São fabricadas a partir do mesmo material que é solidificado em forma de um bloco composto de muitos pequenos cristais. A presença de interfaces entre os vários cristais reduz a eficiência destas células. Na prática os produtos disponíveis alcançam eficiências inferiores das oferecidas em células monocristalinas.

- Película ou filmes finos

Apesar de possuírem baixas eficiências, as células de película fina apresentam-se como alternativa promissora ao silício, por ser altamente resistentes aos efeitos de sombreamento, luz visível e a temperaturas elevadas. Estas apresentam custos de produção mais baixos.

- Silício amorfo

São compostas por um suporte de vidro ou de outra matéria sintética, na qual é deposta de uma camada fina de silício. Apresentam como vantagens o fato de reagirem melhor à luz difusa e à luz fluorescente, apresentarem melhores desempenhos a temperaturas elevadas e rendimento mais baixo do que nas células cristalinas, mas a corrente produzida é razoável.

Outros tipos de células que estão sendo desenvolvidas e devem ser consideradas.

- Células nanocristalinas sensibilizadas com corantes

Em fase de desenvolvimento e comercialização, índices elevados em desempenho a temperaturas elevadas e baixos níveis de radiação.

- CIGS

Utilizam na sua composição Cu (In,Ga) e Se₂ (Cobre, Índio, Gálio, Selênio) . Existem alguns problemas de abastecimento uma vez que 75% do índice distribuído comercialmente estão a ser utilizado na produção de LCD e monitores de plasma.

- Arsenito de Gálio (GaAs)

É atualmente a tecnologia mais eficaz apresentando níveis de eficiência, mas seu preço é extremamente elevado utilizando-se, sobretudo em aplicações arquitetônicas diversas, devido às vantagens de utilizarem tecnologias de películas finas que permitem a passagem parcial de luz e espaciais (coletores solares em satélites, por exemplo).

- Telureto de Cádmiio (CdTe)

Embora constituam um pouco mais de 1% do mercado de energia solar fotovoltaica, a sua utilização é pouco apelativa devido ao elevado nível de toxicidade do cádmio.

Em função do material e da tecnologia utilizada, as células solares podem variar a eficiência na conversão da luz solar em eletricidade, ou seja, faixa de radiação para a qual a célula funcionará de modo mais eficiente e influência sob diferentes condições de radiação. A Tabela 2 apresenta a eficiência de conversão típicas e teóricas das diferentes tecnologias em célula fotovoltaica.

Tabela 2 – Tecnologia e aplicações das células fotovoltaicas.

Tecnologia / (%)	Em indústria	Em aplicações	Em laboratório
Monocristalino	12 - 16	22,7	24,2
Policristalino	11 - 14	15,3	18,6
Amorfo	6 - 8	10,2	12,7
Película Fina	5 - 7	9,0	10,0
CIS, CIGS	4 - 7	10,0	18,0
CdTe	7 - 9	8,1	16,0

Fonte: (RÜTHER, 1993) e (VALENTE, 2011).

Pode-se observar que as células de silício monocristalinas apresentam maior rendimento em condições STC (Standard Test Conditions) radiação solar de $1\text{KW}/\text{m}^2$ e temperatura de 25°C , embora tenha um custo mais elevado.

b) Intensidade luminosa

O sol possui movimento aparente no céu de acordo com a hora do dia e com o dia do ano. Para receber maior intensidade luminosa é necessário o acompanhamento deste movimento. Para os módulos fotovoltaicos são instalados em posição fixa, é fundamental determinar a melhor inclinação para cada região em função da latitude local e das características da demanda (CRESESB, 1999).

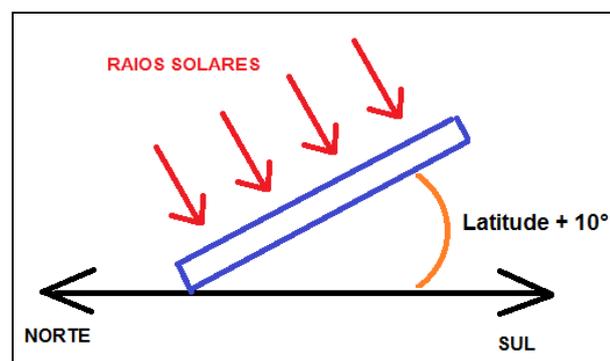


Figura 15 – Ângulo de inclinação dos PV's.

O ângulo de inclinação dos PV's e o efeito da intensidade luminosa influenciam na variação da curva característica I-V, ou seja, com o aumento do índice de intensidade luminosa sob a área do PV, a corrente gerada aumentará linearmente.

c) Temperatura das células solares

A incidência de um nível de insolação e a variação da temperatura ambiente implicam numa variação de temperatura nas células que compõem os módulos fotovoltaicos. O aumento do nível de insolação aumenta a temperatura da célula e conseqüentemente tende a reduzir a eficiência do módulo. Isto se deve ao fato de que a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura enquanto que a corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível. A Figura 10, mencionada anteriormente, demonstra os efeitos causados pela variação da temperatura no comportamento da curva característica I-V, para diferentes níveis de radiação solar, a qual o PV é submetido (CRESESB, 1999).

d) Temperatura de operação nominal da célula solar

A temperatura de operação nominal da célula solar (NOCT) é definida como a temperatura atingida pelas células em circuito aberto (tensão de curto-circuito) de acordo com as condições de especificações de funcionamento em:

- Incidência solar na superfície da célula = 800 W / m^2 ;
- Temperatura do ar = $25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Velocidade do vento = 1 m / s ;
- Massa de ar = 1,5.

Com o aumento da temperatura da célula, a corrente fornecida pelo sistema tem aumento de aproximadamente $6\text{mA}/^\circ\text{C}$ para cada centímetro

quadrado de área da célula solar, posteriormente a diminuição de voltagem no circuito de $-2,3\text{mV}/^\circ\text{C}$ para cada célula do painel (MARKVAT, 1994).

A diferença entre a temperatura da célula solar de referência ($T_{C_{ref}}$) e a temperatura ambiente (T_a) é diretamente proporcional à radiação incidente (G), ou seja:

$$T_{C_{ref}} - T_a = \frac{NOCT - 20}{0,8} G$$

Em que:

$T_{C_{ref}}$ = temperatura de referência da célula solar;

T_a = temperatura do ambiente;

G = radiação incidente de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Os valores de NOCT para módulos fotovoltaicos comercialmente variam de 42°C a 46°C , de modo que valores da Constante de temperatura (C_t) encontram-se na faixa entre $0,027$ e $0,032$ $^\circ\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$, ou seja:

$$C_t = \frac{NOCT(^{\circ}\text{C}) - 20}{800\text{W} / \text{m}^2}$$

Quando o parâmetro NOCT é desconhecido, pode-se adotar aproximadamente $C_t = 0,030^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ (FUENTES, 1984).

2.5 Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

O kit poderá ser aplicado como material didático também no ensino superior no estudo de MPPT, mas requer conhecimentos avançados de controle de sistemas e eletrônica de potência para a aplicação do material didático no nível superior.

Para compensar a baixa eficiência e o alto custo de instalação dos painéis fotovoltaicos, o máximo aproveitamento da capacidade de geração de energia

elétrica é obtido através da operação no Ponto de Máxima Potência (MPP), ressalta Seguel (2009).

Quando maior o tempo possível de operação dos painéis no MPP, maior a eficiência global do sistema. Para garantir essa situação, é necessária uma técnica para procurar este ponto. As técnicas baseadas nesse princípio são chamadas de Técnicas de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking), tais como:

a) Técnica de Tensão Constante (CV)

É baseada que no fato da tensão de máxima potência (V_{max}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}) tem aproximadamente uma relação linear independente de qualquer condição de radiação solar e temperatura.

$$V_{max} \approx K_1 V_{oc}$$

Em que k_1 , chamado fator de tensão, depende das características do arranjo fotovoltaico utilizado. Este fator de tensão é geralmente calculado por meios empíricos, determinando V_{max} e V_{oc} para diferentes condições meteorológicas de radiação solar e temperatura. A Figura 16 mostra o fluxograma de funcionamento e o diagrama de blocos da Técnica CV.

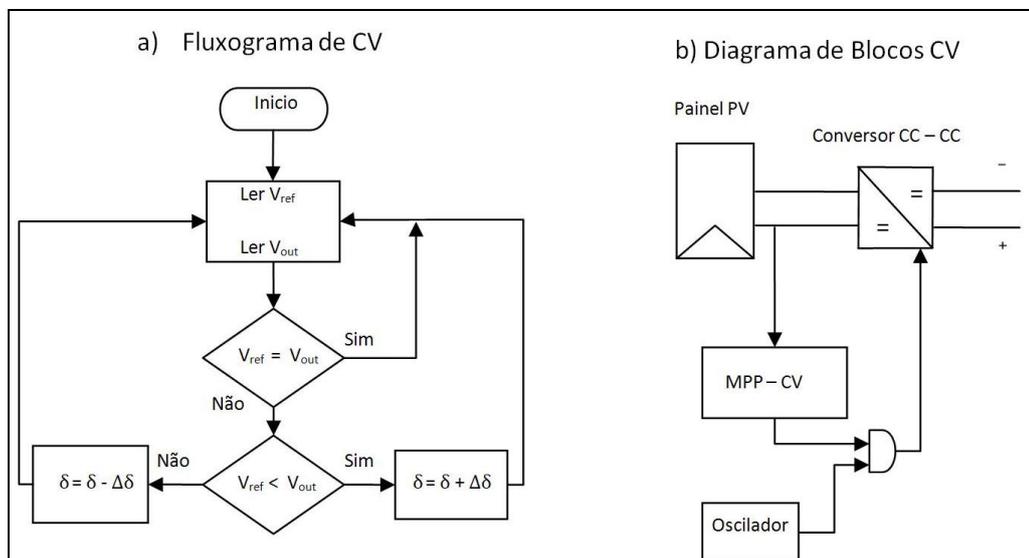


Figura 16 – Técnica de tensão constante (CV).
Fonte: (BONIFÁSIO, 2010).

b) Técnica de Perturbação e Observação (P&O)

Sua implementação consiste em *perturbar* a tensão do arranjo solar em uma dada direção e *observar* o comportamento da sua potência de saída. Se a potência aumentar, a perturbação continua na mesma direção, caso contrário o sistema é perturbado na direção contrária.

O processo descrito é repetido periodicamente e percebe-se que o MPP nunca será atingido, pois a técnica estará sempre perturbando a tensão do arranjo solar. Abaixo, a Figura 17 mostra o fluxograma e o diagrama de blocos da Técnica P&O.

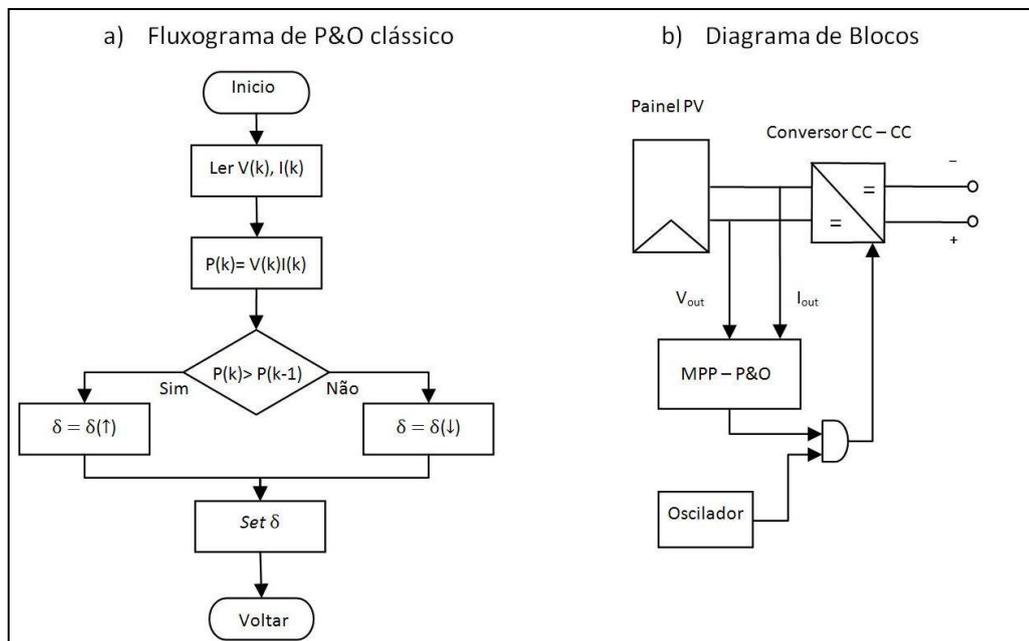


Figura 17 – Técnica de Perturbação e Observação (P&O).
Fonte: (BONIFÁSIO, 2010).

c) Técnica de Condutância Incremental (INcCod)

A curva de potência em relação à tensão do arranjo solar de painéis fotovoltaicos é utilizada para a busca do MPP que se baseia nos valores da condutância instantânea e incremental do painel fotovoltaico. Essas grandezas são obtidas pelas medições de corrente e tensão do arranjo solar.

A derivada da potência de arranjo fotovoltaico em relação à tensão pode-se escrever da seguinte forma:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}$$

Dividindo cada membro por V positivo, a derivada de P em relação V é igual a

$$\frac{1}{V} \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}$$

ou seja, à soma da condutância instantânea e a condutância incremental.

A técnica permite avaliar em que lado da curva de potência o sistema se encontra e identifica quando o sistema está operando no MPP, pois nessa condição é:

$$\frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} = 0$$

Quando é atingido, não é necessário alterar o ciclo de trabalho do conversor, pois significa que está operando no ponto MPP e a tensão de referência deve ser mantida, evitando problema de oscilação do ponto de operação em torno do MPP (SEGUEL, 2009).

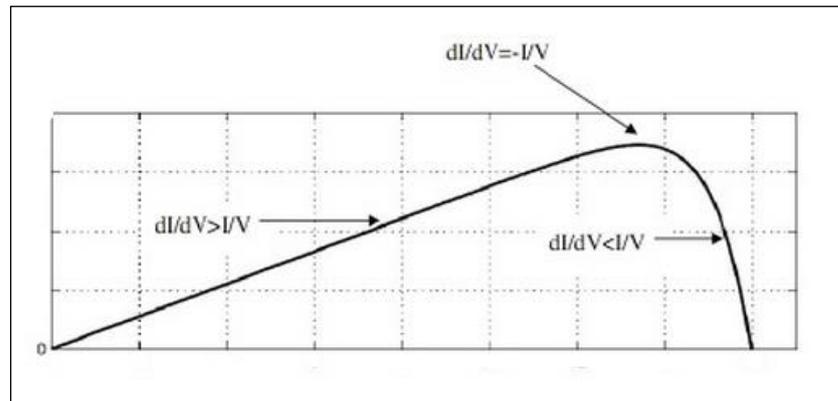


Figura 18 - Curva característica da P – V.
Fonte: (JIANG, 2005).

A Figura 19 mostra a Técnica de Condutância Incremental com auxílio do conversor para operar no ponto MPP.

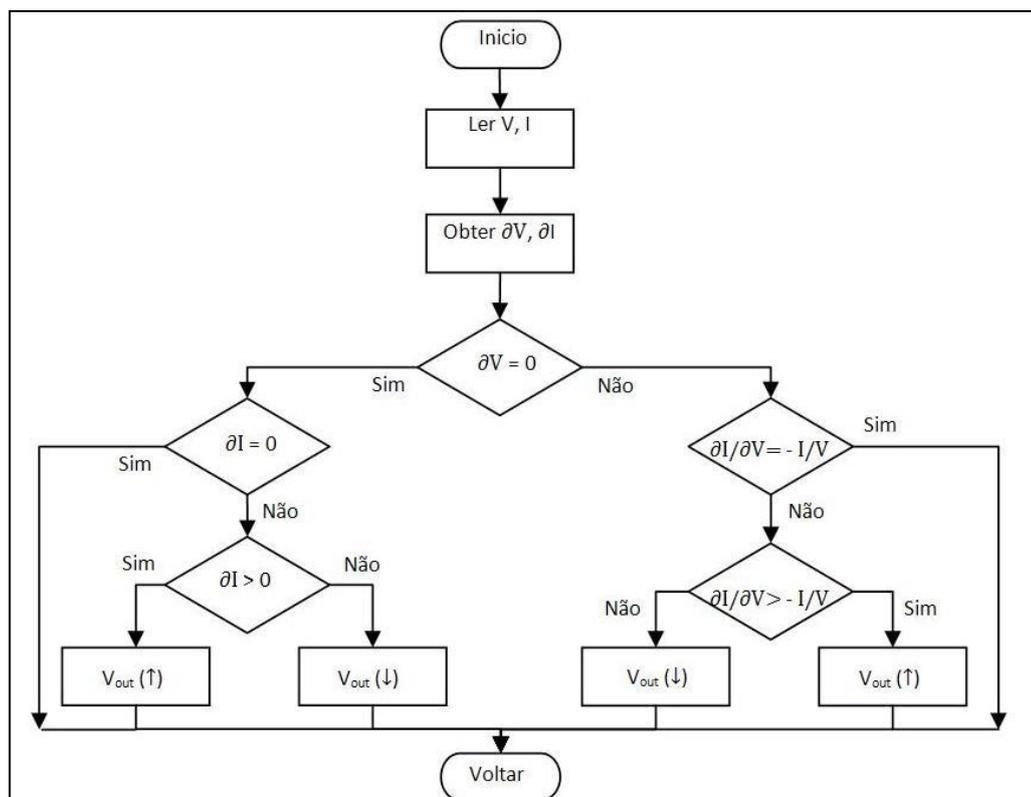


Figura 19 – Técnica de Condutância Incremental (INcCod).
Fonte: (BONIFÁSIO, 2010).

d) Técnica de Hill Climbing (HC)

Conhecida como técnica de subida de colina, este processo funciona aumentando ou diminuindo o ciclo de trabalho de um conversor CC-CC, e observar seu impacto sobre a potência de saída. Esta potência é comparada ao seu valor anterior e de acordo com o resultado da comparação, o sinal de inclinação, ou é complementada ou permanece inalterada. Então o ciclo de trabalho PWM de saída é alterado em conformidade (DAOUD e MIDOUN, 2008).

O método é adaptativo a perturbações ambientais, por exemplo, a contaminação da superfície do painel fotovoltaico, a degradação do desempenho elétrico ao longo dos anos, e assim por diante. No entanto, leva um tempo consideravelmente longo para buscar o ponto de potência máxima por causa das operações sucessivas. A Figura 20 mostra detalhadamente a Técnica de Hill Climbing com o conversor CC-CC.

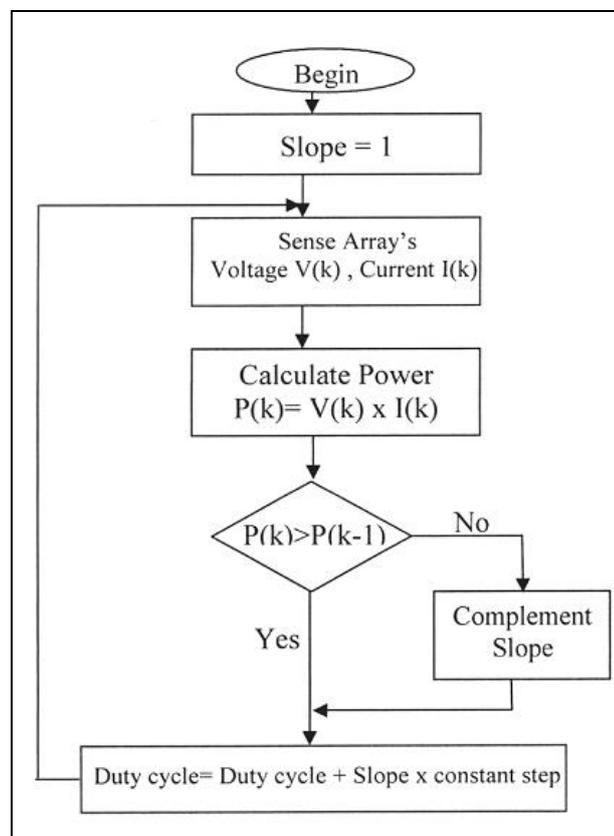


Figura 20 - Técnica de Hill Climbing (HC).
Fonte: (BONIFÁSIO, 2010).

A Tabela 3 apresenta resumidamente das vantagens e desvantagens das principais técnicas do MPPT para o máximo aproveitamento da capacidade de geração de energia elétrica.

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens das técnicas do MPPT.

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Tensão Constante	Utilização de um único sensor para leitura da tensão e de fácil implementação.	Erro de rastreamento do ponto de máxima potência.
Perturbação e Observação	Atuação nas proximidades do MPP independente das condições de radiação solar e temperatura em regime permanente.	Uso de sensores para leitura de tensão e corrente. Erro de rastreamento sob mudanças rápidas de radiação solar (velocidade ou precisão).
Condutância Incremental	Relaciona velocidade, precisão de rastreamento e detecção do MPP.	Uso de dois sensores para leitura de tensão e corrente, implementação mais complexa e a necessidade de cálculo de derivadas.
Hill Climbing	Uso de um conversor CC-CC para o melhoramento do comportamento da potência de saída.	Implementação e influências ambientais de longo prazo (anos).

Novas técnicas em estudo:

a) Técnica da fonte emuladora

Uma fonte emuladora ou fonte de tensão de um painel fotovoltaico é baseada na caracterização de um conversor, utilizando curvas de polarização para diferentes níveis de irradiação solar. Curvas adicionais podem ser obtidas numericamente através das curvas I-V para aproximações razoáveis. A irradiação solar e a corrente de carga são variáveis de entrada.

b) Técnica da tensão em circuito aberto

O funcionamento de um seguidor de tensão em circuito aberto (OV) é muito semelhante à do sistema de seguimento da corrente de curto-circuito, sendo este aplicado à tensão. A tensão no MPP tem uma relação em percentual próxima da tensão em circuito aberto (V_{ca}), sendo que variações na temperatura e radiação solar modificam este valor em $\pm 2\%$. De um modo geral é utilizado o valor de 76% da tensão em circuito aberto para o valor de tensão no ponto de máxima potencia (V_{MPP}).

De modo análogo a tensão em curto-circuito (SC), a Tensão de circuito aberto (OV) requer que o painel seja desligado do conversor de modo a medir a tensão em aberto, com os inconvenientes que acarreta.

c) Técnica da edição da temperatura

A tensão em vazio da célula solar varia principalmente com a temperatura que se encontra. Obtendo-se os valores da temperatura da célula solar, tensão e/ou radiação solar incidente é possível encontrar o ponto de funcionamento MPP do painel.

d) Técnica da célula piloto

No método da célula piloto é utilizada uma célula solar com as mesmas características das presentes em um painel fotovoltaico. Esta se encontra posicionada junto com o painel de modo a estar sujeita às mesmas condições de radiação solar e temperatura das demais células solares.

Um algoritmo do seguidor de tensão em circuito aberto (OV) ou de tensão em curto-circuito (SC) é primeiramente aplicado sobre a célula solar piloto, quando o MPP da célula é encontrado, os resultados são aplicados nas demais células do painel fotovoltaico. Este método elimina as perdas provocadas por métodos para medir I_{sc} e V_{ca} . A célula solar utilizada tem de ser selecionada cuidadosamente para que possa refletir corretamente o comportamento do painel fotovoltaico e deve estar nas mesmas condições gerais que o resto do painel para não levar a um MPP errado.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento do Kit Didático

O kit didático de geração de energia solar para o ensino e atividades práticas é constituído por células solares e sistema de aquisição de dados. A eficiência de funcionamento de um kit didático desta natureza depende de um sistema de aquisição de dados composto por sensores adequados a medição das variáveis ambientais, tais como, temperatura do ar, umidade do ar, radiação solar, luminosidade, e entre outras, a qual uma célula solar fotovoltaica é submetida.

Com a utilização de sensores de precisão e medição das variáveis, bem como instrumentos de aquisição e armazenamento de dados, torna-se possível o estudo do comportamento e funcionamento de uma célula solar.

Sensores semicondutores do tipo analógico como o LM35 é um sensor de temperatura linear, pode ser usado para detectar temperatura do ar ambiente, opera como circuito integrado e oferece precisão $0,75^{\circ}\text{C}$ e $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, tensão de saída proporcional à temperatura. Possui com desvantagem a alta sensibilidade às interferências eletromagnéticas e aquecimento externo dos demais componentes da placa eletrônica, tornando-se inviável em um sistema de aquisição de dados que exija precisão e confiabilidade.

Outro sensor semiconductor muito utilizado é o diodo LN4148, para pequenos sinais de baixa intensidade e alta frequência. Possui resposta linear para temperaturas entre 0°C a 80°C , entretanto o dispositivo necessita de condicionamento de sinal e não mede temperaturas superiores a 80°C em insolação de $1025\text{ W}/\text{m}^2$, a qual a superfície dos PV's atinge temperaturas aproximadas a 90°C .

Ao iniciar o estudo e desenvolvimento do sistema de aquisição de dados, buscamos primeiramente respostas instantâneas, precisas e que apresentasse um baixo custo.

O Fluxograma da Figura 21 representa o Kit didático de geração de energia solar constituído em três (3) módulos fundamentais para o ensino-aprendizagem: Matriz solar, Placa de aquisição de dados e Computador.

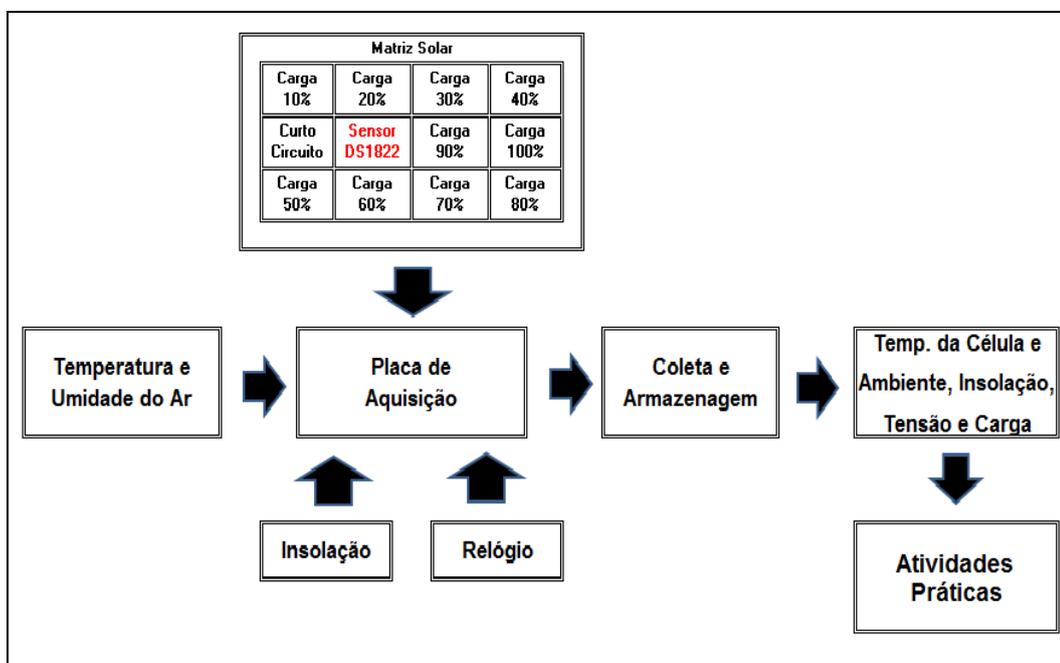


Figura 21 - Fluxograma do Kit didático de geração de energia solar.

A seguir são listados os principais materiais e respectivas especificações técnicas dos módulos utilizados para a confecção do kit didático.

3.1.1 Matriz solar

Composta por doze células solares de silício monocristalina, sendo dez células operando com diferentes cargas, uma célula solar funcionará junto com o sensor de temperatura digital DS1822, técnica baseada para a medição da temperatura na superfície traseira da célula solar, e outra célula solar de reserva para futuras medições.

Cada célula solar foi fixada e isolada individualmente para que não haja interferências externas (umidade) e interferências de operação, ou seja, cada célula solar irá trabalhar com determinada carga, independentes das demais fixadas na matriz solar. Portanto a corrente gerada por cada célula aumentará linearmente com o aumento da intensidade luminosa e sucessivamente aumentando a temperatura,

fazendo com que a eficiência de cada célula diminua nos pontos de operação de potência máxima gerada, e vice-versa.

Foram utilizados resistores, especificados na Tabela 4 como carga para cada célula. Os cálculos das resistências foram realizados a partir de medições de tensão e corrente, com o auxílio de um potenciômetro resistivo variando a resistência relativa e fazendo a leitura de tensão e corrente para estabelecer o valor de precisão de resistência de cada célula solar.

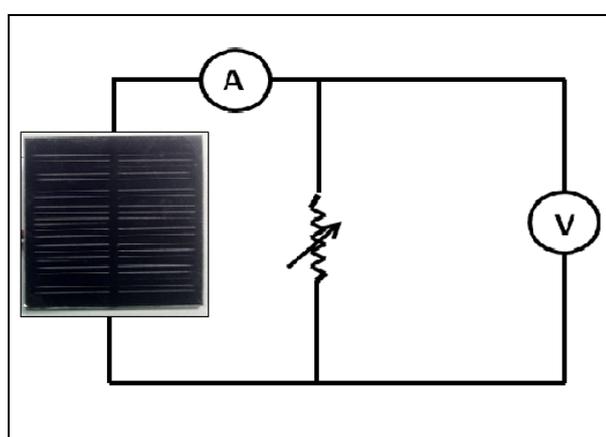


Figura 22 – Circuito esquemático para a medição de tensão e corrente.

Tabela 4 - Resistores reais considerando rendimento máximo de 1025 W/m².

Nº da Célula	Carga (% da corrente)	Tipo de Ligação	Resistores Reais em ohm (Ω)	Resistores medidos em 26/05/2012
1	90	Paralelo	47 // 390	42
2	80	-----	47	47
3	70	Paralelo	100 // 120	55
4	60	Série	47 + 22	69
5	50	Série	47 + 33	80
6	40	Paralelo	150 // 270	96
7	30	-----	135	135

(continua)

(continua)

Nº da Célula	Carga (% da corrente)	Tipo de Ligação	Resistores Reais em ohm (Ω)	Resistores medidos em 26/05/2012
8	20	Série	150 + 47	197
9	10	-----	390	390
10	0	Vazio	0	0

Sabendo-se a tensão sobre cada resistor e o valor da resistência determinada para cada célula solar, calcula-se a corrente fornecida por cada uma das células solares da matriz solar.

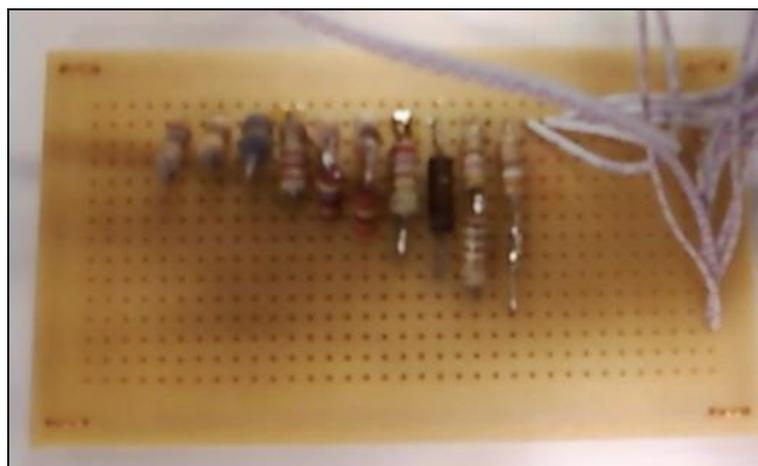


Figura 23 - Resistores soldados de cada célula solar.

O uso das células solares monocristalinas no sistema de eletrônico de tensão nominal máxima de $4,6V \pm 8\%$, torna possível a aquisição dos dados realizado pelo microcontrolador PIC 16F877 de tensão 5V, utilizado no desenvolvimento do “kit” didático, sem a necessidade de nenhum circuito de condicionamento de sinal (amplificar, filtrar ou equalizar) para eliminar uma possível fonte de erro (induzir erros de medição).



Figura 24 - Matriz solar composta 12 células solares.

Esta célula fotovoltaica de silício monocristalina¹ é capaz de prover aproximadamente 4V, 100 mA com insolação direta. A seguir, a Tabela 5 mostra as especificações do fabricante da célula solar em condições de operação de 25°C a 1000 W/m². Demais especificações técnicas como NOCT, %V/°C e %W/°C não são fornecidas pelo o fabricante.

Tabela 5 – Especificações técnicas da célula fotovoltaica SW 0,4W.

Potência Máxima (P_{pm}) de 0,4 W
Corrente de Curto – Circuito (I_{sc}) de 105 mA
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) de 4,6 V
Corrente Máxima (I_{mp}) de 100 mA
Tensão Máxima (V_{mp}) de 4,0V

Fonte: (<http://www.newcenturysolar.com>).

¹ Informações do referente ao fabricante, modelos, venda e fornecedores do produto no site (<http://www.newcenturysolar.com>).

3.1.2 Placa de dados

O Módulo educacional CUSCOPIC² é um projeto destinado ao desenvolvimento de aplicações utilizando-se uma estação padronizada para microcontroladores. Desenvolvida pelo professor Daniel Corteletti, do SENAI-Mecatrônica de Caxias do Sul (RS) é hardware livre que pode ser livremente utilizado e alterado, desde que referenciado o autor.

Optou-se pela plataforma CUSCOPIC para o desenvolvimento do “kit” didático pela facilidade de programação, visualização do funcionamento e montagem. Além disso, por utilizar o microcontrolador PIC16F877, que torna-se adequada para comandos eletrônicos. Possui interface homem-máquina com display LCD 16X2, teclado, buzzer, e até 24 entradas/saídas configuráveis, sendo 6 delas livres para a entrada de sinais de sensores e 18 delas aptas para acionamento de relés.

Suas principais vantagens são a programação de baixo nível, aplicação rápida e pode ser usada em sistemas de tempo real. Possui muitos periféricos integrados, possibilitando integrar os conceitos de eletroeletrônica, computação e programação, mas é necessário um domínio mínimo de conceitos de eletrônica para a montagem da placa com seus respectivos componentes, bem como conhecimento de programação de microcontrolador.

A Figura 25 ressalta a placa principal e IHM em fibra, montadas e com todos os cabos necessários e microcontrolador PIC16F877. O projeto CUSCOPIC não é destinado para fins comerciais, no entanto os colaboradores do projeto (estudantes e professores) e terceiros, podem solicitar o envio de componentes e placas pelo site para fins didáticos.

² Informações do referente ao fabricante, cursos gratuitos, modelos, venda e fornecedores do produto no link (<http://www.mecatronica.org.br/disciplinas/cuscopic/cusco.htm>).

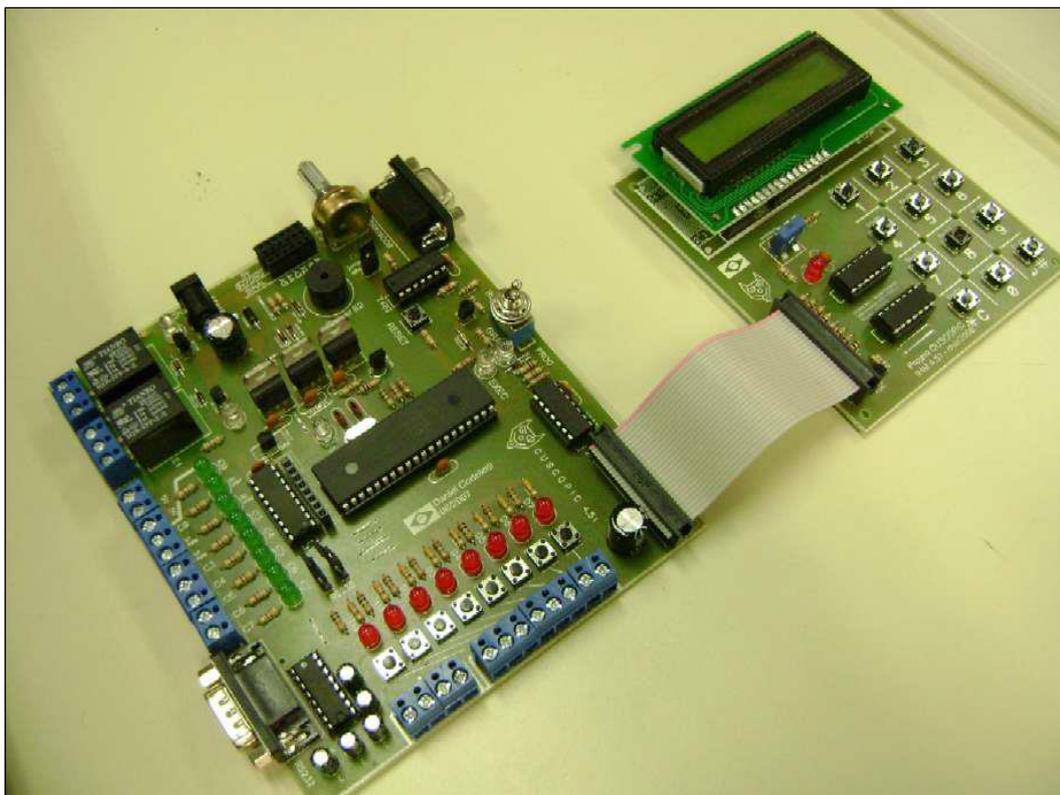


Figura 25 – Placa CUSCOPIC.
Fonte: (www.mecatronica.org.br).

3.1.3 Microcontrolador PIC16F877

Os PIC (PICmicro) são uma família de microcontroladores fabricados pela *Microchip Technology*, que processam dados de 8 bits, 16 bits e 32 bits. O Controlador de Interface Programável é muito utilizado em projetos de automação, pela sua facilidade de programação e processamento, visualização do funcionamento e montagem.

O PIC16F877 ³ apresenta diversos recursos já embutidos, dos quais podemos citar:

- Entradas analógicas;
- Saídas com modulação por largura de pulso;
- Memória ROM (memória somente de leitura);
- Conjuntos de portas de entrada e saída (total de 33 portas);

³ Informações do referente ao fabricante, cursos, modelos, venda e fornecedores do produto no link (<http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=PIC16F877A>).

Demais especificações técnicas na tabela abaixo:

Tabela 6 – Especificações Técnicas do microcontrolador PIC16F877.

Oscilador Cristal 20MHZ
Interface paralela e serial RS 232
Conversor analógico-digital de 10 bits
Alimentação de 2V a 5,5V
Pinagem DIP com 40 pinos

Fonte: (<http://www.microchip.com/>).

3.1.4 Sensor de temperatura DS1822

Pertence à família de sensores DS18XX, fabricante *Dallas Semiconductor*⁴, possui saída digital de 12 bits, não necessita de calibração, não necessita de condicionamento de sinal, pois o sinal é enviado digitalmente, tempo de reposta de 750ms para cada dado enviado, inferior de 1 mA possibilitando que trabalhe frio e não induza erros na medição de temperatura por aquecimento do próprio dispositivo na sua operação e não necessita de uma fonte de alimentação externa. Este sensor opera com precisão de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Tabela 7 – Especificações Técnicas do Sensor DS1822.

Resolução de precisão de 0,0625 °C
Tensão máxima de 5,5V
Corrente máxima de 1 mA
Temperatura máxima de + 125 °C
Temperatura mínima de - 55°C

Fonte: (www.maximintegrated.com)

⁴ Informações do referente ao fabricante, datasheet completo, exemplos de aplicação, venda e fornecedores do produto no link (<http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/2795>).

3.1.5 Sensor de temperatura e umidade relativa do ar STH11

Fazem parte da família de sensores integrados SHTXX da *Sensirion*⁵, possibilita o processamento de mais de um sinal de entrada fornecendo uma saída totalmente digital. São acoplados a um conversor A/D de 14 bits e um circuito de interface serial. Isto resulta em qualidade superior no sinal, um rápido tempo de resposta e sensibilidade a perturbações externas e um baixo consumo de energia em longo prazo.

Tabela 8 – Especificações Técnicas do Sensor SHT11.

Faixa de operação da umidade relativa de 0 à 100%
Faixa de operação da Temperatura de - 40 à +120° C
Consumo de energia de 3V
Completamente calibrado de 100 mA
Precisão de $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ para temperatura e $\pm 3,0\%$ para a RH

Fonte: (www.mikroe.com)

3.1.6 Registrador de tempo (RTC)

Circuito gerador de Click⁶ (RTC CLICK) é um circuito que gera um sinal cíclico em uma determinada frequência de tempo, utilizado para aplicações que requer um relógio de tempo real ou alarmes programados. Possui interface para microcontroladores e opera com comunicação somente para 5V. Possui uma bateria de lítio 3V e 230 mA que trabalha para manter quando o componente está de forma isolada, a principal fonte de alimentação. Operação de cronometragem programagem em segundos, minutos, hora, data do mês, mês, dia da semana e ano.

^{5,6} Informações do referente ao fabricante, datasheet completo, exemplos de aplicações, venda e fornecedores do produto nos link (<http://www.mikroe.com/click/sht1x/>) e (<http://www.mikroe.com/click/rtc/>), respectivamente.

3.1.7 Programação e software de controle

Utilizou-se a programação em linguagem C por ser uma linguagem de alto nível, que permite uma melhor interação do programador com o software, bem como uma maior facilidade de depuração. Por ser uma linguagem estruturada e de fácil visualização, o projeto baseou-se em uma recompilação de soluções disponíveis na internet (www.mecatronica.org.br) e outras mídias com a adição de novos recursos visando à flexibilidade e didática. Por serem plataformas abertas possibilitam alterações ou aplicações no desenvolvimento do “kit” didático e posteriormente durante as aulas práticas, caso necessário.

A linguagem C para microcontroladores é uma das linguagens de programação mais usadas influenciando muitas outras linguagens, especialmente o C++, que foi desenvolvida como uma extensão para C. A maioria dos microcontroladores conta com compiladores em C para o desenvolvimento de software, que permite a construção de programas e aplicações muito mais complexas.

O compilador C tem a capacidade de “traduzir” o código de máquina, portanto podemos dizer que a linguagem C possui grande eficiência. Essa eficiência da linguagem C faz com que o programador preocupe-se mais com a programação em si e o compilador assume responsabilidades como localização da memória, operações matemáticas e lógicas, verificação de bancos de memórias e outros. Assim o gravador converte e organiza os sinais gerados pelo computador permitindo que sejam armazenados no microcontrolador PIC.

3.1.8 Armazenamento dos dados

O armazenamento rápido em massa dos dados poderá ser realizado através de uma placa de acessório microSD que possui um slot para cartão microSD (cartões portáteis padrão de memória removíveis) usado como uma mídia de armazenamento em massa para dispositivos portáteis. Sua comunicação é simples, ideal para leitura ou armazenar banco de dados e arquivos. Ou através do método de transmissão serial, sua comunicação serial é escolhida por diversos periféricos de computadores em suas aplicações. Possui Interface Serial RS-232 e USB (Universal Serial Bus) para comunicação de dados entre equipamentos, permite

especificar tensões, temporizações e funções dos sinais, protocolo para troca de informações e conexões mecânicas.

Esta funcionalidade permite o monitoramento de todo o sistema, leituras e envio dos dados adquiridos no formato CSV (separado por ponto e vírgula). A simplicidade e universalidade tornam-se possível a análise dos dados em planilhas, por exemplo, do *Microsoft Excel* ou *Wolfram Mathematica*, realização de gráficos das grandezas medidas de tensão e corrente da célula fotovoltaico das variáveis, tais como temperatura e umidade do ar, temperatura da célula e o nível de radiação solar.

3.1.9 Instrumentos de medição

Durante as coletas instantâneas das amostras foram utilizados equipamentos e instrumentos de medição portáteis de alta precisão, tais como: multímetro na leitura de tensão e corrente em função do diferentes índices de insolação solar, medidor de energia solar para averiguar o índice de insolação da célula piloto e a câmara de imagem térmica para a verificação e confiabilidade dos sensores de temperatura no desenvolvimento e controle do trabalho. A seguir, os principais instrumentos utilizados durante o desenvolvimento e validação do “kit didático”.

- Câmara de Imagens Térmicas FLUKE Ti-20: câmara de imagens térmicas totalmente radiométricas captam e armazenam dados de temperatura calibrada para a matriz de milhares de pontos que constitui uma imagem térmica. Isto torna possível realizar uma análise detalhada e alterar parâmetros fundamentais, como a emissividade ou a gama de temperaturas (10° a 350 °C) e precisão $\pm 2\%$ ou ± 2 °C.
- Medidor de Energia Solar MES-100: instrumento medidor de energia solar com correção de cosseno total para o ângulo de incidência da radiação. Pode ser utilizado para definição do melhor ângulo e a direção dos raios solares em painéis solares e para teste de eficiência, precisão 5% ou $\pm 10\text{W/m}^2$.
- Multímetro FLUKE 87V TRUE – RMS Industrial Multimeter With Temperature: medição digital de tensão e corrente (CC e CA), medições

precisas em sinais não lineares, medições de resistência, diodo e continuidade, termômetro embutido e precisão CC de 0,05% ou 10 mV.

3.2 Validação do banco de dados

A literatura científica cita inúmeros estudos relacionando a utilização de métodos Controle Estatístico de Processo (CEP) em sistemas eletrônicos, tanto para validação quanto à sua confiabilidade e precisão. O objetivo é validar o banco de dados através da comparação dos dados lidos pelo sistema de aquisição de dados (placa) com os obtidos pela estação micrometeorológica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através da ferramenta gráficos de controle de médias e de desvio-padrão.

O CEP é constituído por várias ferramentas de resolução de problemas, na verificação da estabilidade e na melhoria dos processos, através da redução da sua variabilidade e monitoramento da qualidade ao longo do tempo de execução. O uso correto do CEP e técnicas estatísticas permitem um monitoramento eficaz com apoio de ferramentas úteis e disponíveis como softwares, gráficos de controle, histograma, folha de verificação de dados, entre outras, possibilitando uma maior compreensão, aproveitamento das informações e conseqüentemente um melhor desempenho e qualidade do processo.

A qualidade pode ser monitorada pelo acompanhamento das variações das principais características e propriedades das variáveis de forma quantitativa e contínua. As variações deverão ser supervisionadas, avaliado e controlado por meio de gráfico de controle de médias e desvio padrão que expressem os indicadores toleráveis em um determinado tempo.

- a) Indicador: Média de Controle de Processo
- Limite Superior de Controle (LSC_x), utilizando a seguinte fórmula:

$$LSC_x = X + A_1 S$$

- Limite Inferior de Controle (LIC_X), utilizando a seguinte fórmula:

$$LSC_X = X - A_1 S$$

- Limite de Controle (LC_X), utilizando a seguinte fórmula:

$$LSC_X = X$$

Onde

X = média do processo correspondente à linha centra (LC);

A_1 = coeficiente tabelados em função do tamanho da amostra;

S = desvio padrão do processo correspondente à linha centra (LC).

b) Indicador: Desvio padrão de controle de processo

- Limite Superior de Controle (LSC_S), utilizando a seguinte fórmula:

$$LSC_S = B_4 S$$

- Limite Inferior de Controle (LIC_S), utilizando a seguinte fórmula:

$$LSC_S = B_3 S$$

- Limite de Controle (LC_S), utilizando a seguinte fórmula:

$$LSC_S = S$$

Onde

S = desvio padrão do processo correspondente à linha centra (LC);

B_3 e B_4 = coeficientes tabelados em função do tamanho da amostra.

Para a leitura da temperatura da célula solar selecionamos o sensor DS1822 com saída digital de 12 bits (resolução de 0,0625 °C de precisão) e para a temperatura e umidade relativa do ar, o sensor SHT11 que possui saída digital de 14 bits. Ambos são acoplados a um conversor D/A e a um circuito de interface de série, para possibilitar a comparação dos dados lidos com os dados fornecidos pelo INPE. A Tabela 9 demonstra os sensores utilizados durante a coleta dos dados e suas especificações técnicas de fabricação.

Tabela 9 - Tipos de sensores e as especificações técnicas.

Material	INPE		Kit Didático		
	Instrumento Padrão HMP45C		SHT11		DS1822
Tipo de sensor	Resistivo de temperatura	Capacitivo de umidade	Temperatura	Umidade relativa	Temperatura
Sinal de saída	Analógico		Digital		Digital
Faixa de atuação	- 40 °C a + 60 °C	0 a 100%	- 40 °C a + 120 °C		- 55 °C a + 125 °C
Precisão a 20°C	± 0,5 °C	± 4,0%	± 0,4 °C	± 3,0 %	± 0,2 °C

Para realizar a validação dos dados dos sensores do “kit” didático pelo método da comparação é necessária a utilização de um instrumento padrão com certificado de aferição. Normalmente este instrumento padrão é composto por um sensor com uma excelente estabilidade e homogeneidade. A leitura dos sinais é feita em uma ponte resistiva de precisão, procedimentos de aferição que são quase idênticos aos dos termopares.

Para Rosa (2009), a validação do banco de dados realizada através do uso da ferramenta gráfico de controle de médias e de desvio-padrão para variáveis, tem por objetivo monitorar o desempenho durante um determinado tempo, visando analisar possíveis variações.

As coletas das amostras foram realizadas em campo na área de estudos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizada na cidade de Santa Maria, região central do Estado do Rio Grande do Sul, no período entre 12 horas e 13 horas do dia 28 de novembro de 2012.

Respeitando o manual de instruções de instalação do instrumento de medição padrão, o sistema de aquisição de dados do “kit” didático foi exposto ao lado do instrumento do INPE para ser avaliado, exatamente mesmo local e influências climáticas.

Foram coletados 2800 dados simultaneamente, via comunicação serial do instrumento padrão HMP45C ⁷ e via USB do novo sistema, sem a influência humana direta na coleta dos dados, sendo analisadas 200 amostras desse conjunto durante o intervalo de 1 hora.

O HMP45C registrou durante o intervalo de tempo, média de 35 °C de temperatura externa e 34% de umidade relativa do ar. As figuras abaixo, os resultados demonstrados em gráficos de controle de média e desvio padrão das 200 amostras de temperatura externa, umidade do ar e temperatura da célula solar no período de uma hora.

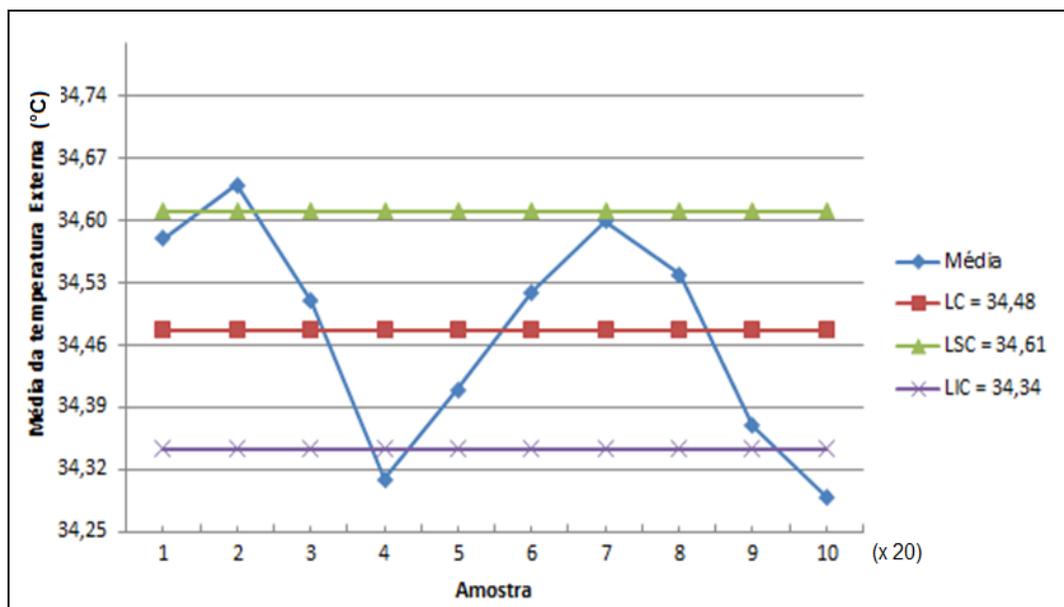


Figura 26 – Gráfico de controle de média da temperatura externa.

⁷ Informações do referente ao fabricante e datasheet completo do produto no link (<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/hmp45c.pdf>).

O gráfico de controle da média da temperatura externa apresentou uma estabilidade praticamente durante todo o monitoramento (fig. 26), e no gráfico de controle de desvio padrão é possível verificar que nas amostras de número 7 e 17 da Figura 27, houve alterações significativas fora das faixas de controle, devido à ocorrência de fatores climáticos, como nuvens pardas e vento, justificando a sensibilidade e calibragem dos sinais (ajuste) que o sensor recebe de forma digital.

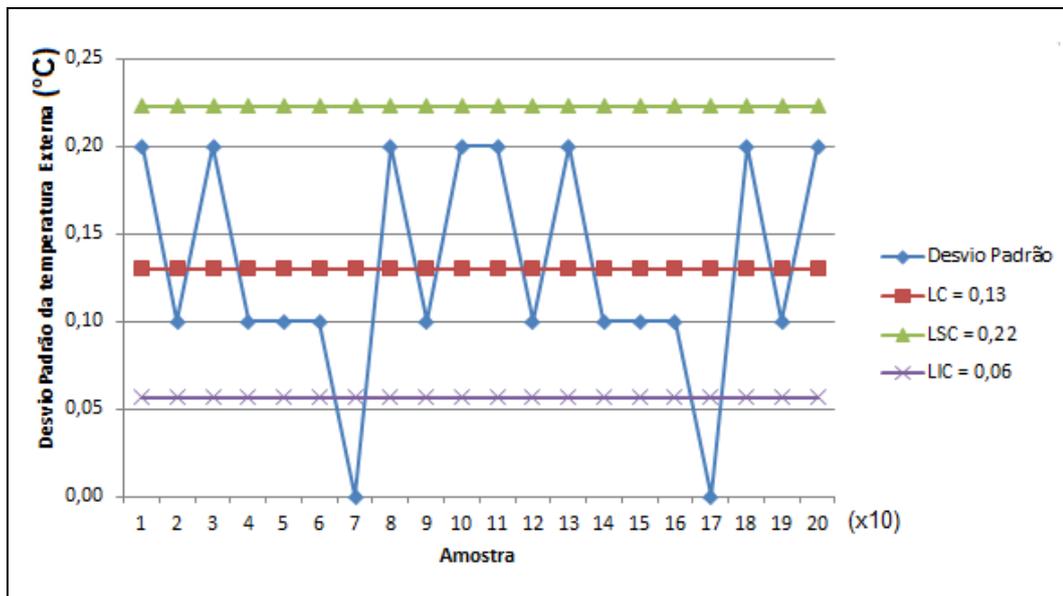


Figura 27 – Gráfico de controle de desvio padrão da temperatura externa.

Para os gráficos de controle de média e desvio padrão da umidade relativa do ar nas Figuras 28 e 29, confirmam a sensibilidade e tempo de resposta do sensor.

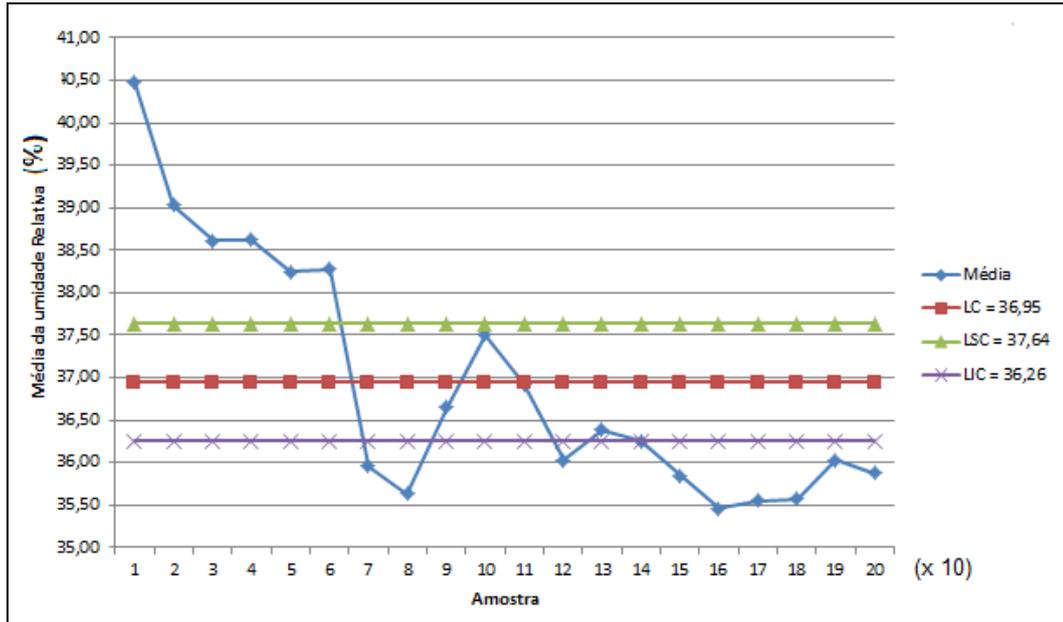


Figura 28 - Gráfico de controle de média da umidade relativa do ar.

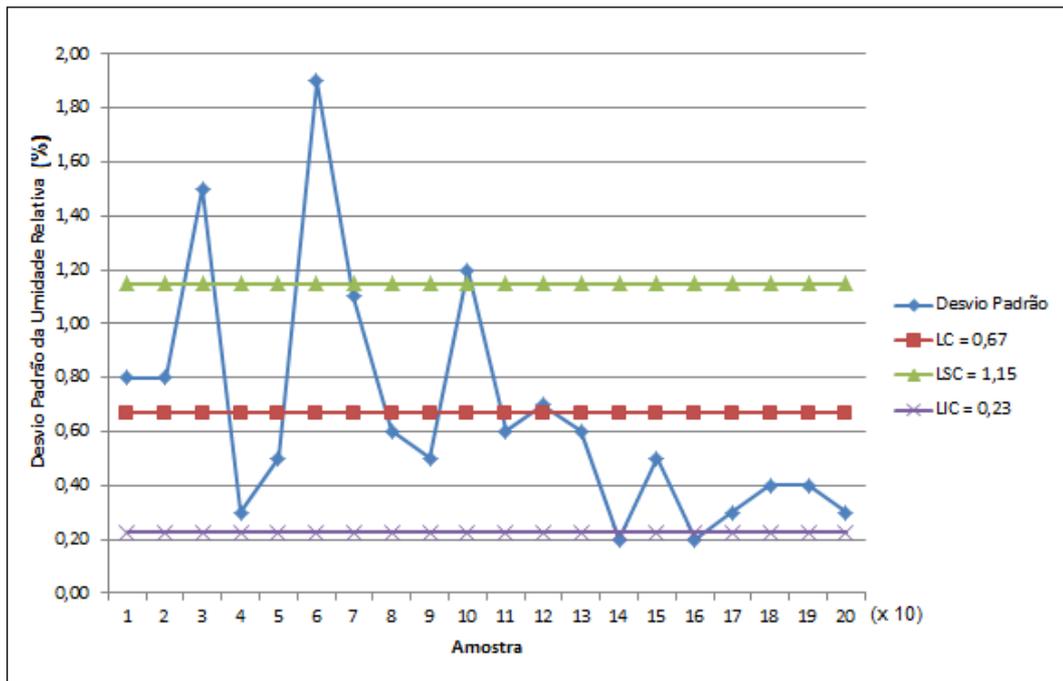


Figura 29 – Gráfico de controle do desvio padrão da umidade relativa do ar.

Como o sensor STH11 é um dispositivo eletrônico integrado, os sinais de entradas de temperatura e umidade relativa do ar são diretamente relacionados durante o processamento dos dados, identificando a correlação entre as duas

variáveis, ou seja, com o aumento da temperatura consequentemente, menor será o índice de umidade do ar e vice-versa.

Para o controle da temperatura da célula solar, a variação de médias entre os limites superior e inferior de controle durante o funcionamento do sistema de aquisição de dados, deve ser no máximo $5,0^{\circ}\text{C}$, respeitando as faixas de atuação de desempenho, sensibilidade do processador, tempo de resposta e tolerâncias do sensor DS1822, segundo especificações técnicas.

As saídas dos dados digitais e tempo de resposta do sensor DS1822, não sendo influenciada pela temperatura externa, torna possível que o mesmo trabalhe em torno da linha central de $0,67^{\circ}\text{C}$ de desvio padrão, pois quanto melhor o contato térmico entre a célula solar, melhor a qualidade fornecida do sinal de controle.

A norma de inspeção da NBR 12302 determina que o sensor de temperatura adequado, em contato com a célula solar em ensaio, deve ser medida com exatidão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Na Figura 30 é possível verificar a exatidão do sensor que é de entorno de $0,4^{\circ}\text{C}$, faixa de controle menor que estabilidade pelo sistema, superando normas e especificações de dispositivos de simulação de painéis solares que é de $0,5^{\circ}\text{C}$.

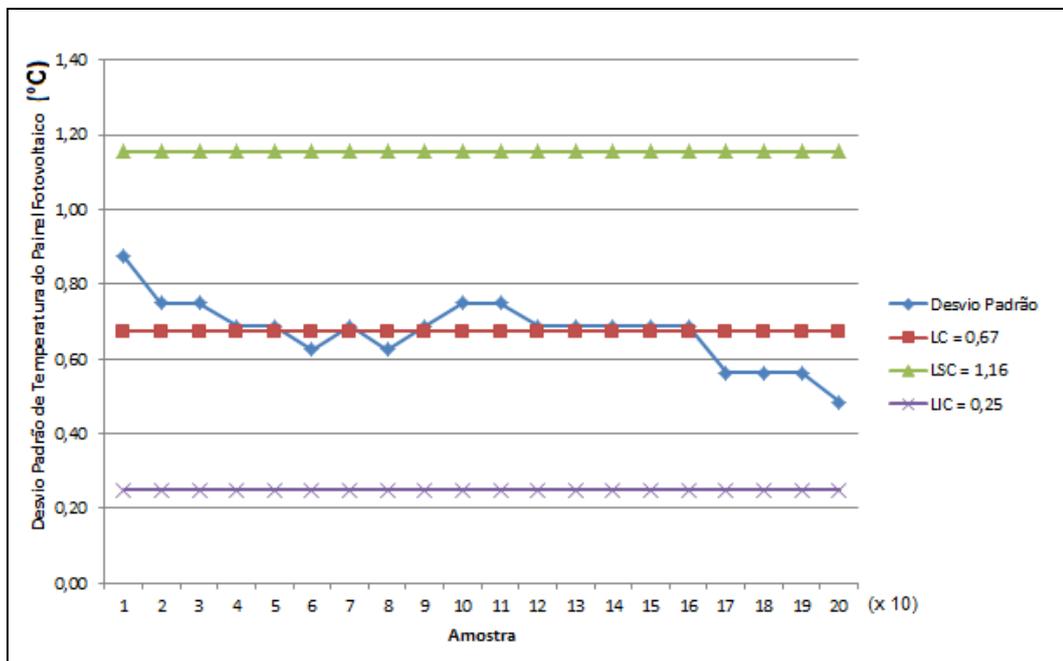


Figura 30 – Gráfico de controle do desvio padrão da temperatura célula solar.

O desempenho do sistema de aquisição e controle do banco de dados em relação ao instrumento padrão HMP45C do INPE, provou ser eficiente na aquisição de temperatura da célula solar e temperatura e umidade relativa do ar, superando as exigências da norma NBR 12302 e datasheet's ⁷ dos dispositivos utilizados no kit didático. Com a utilização das ferramentas gráficos de controle estatístico de processo é possível validar o novo sistema eletrônico de aquisição de dados que contribuirá para medições de variáveis em diversos locais.

⁷ Informações completas referente aos dispositivos eletrônicos citados no Capítulo 3.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Plano de ensino técnico

É um instrumento didático-pedagógico, de elaboração e uso obrigatório em todas as disciplinas oferecidas de um curso técnico. Cada professor poderá estruturar suas atividades com pertinência e de forma interdisciplinar, o qual poderá e/ou deverá ser adaptado às necessidades que possam surgir no decorrer do período (Perrenoud, 1999).

Para Antunes (2001), o plano de ensino facilita o acompanhamento, supervisão e o controle do planejamento pedagógico, possibilitando alterações e atualizações. E também incentiva a interdisciplinaridade, permitindo aos professores a elaboração destes em conjunto.

A seguir, planos de ensino são propostos para ser empregados nas atividades práticas, com o auxílio do kit didático na aprendizagem dos conceitos relacionados que permitem conduzir da melhor forma o estudante em direção aos objetivos das aulas.

4.1.1 Atividade experimental I: Introdução ao estudo da célula fotovoltaica

Plano de ensino

As células fotoelétricas ou fotovoltaicas são dispositivos capazes de transformar a energia luminosa proveniente do Sol em energia elétrica. Pode funcionar como geradora de energia elétrica ou como um sensor capaz de medir a intensidade luminosa. Para compreender melhor o funcionamento da célula fotovoltaica, deve-se entender o conceito de eficiência, conversão (quociente entre a irradiação solar que incide na área da célula) e a energia elétrica que é produzida. O

melhorando da eficiência da célula fotovoltaica, corresponde afirmar que os sistemas fotovoltaicos podem tornar-se cada vez mais competitivos relativamente à produção de energia elétrica com combustíveis fósseis.

Objetivos: Identificar as principais variáveis que influenciam no funcionamento da célula fotovoltaica.

Duração: 2hora/aula em sala de aula e ambiente externo.

Kit didático: Composta por célula fotovoltaica e placa de aquisição de dados.

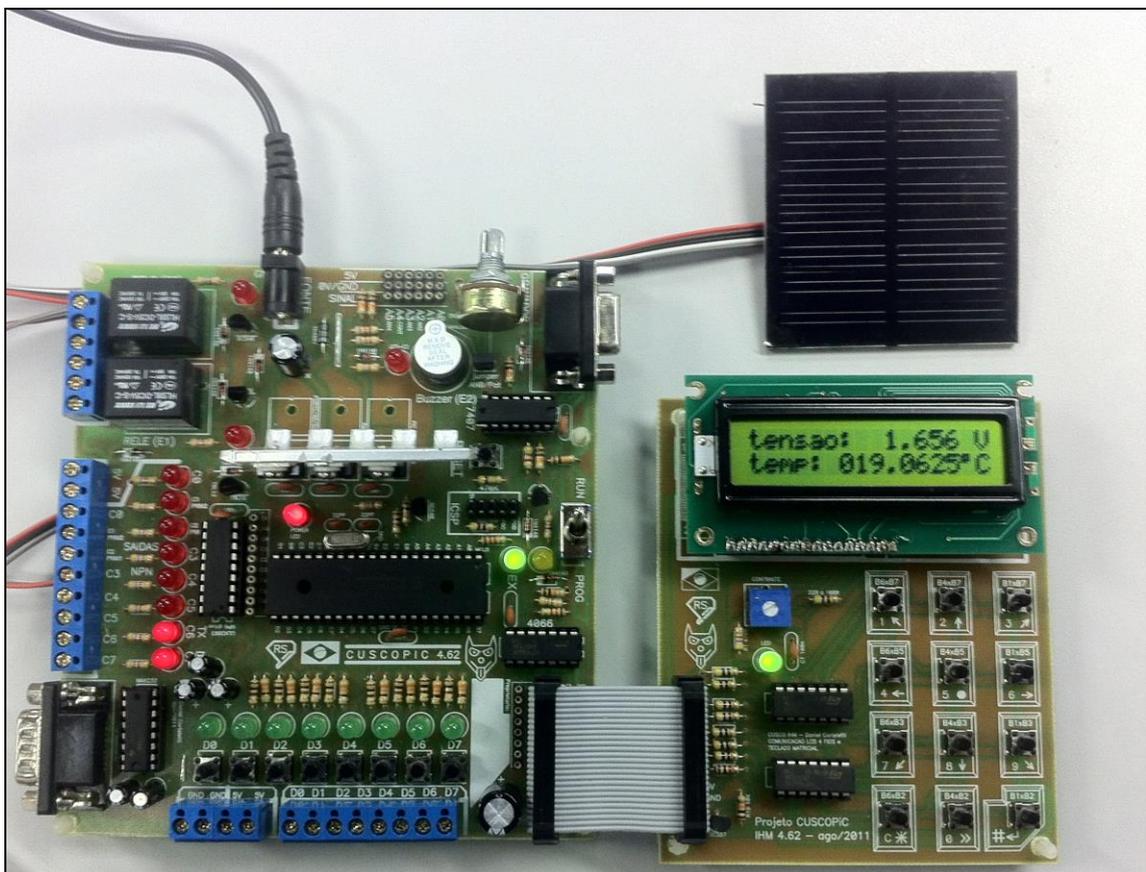


Figura 31 – Placa CUSCOPIC de geração de energia solar.

Guia do professor

Inicialmente, deverá ser realizada uma revisão bibliográfica em relação aos tópicos de eletrônica e automação referente à energia fotovoltaica, e posteriormente a apresentação de células fotovoltaicas e sua fundamentação teórica. O planejamento das atividades práticas com os estudantes poderá ser realizado em sala de aula para a abordagem geral do assunto. E a utilização do “kit” didático para demonstrar o funcionamento da célula fotovoltaica, assim como os tópicos estudados e julgados importantes, é de suma importância para auxiliar o entendimento dos textos preparados e atividades para ser discutidos em grupos.

Procedimentos

Para identificar as principais variáveis que influenciam no funcionamento da célula fotovoltaica deverão ser discutidos alguns temas importantes para que os estudantes associem à conversão fotovoltaica da energia solar. Entre os temas que poderão ser discutidos estão: levantamento bibliográfico das aplicações da energia solar, fontes renováveis e alternativas, e sucessivamente, despertar a buscar interesses a projetos e desenvolvimento dispositivos eletrônicos para aplicações práticas.

Descrição dos resultados

Após observar o funcionamento da célula fotovoltaica na sala de aula e posteriormente, em espaço externo, pode-se descrever brevemente as principais variáveis que influenciam na eficiência da célula fotovoltaica. São elas: a temperatura da célula solar e a luminosidade.

A temperatura e a luminosidade da célula são parâmetros importantes. Quando as células são expostas aos raios solares, o seu aquecimento é considerável. Além disso, uma parte da incidência solar absorvida não é convertida em energia elétrica, mas dissipada sob a forma de calor. Por esta razão, a corrente gerada aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa, e assim com o aumento da temperatura da célula, resultando a eficiência diminua nos ponto de operação de potência máxima gerada.

4.1.2 Atividade experimental II: Determinação da curva I-V da célula fotovoltaica

Plano de ensino

Para determinar a curva I-V da célula fotovoltaica é necessário analisar alguns parâmetros, tais como a intensidade de corrente e a diferença de potencial. A curva I-V pode ser determinada medindo a diferença de potencial e a intensidade de corrente da célula fotovoltaica para diferentes valores da resistência de carga. A curva I-V da célula solar é o resultado da sobreposição da corrente gerada pela luz com a curva do díodo no escuro. A Figura 32 apresenta as curvas I-V sob diversas condições de iluminação: a) no escuro: a célula tem as mesmas características elétricas de um díodo; b) iluminada: a curva desloca-se para o 4º quadrante; c) aumento gradual da intensidade da radiação; d) máxima intensidade da radiação: a curva desloca-se para o 1º quadrante.

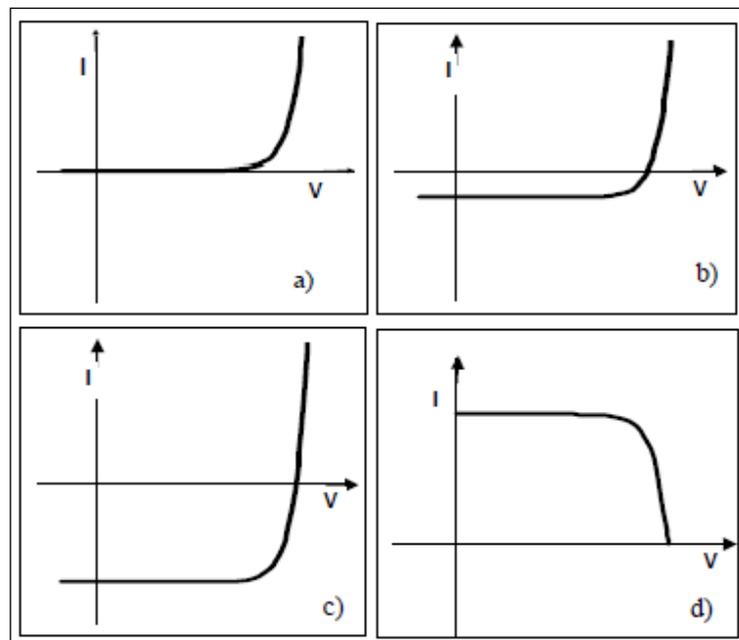


Figura 32 – Curvas I-V sob diversas condições de iluminação.

Objetivos: Verificar a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto da célula fotovoltaica.

Duração: 2 horas/aula em ambiente externo.

Kit didático: Composto pela célula solar (matriz solar) e placa de aquisição de dados, e computador.



Figura 33 – Célula exposta a radiação direta de 1025W/m^2 .

Guia do professor

A atividade prática tem por objetivo identificar as principais características da curva I-V de uma célula fotovoltaica e conceituá-las a partir da análise dos dados coletados de:

- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): corrente que circula na célula iluminada quando a tensão entre os seus terminais é nula.
- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): tensão entre os terminais de uma célula iluminada quando a corrente que circula por ela é nula.
- Ponto de máxima potência (P_{mp}): ponto da curva I-V para o qual o produto entre a tensão e a corrente é máximo.

- Tensão de potência máxima (V_{mp}): tensão entre os terminais de uma célula iluminada quando a potência é máxima.
- Corrente de potência máxima (I_{mp}): corrente que circula na célula iluminada quando a potência é máxima.

Procedimento

Orientar a célula fotovoltaica para a fonte luminosa e conectar o amperímetro e voltímetro à célula solar, e sucessivamente realizar as medições de I_{sc} e V_{oc} . Pode-se substituir o amperímetro e voltímetro por um multímetro portátil. Para obter a corrente máxima, deve-se medir a corrente com um amperímetro ligado diretamente à saída da célula solar (0, I_{sc}), assim como para a V_{oc} , deve medir a tensão com um voltímetro ligado diretamente à saída da célula, sem carga (V_{oc} , 0).

Descrição dos resultados

A caracterização de uma célula fotovoltaica é realizada através da medida da curva característica da corrente e tensão (I-V). A seguir, modelo de tabela e curva I-V determinadas por dados experimentais da célula fotovoltaica monocristalina para diferentes valores de carga (resistência) submetidos à insolação de 900 W/m^2 .

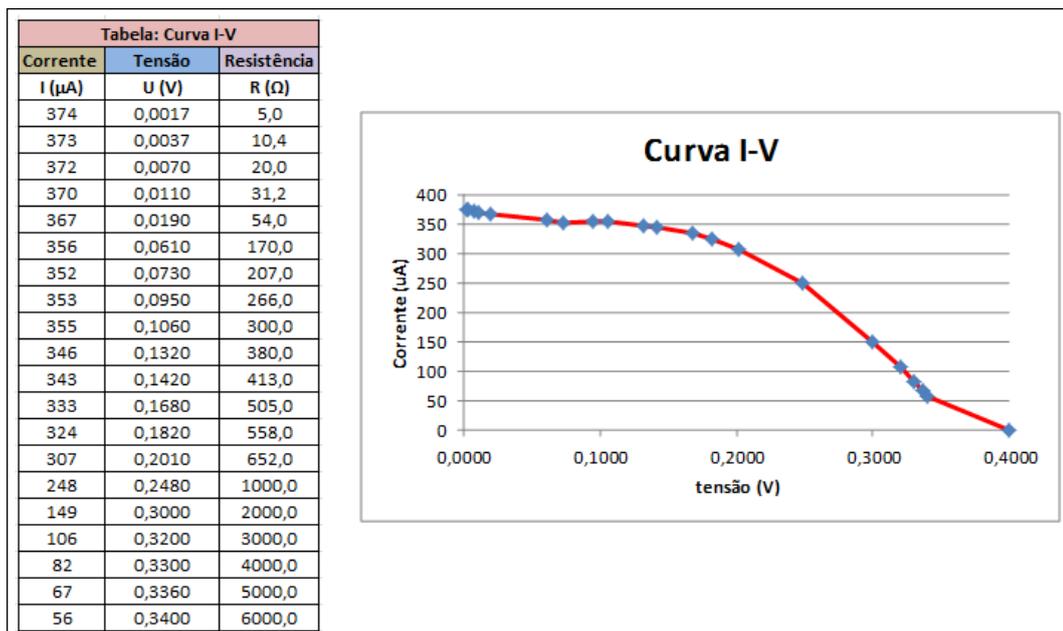


Figura 34 – Modelo de tabela e curva I-V da célula fotovoltaica.

Desafio

Coletar a I_{sc} e a V_{oc} para valores de 600, 700 e 800W/m² de radiação incidente com auxílio do medidor de energia solar (garantir estes valores durante as aulas práticas).

4.1.3 Atividade experimental III: Tipos de células fotovoltaicas

Plano de ensino:

O silício, material principal para produzir as células fotovoltaicas, pode ser utilizado de diversas formas. A técnica mais eficiente é a chamada *célula solar monocristalina* que são fatias de silício cortadas de um cristal de silício maior. Este monocristal de silício é aparentemente redondo ou quadrado com os cantos arredondados e em forma de pastilhas finas produzidas em fornos especiais possibilitando uma melhor eficiência.

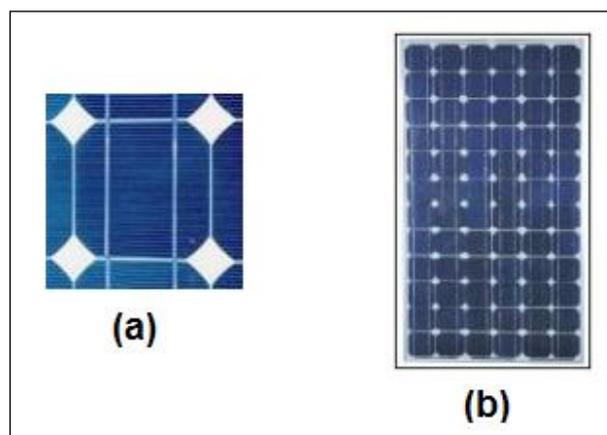


Figura 35 – (a) Célula monocristalina e (b) Células solares monocristalina em painel.

Uma das desvantagens em painéis solares com células deste tipo são os espaços desperdiçados entre as células na sua arrumação.

Outro tipo conhecido são as *células policristalinas*. O formato deste tipo de célula é diferente da anterior. São células quadradas que minimizam os espaços quando agrupadas num painel solar. Estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais.

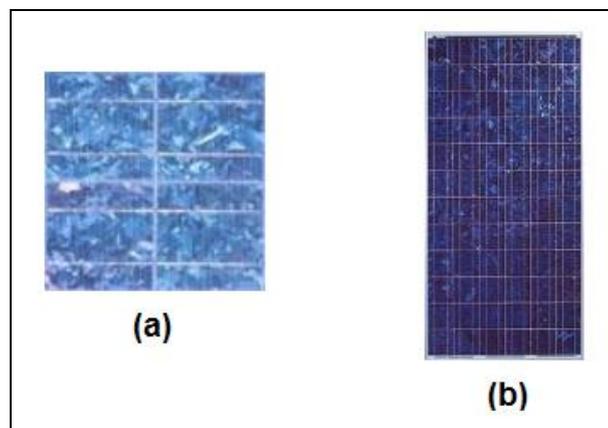


Figura 36 – (a) Célula policristalina e (b) Células solares policristalina em painel.

Uma desvantagem da célula policristalina é o seu rendimento, menos eficiente que a monocristalina apesar de ser mais barata.

Uma técnica promissora são as *células de silício amorfo (a-Si)*, que consiste na deposição de camadas muito finas de ligas de silício sobre diversos tipos de material, por exemplo, plásticos e vidro. Apresenta variedades áreas de aplicações, designadamente em elementos construtivos de edifícios, e tem custos de produção mais reduzidos, embora com uma eficiência inferior às células cristalinas.

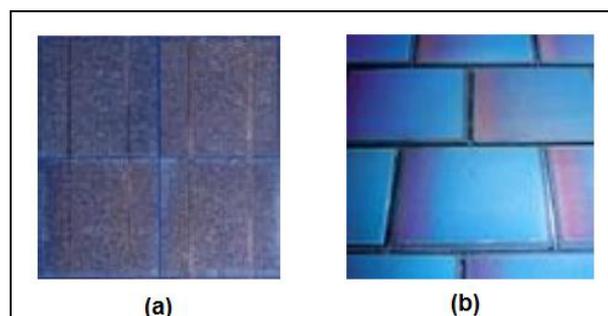


Figura 37 – Célula de silício amorfo: (a) aplicado em vidro e (b) cobertura de edifícios.

Objetivos: Determinar o rendimento das células fotovoltaicas de silício monocristalinas, de silício policristalinas e amorfo.

Duração: 2 horas/aula em ambiente interno ou externo.

Kit didático: Composto por 3 tipos células fotovoltaicas e placa de aquisição de dados, e computador.

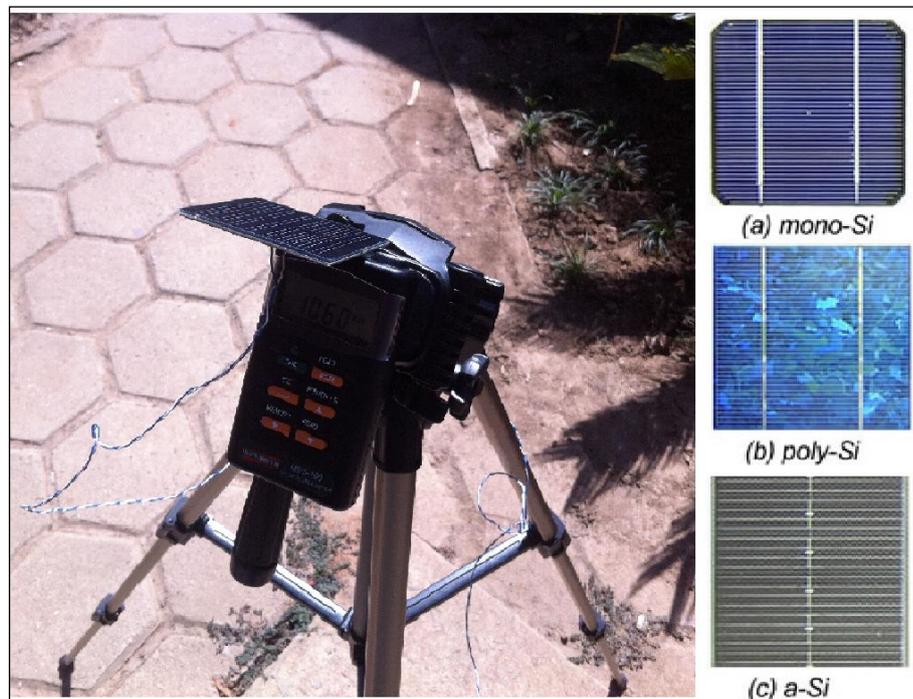


Figura 38 – Testes dos tipos de células solares ⁸

Guia do professor

Como o auxílio do “Kit” didático, posicionar a célula fotovoltaica no melhor ângulo de incidência e acionar o sistema de aquisição de dados de tensão, corrente

⁸ Suporte para câmara de imagem térmica não faz parte do “kit” didático proposto.

e resistência (carga variável) durante o período necessário ou conforme o andamento da turma.

O parâmetro usado para aferir da qualidade de uma célula é o seu rendimento (η) que se define como a razão entre a potência máxima produzida (P_u) e a potência luminosa incidente (P_{inc}).

$$\eta = \frac{P_u}{P_{inc}}$$

A potência incidente é dada pelo produto da área de superfície da célula com a intensidade da radiação solar incidente. Como o auxílio do “Kit” didático e instrumento medidor de energia solar portátil, posicionar cada tipo de célula fotovoltaica no mesmo ângulo de incidência e ligar o sistema de aquisição de dados durante o período necessário ou conforme o andamento da turma.

Procedimentos

- a) Determinar a potência útil de cada tipo de célula fotovoltaica;
- b) Determinar a potência incidente;
- c) Determinar o rendimento (η) a partir dos valores obtidos;

Descrição dos resultados

A potência elétrica relaciona com a diferença de potencial nos seus terminais e a intensidade da corrente que o percorre do seguinte modo:

$$P = UI$$

Onde “U” representa a diferença de potencial nos terminais do aparelho e “I” a intensidade da corrente que o percorre. A unidade SI de potência é o watt (W) em homenagem ao físico escocês James Watt (1736-1816). Um watt é a potência de um aparelho que transforma 1J de energia em cada 1 s de funcionamento.

O outro parâmetro importante para caracterizar uma célula fotovoltaica é o Fator de Forma (em inglês Fill Factor), que indica o grau de proximidade à característica ideal, ou seja,

$$FF = \frac{P_u}{V_{oc} I_{SC}}$$

E pode ser definido como a razão entre as áreas A e B, conforme demonstra graficamente a Figura 40.

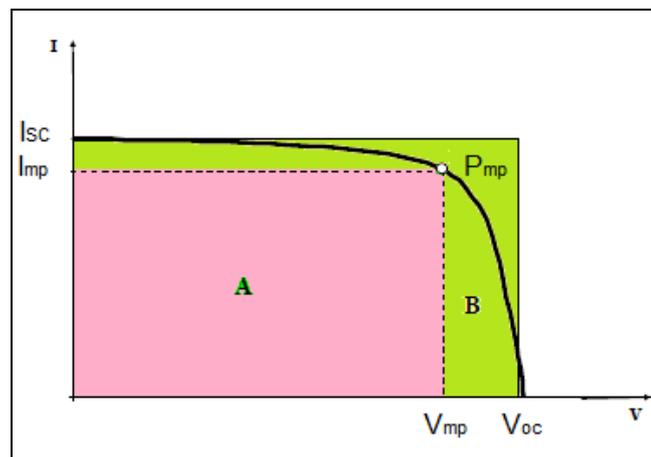


Figura 40 – Curva I-V da célula solar.

4.1.4 Atividade experimental IV: Associação série de células fotovoltaicas

Plano de ensino

A maioria dos módulos fotovoltaicos são montados para operarem com tensão nominal de 12V, considerando o tipo de células que os constituem e ao número de células associadas em série. Entre os tipos de células associadas mais utilizadas, estão os módulos de silício monocristalino (30 a 36 células), silício policristalino (36 células) e amorfos (27 ou 28 células).

As principais características de uma associação em série são a corrente que circula por uma célula é a mesma que circula pelas demais células associadas e a tensão nos terminais da associação, que é dada pela soma das tensões de cada célula. Considerando N células idênticas, tem-se a tensão de circuito aberto da associação (V_{OCA}) em que é igual a N vezes a tensão de circuito aberto (V_{OCCN}) de uma célula qualquer N , visto que todas apresentam a mesma tensão de circuito aberto. Portanto,

$$V_{OCA} = V_{OCC1} + V_{OCC2} + \dots + V_{OCCN}$$

onde V_{OCA} é a tensão de circuito aberto da associação e V_{OCCN} é a tensão de circuito aberto da célula N , e sendo que

$$V_{OCC1} = V_{OCC2} = \dots = V_{OCCN}$$

onde N_S é o número de células fotovoltaicas associadas em série.

Quando os extremos da associação são conectados entre si, através de um condutor com resistência elétrica nula, tem-se uma situação de curto-circuito, no qual a tensão da associação é nula e a corrente que circula é denominada de corrente de curto-circuito da associação (I_{SCA}). Como as células são idênticas, apresentam mesma corrente de curto-circuito e, portanto pode-se dizer que,

$$I_{SCA} = I_{SCC1} = I_{SCC2} = \dots = I_{SCCN}$$

onde I_{SCA} é a corrente de curto-circuito da associação e I_{SCCN} é a corrente de curto-circuito da célula N .

Para qualquer ponto de operação da associação, diferente dos pontos de circuito aberto e curto-circuito, a tensão da associação para um determinado valor

de corrente, é dada como sendo a soma das tensões de cada célula. Para esta corrente da associação I_A tem-se que:

$$V_A = V_{C1} + V_{C2} + \dots + V_{CN}$$

onde V_A é a tensão da associação e V_{CN} é a tensão da célula N.

Objetivo: Determinar as curvas de I-V de uma célula fotovoltaica e da associação de N células idênticas monocristalinas.

Duração: 2 hora/aula em ambiente interno ou externo.

Kit didático: Composto pela célula fotovoltaica (matriz solar) e placa de aquisição de dados, e computador.



Figura 41 – Célula solar exposta a insolação direta.

Guia do professor

Como o auxílio do “Kit” didático e instrumento medidor de energia solar portátil, posicionar a célula fotovoltaica e/ou matriz solar, no melhor ângulo de incidência (ou de escolha do estudante, desde que o mesmo identifique os dados para a determinada incidência escolhida) e ligar o sistema de aquisição de dados de tensão, corrente e resistência (carga variável) durante o período necessário ou conforme o andamento da turma.

Procedimentos

- Determinar V_{OCA} , V_{OCCN} ;
- Traçar as curvas de I-V da célula e da associação em série;
- Identificar a I_{SC}
- Identificar a V_{OC}

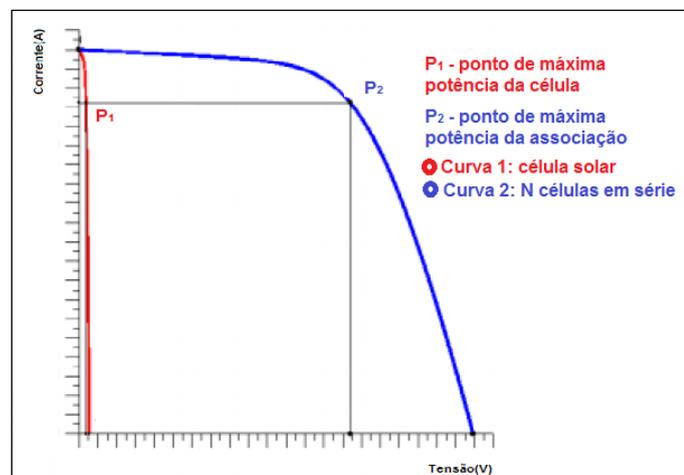


Figura 42 – Curva característica I-V de n células associadas em série.

Descrição dos resultados

A partir da curva I-V de N células, observa-se que, para qualquer carga que seja conectada nos extremos da associação, todas as células comportam-se como

geradores de energia elétrica. O ponto P_2 indica o ponto de máxima potência da associação no qual tem-se que

$$V_{mpA} = V_{mpC1} + V_{mpC2} + \dots + V_{mpCN}$$

onde V_{mpA} é a tensão do ponto de máxima potência da associação e V_{mpCN} é a tensão do ponto de máxima potência da célula N, sendo

$$V_{mpC1} = V_{mpC2} = \dots = V_{mpCN}$$

tem-se portanto que

$$V_{mpCA} = N_S V_{mpC1} = N_S V_{mpC2} = \dots = N_S V_{mpCN}$$

e

$$I_{mpA} = I_{mpC1} = I_{mpC2} = \dots = I_{mpCN}$$

onde I_{mpA} é a corrente do ponto de máxima potência da associação e I_{mpCN} é a corrente do ponto de máxima potência da célula N.

Observação: O plano de ensino proposto com o auxílio do “kit” didático poderá ter os mesmos procedimentos e aplicação para o estudo de associação paralelo de células fotovoltaicas.

4.1.5 Outras atividades experimentais

O “kit” didático disponibiliza dados visuais de temperatura da célula solar, temperatura e umidade relativa do ar em relação à tensão, insolação e cargas variáveis para diversos estudos, por exemplo, o estudo da radiação solar em um determinado local. Permite a comparação entre o desempenho da instalação dos PV's para diferentes tempos de operação e níveis de radiação.

Os resultados podem-se expostos na forma de gráficos das radiações diárias em períodos contínuos, de comportamento da radiação incidente e característica local que varia ao longo. A Figura 43 demonstra um exemplo de modelo de planilha de radiação solar diária a 400 W/m^2 .

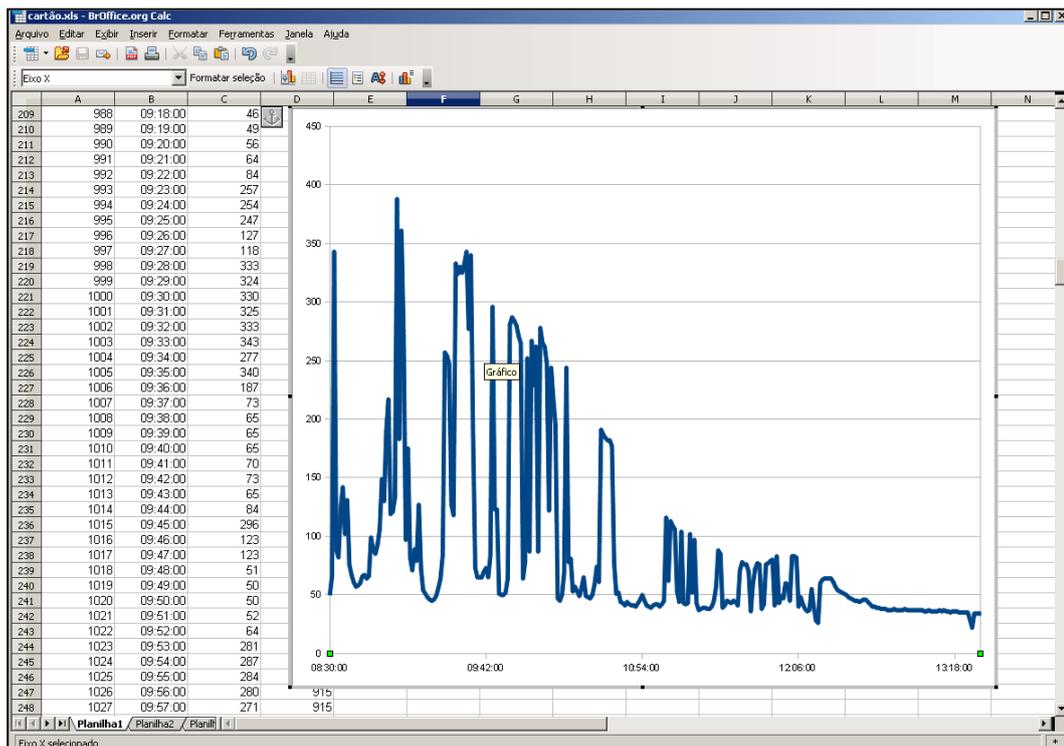


Figura 43 – Planilha diária de radiação solar a 400 W/m^2 .

Assim como em aplicações com a implementação de conversor e baterias no “kit” didático para o estudo de cada uma das técnicas de rastreamento do ponto máximo de potência, dimensionamento de sistemas fotovoltaicos e armazenamento de energia, respetivamente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um “kit” didático visando uma ferramenta alternativa para o ensino de sistemas de geração de energia solar, propiciando uma aproximação entre a teoria e a prática.

Procurou-se dar uma contribuição e incentivo ao uso de fontes renováveis e abordagem pedagógica para construção de experimentos práticos. O “kit” didático possibilita um melhor aproveitamento quanto à compreensão de fenômenos físicos relacionados às diversas áreas da eletrônica, acionamentos e instrumentação, como também multidisciplinares relacionando as energias renováveis. Devido a sua simplicidade de leitura, operação e de manuseio, poderá ser trabalhado em sala de aula e espaços externos, benefício imediato que promove motivar os estudantes a integrar situações reais na sua própria aprendizagem. Com esta ferramenta auxiliar, o professor terá condições de propor novos desafios e experimentos práticos aos alunos.

O estudo da utilização do “Kit” didático experimental proporciona ao estudante, práticas que o colocam em contato direto com saberes tecnológicos, científicos, instrumental e, sucessivamente, despertando a criatividade, construção e soluções de situações-problemas do cotidiano da sala de aula, por meio de trabalhos em grupo e interdisciplinares, sobre energias renováveis.

A estratégia de ensino-aprendizagem permite introduzir temas de referencia a “energia fotovoltaica”, explorando os conceitos inerentes a células fotovoltaicas, princípio de funcionamento e aplicações práticas em diversas áreas, mobilizando e conscientizando o estudante as problemáticas energéticas e consequências ambientais, na busca de potencializar a capacidade de raciocínio e desenvolvimento de projetos de resolução de problemas.

O “Kit” didático tem vantagens de criar um ambiente de informalidade, diminuir o distanciamento entre o professor e estudante, assim como, gerar e fornecer informações detalhadas de cada tópico específico em estudo. Como também, a observação do comportamento e medição dos dados no momento em que são produzidos e obtenção de relatório de conteúdo realizado pelo próprio estudante ou grupo.

Além disso, a aplicação do “kit” didático construído e todos os instrumentos são adequados para a metodologia no ensino-aprendizagem de nível técnico ao superior. Esta ferramenta alternativa permite o maior conhecimento de trabalhos práticos sobre a energia solar e sistemas de geração de energia elétrica; no ensino das tecnologias e ciências; na resolução de problemas reais e na investigação de metodologias apropriadas para ensino.

É um trabalho coletivo do educador, educando e comunidade. Segundo Garnett (1995), o aprender fazer, questionar e interpretar é uma forma de contribuição para desenvolver a aprendizagem e compreensão da ciência e tecnologia. Pois através da visão construtiva do ensino e conhecimento do estudante, teremos futuros profissionais capacitados para diversas áreas de trabalho.

5.2 Trabalhos futuros

O interesse no aperfeiçoamento e desenvolvimento de novos kits didáticos específicos para atividades prática, associação e comparação com valores teóricos e reais, possibilita a continuidade no estudo de novas ferramentas, como alternativa auxiliar de ensino, tais como:

- Implementação de turbina eólica para o dimensionamento de sistema de energia eólica, fotovoltaica ou híbrida;
- Implementação de anemômetro para determinar as direções do vento, variável determinante na aplicação de insumo no plantio;
- Ajuste de modelos determinados para situações específicas, locais e considerando outras variáveis;

Assim como, desenvolver e aplicar estratégias de ensino-aprendizagem, que permite introduzir temas inerentes e de relação ao conhecimento de energias renováveis; compreender tópicos de conhecimento tecnológicos inovadores; investigar o setor econômico, social, político e ambiental; e desenvolver uma visão integradora da Ciência, da Tecnologia, da Sociedade e do Ambiente.

REFERÊNCIAS

- ABEGG, I.; RAMOS, D. B. **Investigação de Ferramentas e Métodos de Ensino de Circuitos de Corrente Alternada para Curso Introdutório de Eletrotécnica.** Revista Dynamis. FURB, Blumenau/SC. ISSN 1982-4866, v. 19, n. 1, p. 30-42, 2013.
- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR12302: Módulos fotovoltaicos – Correção das curvas características corrente *versus* tensão ($I \times V$) em função da temperatura e radiação. Rio de Janeiro/RJ, 1991.
- ANTUNES, C. **Como Desenvolver Competências em Sala de Aula.** Petrópolis/RJ, 2001.
- BERNSTEIN, D.S. **Control Experiments and What I Learned From Them: A Personal Journey.** IEEE Control Systems, v.18, p. 81-87, 1998.
- BONIFÁSIO, P. J. S. **Seguidor Fotovoltaico: Uma Variação do P&O - Simulação e Prototipagem.** Dissertação de Mestrado (Engenharia eletrotécnica e computadores) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2010.
- CARMO, E. A.; SILVA, O. F.; BARREIROS, J. A. L.; FERREIRA, A. O. **Construção de Protótipo Didático: Uma Abordagem Diferenciada no Processo de Ensino/Aprendizagem de Engenharia.** XVI CBA, Salvador, Brasil. 2006. Disponível em: < <http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/download/7/7>>. Acesso em: 01 abr. 2013.
- CIENCIA VIVA. **Agência Nacional para a Cultura Científica e Tecnológica.** Disponível em: < <http://www.cienciaviva.pt/home/>>. Acesso em: 18 jan. 2014.
- COELHO, et al. **Experimentos Práticos de Controle Adaptado na Graduação.** COBENGE - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2001.
- CRESESB – CEPEL. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Coleção Tópicos de Atualização em Equipamentos Elétricos. Rio de Janeiro, p. 204, 1999.
- CRESESB. **Atlas Solarimétrico do Brasil.** UFPE, 2000.

CRESESB. **Energia Solar Princípios e Aplicações**, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Rio de Janeiro/RJ, 2006.

CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Rio de Janeiro/RJ, 1999.

DAOUD, A. and MIDOUN, A. **Single Sensor Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Technique for Solar Water Pumping System**. Electrical Power Quality and Utilisation, Journal, v. XIV, n. 2, 2008.

DEMO, P. **Educar pela Pesquisa**. Campinas: Autores Associados. p. 129, 1998.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, Ed. John Wiley & Sons, 1991.

ELECTRONICA. **Electrónica**. Disponível em: < <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/18/30/>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

FLUKE. **Câmara de Imagens Térmicas Fluke Ti20**. Disponível em: < [http://www.fluke.com/fluke/ptpt/Camaras-Termograficas/Fluke-Ti20-\(Europe-only\).htm?PID=56181](http://www.fluke.com/fluke/ptpt/Camaras-Termograficas/Fluke-Ti20-(Europe-only).htm?PID=56181)>. Acesso em: 22 ago. 2013.

FUENTES, M. **A Simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Arrays**. Proc.17th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., p. 1341-1346, 1984.

GARNETT, P. J., GARNETT, P. J., HACKLING, M. W. **Refocusing the Chemistry lab: A Case for Laboratory-Based Investigations**, Australian Science Teachers Journal, 41 (2), p. 26-32, 1995.

GUIMARÃES, A. P.C. **Estimativa de Parâmetros da Camada Atmosférica para Cálculo da Irradiação Solar Incidente na Superfície Terrestre**. Dissertação de doutorado (Ciências em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Janeiro/RJ, 2003.

HECKTHBEUER, L. A. **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**. Tese de doutorado (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2001.

JIANG, J. A. **Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems**. Tamkang Journal of Science and Engineering, v. 8, n. 2, p. 147-153, 2005.

KRENZINGER, A.; BLAUTH, Y. B.; WISBECK, J. O. **Seguidor Dinâmico de Máxima Potência para Painéis Solares**; In: XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal/RN, p. 985-990, 2002.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. Editora Wiley, Edição 1. ISBN 0471491969, 2003.

MAGNO, W. C.; ARAÚJO, A. E. P.; LUCENA, M. A.; MONTARROYOS, E. **REALIZANDO Experimentos Didáticos com o Sistema de Som de um PC**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 1, p. 117-123, 2004.

MARKAVART, T. **Solar electricity**. Ed. Wiley e Sons LTD. Inglaterra. p. 141,1994.

MARTINS, D. C., COELHO, R. F., SANTOS, W. M. **Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos: Revisão e Novas Propostas**. XI COBEP. Natal/RN, 2011.

MASTERS, GILBERT M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. Ed. Wiley. ISBN 0471280607, 2004.

MES-100. **Medidor de Energia Solar Instrutherm - MES-100**. Disponível em: <<http://www.criffer.com.br/loja/115-medidor-de-energia-solar-mes-100-instrutherm.html>>. Acesso em: 22 ago. 2013.

MORENO, F. U. **Introdução a Controle e Automação: História e Epistemologia**. 2006. Disponível em: <www.das.ufsc.br/~moreno/manual%20CA/sbaeduca4.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2013.

NAZIAZENO, R. N. **Construção, Calibração e Análise de Desempenho de um Piranômetro de Baixo Custo, baseado no Modelo Kimball – Hobbs**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/1/11109>>. Acesso em: 02 jan. 2014.

PALZ, WOLFGANG. **Energia Solar e Fontes Alternativas**. Livraria Hemus, Ed. Limitada, 1981.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia elétrica**. 1 ed. São José dos Campos, 2006. Disponível em: <[http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc 17@80/2007/05.04.14.11/doc/atlas_solar-reduc](http://mtc-m17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc%2017@80/2007/05.04.14.11/doc/atlas_solar-reduc)>. Acesso em: 23 ago. 2010.

PERRENOUD, P. **Construir as Competências desde a Escola**. Porto Alegre/RS. Ed. Artmed, 1999.

ROSA, L. C. **Introdução ao Controle Estatístico de Processo**. 1ª Ed. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2009.

ROTHER-NEVES, M.; SILVA, O.F.; BARREIROS, J.A.L. **Metodologia para a construção de protótipos didáticos para os cursos de controle e automação de sistemas**. COBENGE 2004. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2004/artigos/01_057.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2013.

RÜTHER, R. **Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e o Trabalho do LabSolar nesta Área**. LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar; Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 1993.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia usando Técnica MPPT e Controle Digital**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2009.

THOMAZINI, D. ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações**. 5ª ed. São Paulo: Érica, p. 222, 2005.

VACHTSEVANOS, G.; KALAITZAKIS, K. **A Hybrid Photovoltaic Simulator for Utility Interactive Studies**. IEEE Power & Energy Society, v. 2, n. 2, p. 227 – 231, 1987.

VALENTE, M. A. S. **Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Eletrotécnica e Computadores) - Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2011. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/6110/1/Valente_2011.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2013.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. and FILHO, E. R. **Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays**. IEEE Transactions on power electronics, v. 24, n. 5, 2009.

ANEXO

Célula fotovoltaica

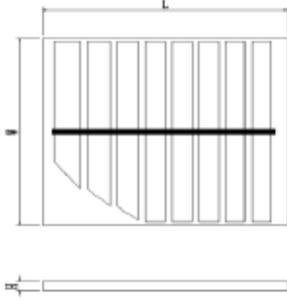
SOLAR PANEL SPECIFICATION

P/N: SW0.4M

Maximum power voltage:4.0V Maximum power current: 100.0mA Dimension: 70*65*3.2mm

1. Outline View:

Outline Dimensions	
L	70±0.2mm
W	65±0.2mm
H	3.2±0.3mm



2. Technical characteristics

(STC Standard Testing Condition: 1000W/M² AM1.5, 25°C.)

Description of Goods	Technical Spec.
Open Circuit Voltage(Voc)	4.6V±8%
Short Circuit Current (Isc)	105mA±8%
Maximum Power Voltage(Vmp)	4.0V±8%
Maximum Power Current(Imp)	100.0mA±8%
Maximum Power(Ppm)	0.4W±8%

3. Mechanical Characteristics

- ① Monocrystalline Silicon solar cells
- ② Encapsulated: PC film lamination

4. Quality Assurance

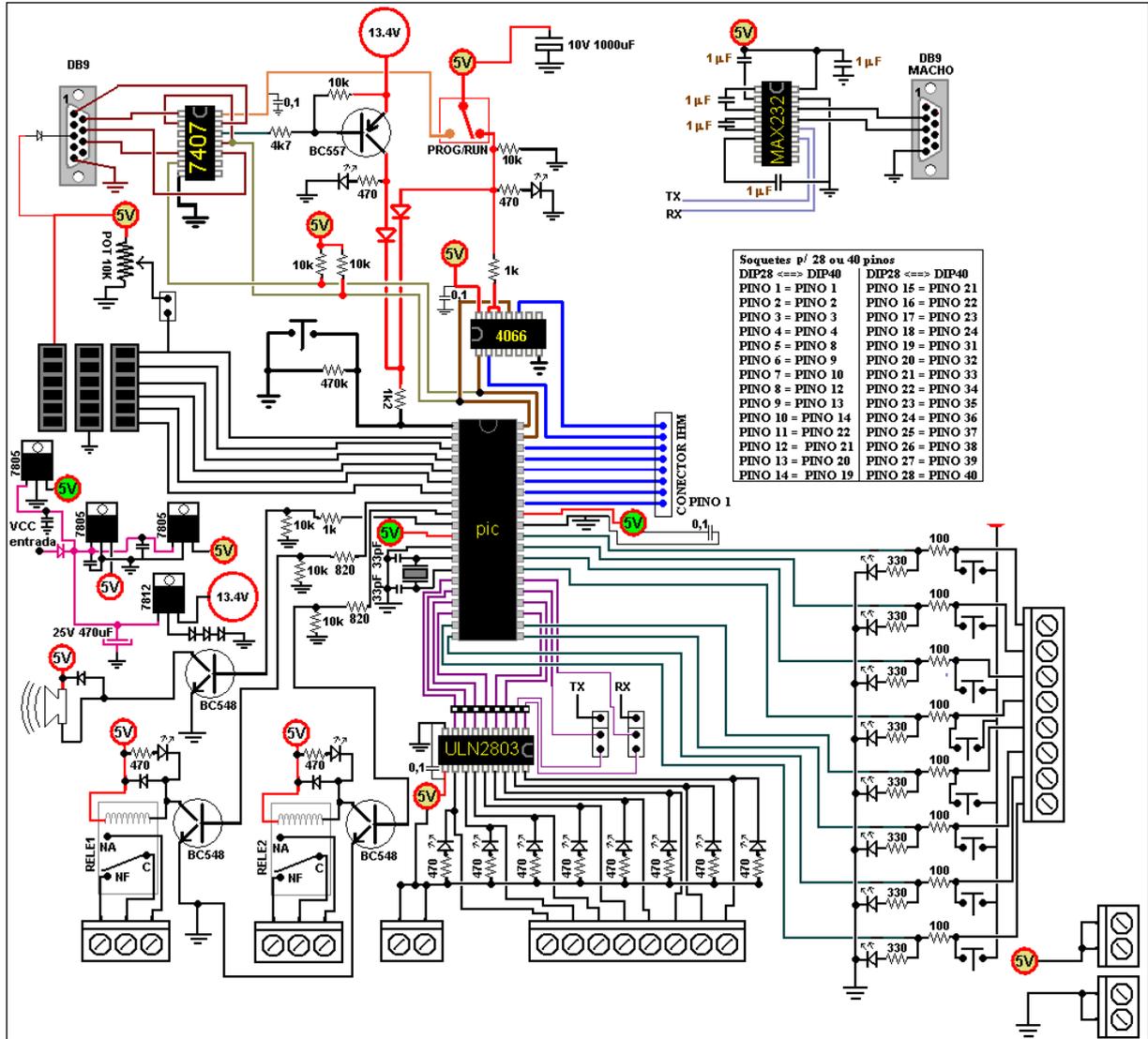
- ① 3-year limited, work temperature: -10°C-50°C

5. Notes

- ① This product couldn't be contacted directly with strong corrosive substances.
- ② To be avoid to scratch the surface.
- ③ This product couldn't be born bending force during transportation & assembling.

Date:	2010.11.22
Made by:	hommy
Confirm:	

Esquema elétrico completo da placa principal do CUSCOPIC



Esquema elétrico da placa de Interface homem-máquina (IHM) do CUSCOPIC

