



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ANTÔNIO DE ALMEIDA FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR DE BAIXO
CUSTO PARA SISTEMAS DE ENERGIA
FOTOVOLTÁICOS**

SALVADOR – BAHIA
SETEMBRO DE 2014

©Antônio de Almeida Fernandes, novembro de 2014.

S725 Fernandes, Antônio de Almeida

Desenvolvimento de um Rastreador de Baixo custo para Sistemas de Energia fotovoltaicos/Antônio de Almeida Fernandes. – Salvador, 2014.

108 f.: il. color.

Orientador: Prof. Doutor Caiuby Alves da Costa

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Elétrica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2014.

1. Energia Solar. 2. Rastreador Solar. 3. Geração Fotovoltaica. 4. Sensor Solar. I. Costa, Caiuby Alves. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD: 621.31

ANTÔNIO DE ALMEIDA FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR DE BAIXO
CUSTO PARA SISTEMAS DE ENERGIA
FOTOVOLTÁICOS**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof^o Dr. Caiuby Alves da Costa

**SALVADOR – BAHIA
SETEMBRO DE 2014**

ANTÔNIO DE ALMEIDA FERNANDES

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR DE BAIXO
CUSTO PARA SISTEMAS DE ENERGIA
FOTOVOLTÁICOS**

Dissertação de mestrado apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia.

Data da Aprovação: _____ / _____ / _____

Orientador:

Prof. Dr. Caiuby Alves da Costa
UFBA

Membro:

Prof. Dr. Amauri Oliveira
UFBA

Membro:

Prof. Dr. Tito Santos
UFBA

Membro:

Prof. Dr. Alberto Rebouças
IFBA - Vitoria da Conquista

SALVADOR, BAHIA
SETEMBRO, 2014

A meus pais (in memoriam), minha querida esposa, filhos e netos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Caiuby Alves da Costa, meus sinceros agradecimentos por toda a orientação e apoio recebido.

Aos Professores Dr. Amauri Oliveira, Dr. André Luiz de Carvalho Valente, Dra. Cristina de Abreu Silveira, Dr. Fernando Augusto Moreira, por tudo que nos ensinaram nas disciplinas cursadas.

Ao Prof. Msc. Manoel Sobrinho da UNIVASF pelo incentivo.

Ao Prof. Dr. José Bismark de Medeiros da UNIVASF pela grande ajuda.

À Sr^a Maria Janaína Batista Clemente, secretária do PPGEE-UFBA, por todo o apoio recebido.

A todos os familiares e amigos que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização de fontes de energia renováveis passou a ser uma real necessidade para o mundo atual, principalmente em decorrência do problema ambiental. Nesse contexto, a energia fotovoltaica destaca-se por ser uma solução cujo balanço de vantagens e desvantagens é favorável. Para tornar-se competitiva, se comparada com as fontes de energia elétrica convencionais, a energia fotovoltaica deve ter os seus custos reduzidos e utilizar sistemas de conversão mais eficientes, que podem ser obtidos através do desenvolvimento e emprego de novos materiais, do aperfeiçoamento na fabricação dos módulos, da utilização de técnicas de rastreamento solar e da procura do ponto de máxima transferência de potência. Dentro dessa perspectiva, esse trabalho busca avaliar o rendimento de um sistema fotovoltaico fixo após a inserção de um sistema de rastreamento solar, utilizando como atuador um motor de corrente contínua, acionado através de um amplificador operacional alimentado pela energia gerada pelo próprio painel fotovoltaico. O rastreador proposto buscou atender a requisitos técnicos e econômicos, tais como baixo custo, baixo consumo de energia e facilidade de implementação. Testes de campo foram realizados na fase inicial do projeto e evidenciaram o bom funcionamento do rastreador mesmo em dias nublados e com baixo nível de radiação, apresentando-se confiável e com boa precisão ao seguir o movimento do Sol mesmo sob altos níveis de irradiância. Com o sistema em funcionamento, procurou-se ainda encontrar o ponto de máxima potência do sistema. Finalizando essa análise, foram verificados ganhos na energia diária coletada de 19,9% para medições no mês de junho e de 26,3% no mês de dezembro, para um dia de céu limpo, o que pode ser considerado um resultado bastante significativo.

Palavras Chave: Geração Fotovoltaica. Rastreador Solar. Sensor Solar

ABSTRACT

The use of renewable energy sources has become a real need for today's world, especially due to the environmental problem. In this context, photovoltaic stands out for being an extremely convenient solution. To become competitive, when compared with the sources of conventional electricity, the electricity must have their reduced costs and use more efficient conversion systems, which can be obtained through the development and use of new materials, improvement in manufacturing modules, techniques of using solar tracking and searching for the point of maximum power transfer. Within this perspective, this study aims to evaluate the performance of a fixed photovoltaic system after insertion of a solar tracking system using actuator as a DC motor, driven by an operational amplifier powered by the energy generated by the photovoltaic panel itself. The purpose of the proposed tracker was comply with the technical and economical requirements such as low cost, low power consumption and ease of implementation. Field tests conducted in the initial phase of the project showed a functioning tracking even on cloudy days and low level of radiation, presenting reliable and with good precision to follow the sun's movement even under high levels of irradiance. In addition, it was determined the point of maximum system power. Completed this analysis, gains were achieved in daily energy collected on the order of 19.9% for the measurements made in June and 26.3% in December, on a clear day, which can be considered a very significant result.

Keywords: Photovoltaic Generation. Solar tracker. Solar sensor

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Célula de silício monocristalino	21
Figura 2 - Célula de silício policristalino	21
Figura 3 - Vista de uma célula solar de silício amorfo	22
Figura 4 - Célula de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS)	22
Figura 5 - Módulos FV com concentradores com baixo fator de concentração	25
Figura 6 - Esquema de concentrador solar com lente Fresnel	26
Figura 7 - Módulo solar com dois graus de liberdade de rastreamento	26
Figura 8 - Rastreador solar de um eixo, sem concentradores	27
Figura 9 - Prédio Heliotrope - localizado na cidade de Freiburg, Alemanha	28
Figura 10 - Representação esquemática dos ângulos solares	29
Figura 11 - Ângulo de incidência θ da radiação solar	30
Figura 12 - Rastreador passivo usando dois tubos cilindros idênticos Preenchidos com um fluido sob pressão parcial	35
Figura 13 - (a) Princípio do equilíbrio de sombreamento; (b) Sensores apontando para o Sol; (c) Sensores de imagem do Sol por meio de um colimador.	36
Figura 14 - Comparação entre um sistema solar FV rastreado e um fixo	37
Figura 15 - Esquema de um rastreador terrestre	41
Figura 16 - Rastreador de eixo horizontal	42
Figura 17 - Tipos de rastreadores	44
Figura 18 - Vista do motor solar completo	46
Figura 19 - Vista do módulo solar no LABEFEA	47
Figura 20 – Diagrama de blocos do rastreador completo	47
Figura 21 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico	47
Figura 22 - Circuito proposto para o rastreador	48
Figura 23 - Diagrama esquemático para medições no módulo FV no escuro	50
Figura 24 - Curva característica do módulo solar no escuro	50

Figura 25 - Vista do módulo FV com o pino de alinhamento (relógio solar) e do goniômetro	52
Figura 26 - Gráfico da tensão de circuito aberto/corrente de curto circuito x horário do dia com módulo fixo	53
Figura 27 - Esquema do circuito de medição das características do servomotor	54
Figura 28 - Curva característica do servomotor	55
Figura 29 - Gráfico da tensão de circuito aberto/corrente de curto circuito x horário do dia com o módulo fixo	56
Figura 30 - Vista do módulo FV com rastreamento manual do Sol	57
Figura 31 - Gráfico da corrente do curto circuito e tensão de circuito aberto com rastreamento manual	58
Figura 32 - Correntes de curto circuito com o modulo fixo e rastreado manualmente versus horas do dia	59
Figura 33 - Diferença das correntes de curto circuito com o módulo fixo e com rastreamento versus horas do dia	60
Figura 34 - Gráfico comparativo V_{oc}/I_{cc} com o módulo fixo e com rastreamento automático	62
Figura 35 - Gráfico comparativo I_{cc} com o módulo fixo e com rastreamento automático	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução histórica do desenvolvimento de células solares	18
Tabela 2 - Ganho de energia para os diferentes tipos de rastreadores	43
Tabela 3 - Características do motor solar	46
Tabela 4 - Características do módulo solar	46
Tabela 5 - Resultado das medições efetuadas com o módulo FV no escuro	51
Tabela 6 - Medições realizadas com o módulo FV fixo	53
Tabela7- Característica Corrente x Tensão do Servomotor	54
Tabela 8 - Medições realizadas com o módulo fixo	56
Tabela 9 - Medições efetuadas com módulo rastreando o Sol manualmente	57
Tabela10 - Corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto com o módulo fixo e rastreando o Sol	59
Tabela11 - Valores da integração numérica. Delta de 30min	60
Tabela 12 - Medições efetuadas na Icc e Voc com o módulo fixo e com o rastreador ativo	62
Tabela 13 - Resultado da integração numérica	63
Tabela 14 - Resultado comparativo do módulo FV fixo e rastreado em junho e dezembro/2013	64
Tabela 15 - Retorno dos investimentos	64

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ampéres
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício amorfo
CIGS	Células de Cobre, Índio, Gálio e Selênio
cm ²	Centímetros quadrados
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
FCAH	Fim de Curso sentido Anti-Horário
FCEM	Força Contra Eletromotriz
FCH	Fim de Curso sentido Horário
FV	Fotovoltaico
h	Horas
I _{ph}	Corrente gerada pela Fotocélula (fotocorrente)
I _{sc}	Corrente de curto circuito (<i>short circuit</i>)
LABEFEA	Laboratório de Eficiência Energética e Ambiental
LABMET	Laboratório de Meteorologia da UNIVASF
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i> (Resistor Dependente da Luz)
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de máxima potência)
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i> (Saldo Positivo de Carga de Sucção)
<i>off-grid</i>	Sistema autônomo
<i>on-grid</i>	Sistema Interligado a uma rede
PC	Computador Pessoal
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Specified Test Conditions</i> (Condições específicas de teste)
V _{oc}	Tensão de circuito aberto (<i>open circuit</i>)
W _p	Watt-pico ou Potência de pico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Motivação e Justificativa	15
1.3 Estrutura da Dissertação	16
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	17
2.1 Perspectiva Histórica – Energia Solar Fotovoltaica (FV).....	17
2.2 Evolução Tecnológica dos Painéis Solares Fotovoltaicos	19
2.2.1 Células Monocristalinas	20
2.2.2 Células Policristalinas	21
2.2.3 Células de Silício Amorfo (A-SI)	21
2.2.4 Células de Cobre, Índio, Gálio e Selênio (CIGS)	22
2.3 Evolução Tecnológica pelo emprego da energia solar fotovoltaica.....	23
2.4 Recursos para o Aumento da Eficiência dos Sistemas FV	24
2.4.1 Concentradores Solares	25
2.4.2 Rastreadores Solares.....	26
2.5 Sistemas de rastreamento solar	28
2.5.1 Análise Teórica do Desempenho de um Sistema com Módulo Solar FV fixo X um Sistema com Módulo Solar FV Rastreado	29
3 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR.....	32
3.1 Introdução	32
3.2 O Desenvolvimento dos Sistemas de Rastreamento Solar	32
3.3 Classificação dos Rastreadores	33
3.3.1 Rastreadores Passivos.....	34
3.3.2 Rastreadores Ativos.....	35
3.3.3 Conclusão	43
3.3.4 Rastreadores Disponíveis no Mercado	44
4. PROPOSTA DE UM RASTREADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO.....	45
4.1 Modelo do rastreador a ser analisado	45
4.1.1 Características do Motor Solar	45
4.1.2 Características do módulo solar fotovoltaico.....	46
4.1.3 Estrutura do Rastreador	47
4.2 Ensaio e Medições Realizadas	48
4.2.1 No módulo solar.....	48

4.2.2	<i>No motor solar</i>	48
4.2.3	<i>No circuito eletrônico</i>	48
4.3	Desenvolvimento experimental	48
4.3.1	<i>Circuito Proposto</i>	48
4.3.2	<i>Material Utilizado</i>	49
4.4	Medições de Campo	49
4.4.1	<i>Equipamentos utilizados</i>	49
4.4.2	<i>Medições no módulo FV</i>	49
4.4.3	<i>Curva característica do motor solar</i>	54
4.5	Medições em Campo da Corrente de Curto Circuito e Tensão de Circuito Aberto do Módulo Solar	55
4.5.1	<i>Medições no mês de junho/2013</i>	55
4.5.2	<i>Medições no mês de Dezembro/2013</i>	61
4.5.3	<i>Análise dos resultados</i>	64
4.6	Viabilidade técnico-econômica do rastreador	64
5	CONCLUSÕES	66
5.1	Considerações finais	66
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A	72
	ANEXO B	80
	ANEXO C	90
	ANEXO D	93
	ANEXO E	94

1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia solar na obtenção de sua energia elétrica sem a queima de combustíveis fósseis (como o carvão, o petróleo ou o gás natural) ou ainda, através da fissão nuclear vem sendo pesquisada mais intensamente desde o início da década de 70 uma vez que sua utilização ajuda a evitar a maioria das ameaças decorrentes do efeito estufa. Associada às técnicas atuais de produção de eletricidade, a energia fotovoltaica (FV) apresenta alguns outros benefícios, além da possibilidade de gerar eletricidade para a humanidade, com uma ampla gama de aplicações e em diferentes condições e localizações geográficas. A geração de energia FV pode levar eletricidade a áreas rurais e a regiões remotas que não sejam atendidas pela rede de distribuição convencional, além de promover benefícios relacionados à melhoria da qualidade de vida e ao desenvolvimento econômico dessas regiões, visto que muitas atividades rurais necessitam de energia elétrica (LUQUE, 2003).

Embora o potencial da energia emitida pelo Sol seja bastante elevado, é difícil definir o valor exato da quantidade de radiação solar que atinge a Terra. Estima-se, entretanto, que apenas parte de um minuto seria suficiente para atender a toda demanda mundial de eletricidade. Comparada com a energia eólica, a energia solar fotovoltaica tem a vantagem de não estar limitada a determinados locais geográficos, podendo ser utilizada praticamente em todos os lugares, ainda que a quantidade de radiação dependa do clima e, particularmente, da latitude.

As células FV são, em sua grande parte, compostas de silício. Assim, se quando exposta ao sol pleno, uma única célula de silício cristalino com uma área de 100 cm^2 , é capaz de gerar uma corrente de 3A (Ampères) em uma tensão de 0,5V (volts), (HOFFMAN, 2005), um módulo solar, composto por grande número de células de silício, irá fornecer uma potência maior, principalmente quando for orientado perpendicularmente à radiação incidente; ou seja, a condição de orientação ótima para um sistema FV é obtida se a radiação incidente sobre os módulos solares for continuamente vertical, auferindo a máxima eficiência ao sistema. Uma forma de atingir esse objetivo consiste na utilização do rastreador solar para que toda a área do módulo seja constantemente ajustada à posição perpendicular aos raios do Sol. Segundo Luque (2003) e Dhanabal et al (2013), o rendimento da energia de um sistema FV com rastreadores é consideravelmente superior ao de um sistema de montagem fixa.

Outra alternativa usada para aumentar a eficiência de um sistema fotovoltaico é a utilização de concentradores.

1.1 Objetivos

Esse trabalho apresenta o estado da arte na concepção dos vários tipos de rastreadores solares e demonstra, experimentalmente, que o uso desse tipo de rastreador pode aumentar significativamente o ganho de energia dos módulos fotovoltaicos, em comparação com os módulos fixos.

1.2 Motivação e Justificativa

O uso de energia fotovoltaica como fonte de energia limpa e renovável tem crescido bastante nos últimos anos, principalmente nos países desenvolvidos. Apesar de apresentar um custo relativamente alto, se comparado a outras fontes como a eólica e a hidrelétrica, estudos apontam que, com o amadurecimento da tecnologia aliado a incentivos fiscais, a energia solar tende a se tornar completamente viável para a geração própria e distribuída a partir de 2020, no Brasil (EPE, 2012).

O Brasil, país tropical com vasta extensão territorial, possui características climáticas bastante favoráveis à inserção desse tipo de fonte em sua matriz energética, com índices de irradiação solar bastante superiores aos encontrados nos países que já utilizam sistemas FV e possuir regiões com índices pluviométricos consideravelmente baixos e céu limpo na maior parte do ano.

A diversificação da matriz energética é uma necessidade premente, visto que o potencial hidrelétrico do país vem sendo severamente impactado pelas mudanças climáticas e uma significativa redução do volume de suas bacias hidrográficas. Assim, investir em novas tecnologias diversificando a matriz energética, principalmente em se tratando de energias renováveis, é a melhor forma de suprir a demanda crescente por energia e reduzir a utilização de combustíveis fósseis, grandes inimigos do meio ambiente.

Por outro lado, apesar do Brasil dispor de grande potencial solar FV, ainda não domina as tecnologias que envolvem a construção de células e painéis, a instalação, a operação e a manutenção de parques solares fotovoltaicos, razão pela qual é necessário ampliar e desenvolver técnicas que aumentem a eficiência dos sistemas a baixo custo, o que se constitui em um grande desafio para o país: aumentar a produção de energia elétrica, produzindo energia limpa e renovável.

Esse trabalho busca contribuir com o desenvolvimento de a tecnologia de rastreadores visando o melhor aproveitamento da energia solar incidente em painéis e

sistemas FV, apresentando uma proposta de rastreador solar de baixo custo tendo em vista a considerável diferença existente no preço dos painéis fixos e dos painéis com sistemas de rastreamento.

Além disso, é uma proposta desse trabalho que os estudos aqui desenvolvidos sejam integrados à formação de profissionais que atuam nas diversas áreas do setor de energia, auxiliando na formação dos novos engenheiros e contribuindo para tornar os sistemas solares FV mais eficientes e economicamente viáveis.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos distribuídos da seguinte forma:

No capítulo 1 – INTRODUÇÃO – é apresentada a proposta, a motivação e a justificativa para os estudos aqui desenvolvidos.

No Capítulo 2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE – é feita uma breve revisão bibliográfica abordando a evolução das pesquisas no desenvolvimento de diversos tipos de células fotovoltaicas, a tecnologia dos módulos e os diversos recursos utilizados para aumento da eficiência dos sistemas FV, sejam estes isolados ou integrados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), especificamente dos concentradores e dos rastreadores.

No Capítulo 3 – CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR – o rastreador solar é apresentado em suas principais características, as vantagens e desvantagens de sua utilização para o aumento da eficiência dos sistemas FV e os rastreadores disponíveis comercialmente.

No Capítulo 4 – PROPOSTA DE UM RASTREADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO – são resumidos os detalhes de montagem, ensaios e testes do rastreador ora proposto, incluindo a especificação dos dispositivos e todo o desenvolvimento experimental considerado na concepção desse rastreador.

Finalizando esse trabalho, no Capítulo 5 – CONCLUSÕES - são apresentadas as conclusões dessa pesquisa e algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Perspectiva Histórica – Energia Solar Fotovoltaica (FV)

Os principais marcos da história da geração fotovoltaica desde o início do século XIX, estão resumidos na Tabela 1 a seguir:

1839	Becquerel descobriu o efeito fotogalvânico em eletrólitos líquidos
1873	Smith descobriu a fotocondutividade de Se sólidos
1877	Adam e Day descobrem a fotogeração de corrente em tubos de Se (Selênio); (a primeira observação do efeito PV em sólidos)
1883	Fritts constrói a primeira célula solar usando filme de Se (Selênio)
1954	Bell Laboratories USA desenvolve a primeira célula solar de Si (Silício) com rendimento de 6%
1955	Hoffman Eletrônica (EUA) oferece 2% de eficiência em células PV de Si por US \$ 1500 / W
1958	NASA lança o satélite Vanguard com painel de Si de <i>backup</i>
1959	Hoffman Eletrônica (EUA) oferece 10% de eficiência células PV de Si
1963	Sharp Corp produz primeiros módulos Si comerciais
1966	NASA lança o primeiro observatório astronômico com módulo PV de 1 kW
1972	Primeira conferência sobre PV para aplicações terrestres (IEEE)
1973	Primeira residência do mundo movido a energia solar (<i>University of Delaware, EUA</i>), Módulos solares construídos com Cu ₂ S
1974	<i>Sunshine Project</i> iniciado no Japão para promover o crescimento da indústria de PV e suas aplicações
1975	Lançado primeiro livro dedicado à ciência e tecnologia PV por Hovel (EUA)
1980	Lançada a primeira célula solar de película fina
1981	Instalado na Arábia Saudita um sistema de 350 kW com concentrador solar
1982	Construída a primeira usina de 1 MW em escala de utilidade pública (EUA)
1984	Instalado em Carrisa Plains (EUA) um sistema de 6 MW
1985	Lançamento de células solares de Si (Silício) de alta eficiência (Austrália)
1986	Primeiro módulo de alimentação de película fina comercial, o a-Si (EUA)
1994	Lançado o concentrador de multijunção GaInP/GaAs (EUA)
1997	A produção mundial PV atinge 100 MW por ano
1999	Foi desenvolvida a célula fotovoltaica mais eficiente disponível no mercado, capaz de converter 36% da luz solar em eletricidade; Sistemas fotovoltaicos instalados em todo o mundo atinge 1.000 MW;

2002	Amonix <i>and</i> Arizona Public Service instala 175 kW com sistema de alta concentração (HCPV) em Prescott; Sistemas fotovoltaicos instalados em todo o mundo atinge 2.000 MW
2004	Araki K. et al demonstram a eficiência de 28% com concentradores CPV
2006	Polysilicon utilizado pela primeira vez em células fotovoltaicas excede qualquer outra utilização de polissilício
2006	Novo recorde mundial em tecnologia de células solares chegando a 40% de eficiência
2007	Construção da Usina Solar de Nellis, uma instalação PPA 15 MW utilizando módulos da <i>SunPowerCorp.</i>
2010	O presidente Barack Obama ordena a instalação de painéis solares adicionais e um aquecedor solar de água quente na Casa Branca
2011	Crescimento rápido de Fábricas de PV na China empurram para baixo os custos de produção para cerca de US \$ 1,25 por watt para módulos fotovoltaicos de silício.
2013	Fraas propõe instalação de espelhos no espaço, em órbita sincronizada e desviar a luz solar para baixo para parques solares terrestres no início da manhã e durante a noite
2013	Instalações solares fotovoltaicos mundiais ultrapassam 100 GW

Tabela 1 - Evolução histórica do desenvolvimento de células solares

Fonte: FRAAS,

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez, em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel, que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz (BECQUEREL, 1839).

Já em 1873, o engenheiro eletricista britânico Willoughby Smith descobriu que o selênio, que é um material isolante, se transformava em condutor quando era exposto à luz. Essa propriedade é chamada de fotocondutividade. Em 1876, ele descobriu que o selênio não apenas era fotocondutor, mas que também era capaz de produzir eletricidade a partir da luz solar e tentou então construir células solares usando selênio, que não funcionaram bem.

Mais tarde, em 1877, dois inventores norte-americanos, W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz (CHAPIN et al, 1954).

Assim, em 1883, envolvidas em pastilhas de selênio, surgiram às primeiras células fotovoltaicas funcionais. Quatro anos depois, em 1887, o cientista alemão

Henrich Hertz descobriu que a radiação ultravioleta era capaz de fazer saltarem faíscas dos eletrodos das células fotovoltaicas.

Já no início do século XX, em 1905, Albert Einstein publicou um artigo sobre o efeito fotoelétrico, sobre o qual, até aquele momento, não havia nenhuma evidência. O efeito fotoelétrico só foi comprovado em 1916 pelo cientista norte-americano Robert Millikan ao demonstrá-lo em laboratório.

Ao final da II Guerra Mundial, por volta de 1947, o uso equipamentos que usavam energia solar começou a se tornar cada vez mais popular nos Estados Unidos mas seu primeiro uso comercial se deu, de fato, a partir de 1958 no espaço, para fornecer eletricidade para satélites e estações espaciais.

2.2 Evolução Tecnológica dos Painéis Solares Fotovoltaicos

A história da primeira célula solar começou em março de 1953 quando Calvin Fuller, um químico dos Bell Laboratories (Bell Labs), em Murray Hill, New Jersey, nos Estados Unidos da América, desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades elétricas, com um processo chamado de “dopagem”. Fuller produziu uma barra de silício dopado com uma pequena concentração de gálio, que o torna condutor, sendo as cargas móveis positivas (e por isso é chamado silício do “tipo P”). Seguindo as instruções de Fuller, o físico Gerald Pearson, seu colega nos Bell Labs, mergulhou essa barra de silício dopado num banho quente de lítio, criando, assim, na superfície da barra uma zona com excesso de elétrons livres, portadores de carga negativa (e por isso chamado silício do “tipo N”). Na região onde o silício “tipo N” fica em contato com o silício “tipo P”, formando uma “junção P-N”, surge um campo elétrico permanente (HOFFMAN, 2005).

A eficiência inicial de 6% foi aumentada rapidamente para 10%. A principal aplicação, por muitos anos, foi como fonte de energia para satélites espaciais. Aplicações terrestres se desenvolveram muito lentamente, visto que havia fontes consideravelmente mais baratas de energia e não existia a grande preocupação ambiental dos dias atuais. Com o passar dos anos, os módulos fotovoltaicos fascinaram não somente os pesquisadores, mas também o público em geral (HOFFMAN, 2005).

A tecnologia usada nas células fotovoltaicas foi grandemente beneficiada pelo alto padrão de desenvolvimento do enriquecimento do silício. Originalmente usado para transistores, o silício não era um material bem visto para a utilização na conversão de

energia solar em energia elétrica, visto que, por possuir uma baixa absorção de radiação solar, deveria se apresentar de forma espessa para que se pudesse obter um nível de captação eficiente.

A procura por um material mais adequado começou quase que no início do desenvolvimento das células solares. Essa pesquisa concentrou-se nas películas de filme fino, que são caracterizadas por uma estrutura que possibilita um alto nível de absorção da radiação nelas incidente.

Materiais e novas tecnologias promissoras foram surgindo, sendo o primeiro deles o silício amorfo (a-Si), que tem propriedades bem diferentes do silício cristalino. Entretanto, a expectativa inicial no silício amorfo foi contida devido à baixa eficiência e ao seu alto grau de degradação, consequência da incidência da luz solar.

Além do silício amorfo, existem alguns outros materiais que apresentam potencial para o uso em módulos fotovoltaicos, satisfazendo o requisito de alta absorção de radiação.

A maior eficiência obtida em laboratório atingiu a notável marca de 18,9%. Apesar da fabricação complicada e do alto custo, o silício cristalino ainda domina o mercado e deve continuar assim por um considerável período de tempo. O silício é um minério abundante e fácil de obter, mas não se apresenta com o grau de pureza necessário à fabricação dos painéis solares, que requerem um grau de pureza extremamente elevado, só obtido através de um processo de enriquecimento do silício, caro e de elevado gasto energético (HOFFMAN, 2005).

As células fotovoltaicas que compõem os painéis solares são fabricadas em sua maioria de silício, podendo ser de silício monocristalino, policristalino ou ainda de silício amorfo (HOFFMAN, 2005).

2.2.1 Células Monocristalinas

Este tipo de célula representa a primeira geração, com um rendimento elétrico elevado de aproximadamente 16%, podendo chegar a 23% em laboratório. As técnicas usadas na sua produção são complexas e caras, além de exigirem uma grande quantidade de energia na fabricação. Uma célula é mostrada na figura 1:



Figura 1 - Célula de silício monocristalino
Fonte: BOSCH, 2013

2.2.2 Células Policristalinas

As células policristalinas têm um custo de produção inferior, se comparadas com as monocristalinas, pois necessitam de menos energia para a sua produção. Por outro lado, as células apresentam um rendimento inferior às de silício monocristalino (entre 11% e 13%, podendo chegar a 18% em laboratório). Essa redução na eficiência surge em decorrência da imperfeição do cristal durante o processo de produção. Na figura 2, expõe-se o aspecto de uma célula de silício policristalino.



Figura 2 - Célula de silício policristalino
Fonte: SOLAR FEEDS, S. d.

2.2.3 Células de Silício Amorfo (A-SI)

A célula de silício amorfo difere das demais estruturas por apresentar um alto grau de desordem na estrutura atômica. A utilização do silício amorfo em fotocélulas tem mostrado vantagens no que tange ao processo de fabricação (TSUDA et al, 1993).

Por apresentar absorção da radiação solar na faixa visível e podendo ser fabricada mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem mostrando uma boa alternativa para sistemas de baixo custo. O rendimento, entretanto, está na ordem de 8% a 10%, podendo chegar a 13% em laboratório (HOFFMAN, 2005 e FRAAS, 2014).

As células de silício amorfo são películas muito finas. Tal característica permite a utilização em construções civis, visto que podem ser moldadas em diferentes formas, podendo, assim, obter-se algo esteticamente atraente ao mesmo tempo em que se tem a geração de energia elétrica.

Mesmo apresentando um custo reduzido de produção, o silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira está na baixa eficiência, se comparada com as de silício mono e policristalino. A segunda consiste na condição em que as células são fortemente afetadas pelo processo de degradação, o que reduz ainda mais a eficiência ao longo da vida útil. A Figura 3 mostra uma célula de silício amorfo.

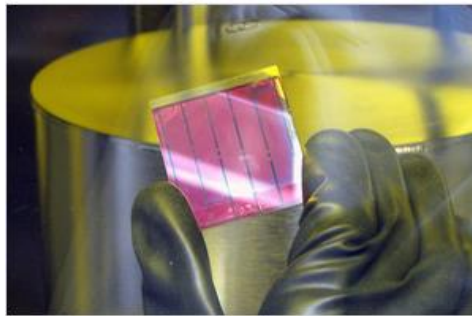


Figura 3 - Vista de uma célula solar de silício amorfo
Fonte: SOLAR FEEDS, S. d.

2.2.4 Células de Cobre, Índio, Gálio e Selênio (CIGS)

Os painéis solares compostos por cobre, índio, gálio e selênio, são de uma nova tecnologia, se comparada com o tempo do surgimento da indústria FV. Os painéis CIGS apresentam como características principais a sua espessura, pois se trata de um filme fino e da capacidade de serem fabricados de maneira mais barata do que os painéis convencionais de silício. Esses painéis apresentam hoje uma eficiência mais baixa do que os de silício; porém, por serem relativamente mais baratos, a depender da aplicação, podem ser uma alternativa viável. Os estudos apontam que, com o desenvolvimento e amadurecimento da tecnologia, em alguns anos, os painéis CIGS serão mais baratos e mais eficientes do que os de silício. A figura 4 mostra alguns painéis CIGS.

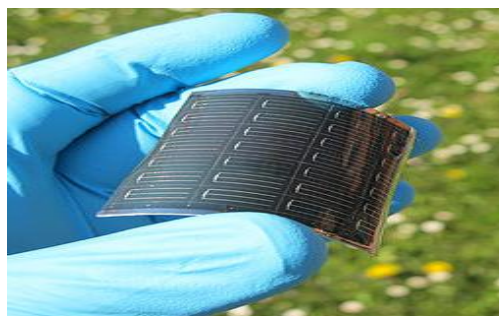


Figura 4 - Célula de cobre, índio, gálio e selênio (CIGS)
Fonte: Science Daily, 2011

O Anexo A resume as principais características das células fotovoltaicas.

2.3 Evolução Tecnológica pelo emprego da energia solar fotovoltaica

Entre os anos de 1959 e 1970 houve uma intensa discussão sobre como aumentar a eficiência dos painéis solares (que até então era de apenas 14%) e como diminuir seus custos. Somente em 1970, entretanto, é que a Exxon Corporation descobriu como produzir painéis solares mais eficientes e mais baratos.

Em 1977 o governo dos Estados Unidos começou a incentivar oficialmente o uso da energia solar, através do lançamento do Instituto de Pesquisa em Energia Solar e não demorou muito para que os governos de outros países comesçassem a fazer o mesmo.

Dessas iniciativas surgem carros e aviões movidos à energia solar e as primeiras usinas solares. O primeiro avião movido à energia solar foi construído em 1981 pelo engenheiro aeronáutico americano Paul MacCready e possuía 1600 células fotovoltaicas sobre as asas. Voou da França até a Inglaterra.

No ano seguinte, 1982, surgiu o primeiro carro movido à energia solar desenvolvido na Austrália e a partir de 1986, as primeiras plantas de energia solar em larga escala começaram a ser desenvolvidas.

Em 1999 foi desenvolvida a célula fotovoltaica mais eficiente disponível no mercado, capaz de converter 36% da luz solar em eletricidade; também nesse ano entrou em operação a maior usina solar em atividade até então, capaz de produzir cerca de 20 kilowatts, bem menos que as centenas de megawatts de capacidade das usinas atuais.

Em 2008 a crise econômica levou o governo da Espanha a reduzir os subsídios à produção de equipamentos de energia solar, o que impactou o mercado de energia solar em todo o mundo. Em consequência, sem demanda no mercado para seus produtos de alta tecnologia, em 2009 duas grandes empresas do ramo de energia solar, Evergreen Solar e Solyndra, fecharam suas portas.

Em 2012 foi inaugurada a até então maior usina solar do mundo, o Golmud Solar Park, na China, com capacidade nominal de 200 megawatts. Menos de 3 anos depois, com previsão para janeiro de 2015, estão para ser concluídas nove novas usinas maiores, ficando o posto de maior usina solar do mundo com o Desert Sunlight Solar Farm, situado no Estados Unidos, com capacidade de 550 megawatts de energia.

Todos esses empreendimentos demonstram que a utilização da energia solar fotovoltaica em massa é inevitável. Há uma pressão cada vez maior em todo o mundo para que os governos incentivem o uso de energias limpas e renováveis, ao tempo em que a cultura do “sustentável” vem se tornando cada vez mais popular. As pessoas estão cada vez mais genuinamente preocupadas com o meio ambiente e com o aquecimento global. Considere-se ainda que o custo dos painéis solares caiu pela metade nos últimos cinco anos e deve continuar caindo, basicamente por dois motivos:

- Com o aumento da demanda, os fabricantes podem reduzir sua margem de lucro para vender grandes quantidades,
- As técnicas de fabricação estão ficando cada vez mais eficientes.

Ou seja, a implantação de usinas solares vem se mostrando cada vez mais lucrativa e novas usinas devem surgir nos próximos anos, com capacidades ainda maiores que as atuais.

Hoje existem geradores fotovoltaicos que vão desde alguns miliwatts até sistemas interligados à rede elétrica convencional (*on-grid*) que vão de kilowatts a megawatts (EPE, 2012; LUQUE, 2003).

Aqui no Brasil, o mercado de energia solar ainda é pequeno mas está em franco crescimento. Existe um grande potencial ainda a ser explorado e por conta disso cada vez mais empresas estão atuando no território nacional.

Pouco a pouco, os governos federal e estaduais estão aprovando incentivos visando reduzir o custo de instalação de plantas solares FV. A microgeração distribuída, regulamentada pela ANEEL em 2012, reduziu consideravelmente o tempo necessário para o retorno do investimento no setor, sempre na expectativa de novas medidas e de pacotes de incentivos que reduzam ainda mais o custo de instalação desses sistemas.

2.4 Recursos para o Aumento da Eficiência dos Sistemas FV

O aumento da eficiência dos sistemas fotovoltaicos está ligado a diversos fatores, desde os fatores climáticos, como temperatura, irradiação solar, céu limpo ou nublado, etc. Porém, existem medidas tecnológicas que também afetam o desempenho dos sistemas FV. Tais tecnologias englobam a utilização de diferentes materiais para a fabricação das células, além do emprego de concentradores solares e/ou de sistemas de rastreamento do Sol.

2.4.1 Concentradores Solares

A vantagem da concentração da luz é substituir células solares de custo elevado por componentes óticos mais baratos, tais como espelhos e lentes. Além disso, a eficiência das células solares aumenta com a maior intensidade da incidência da luz.

Apenas a luz solar direta pode ser concentrada e por conta disso sistemas de concentração são mais adequados para locais menos ensolarados.

Esses sistemas podem ser classificados como de baixa concentração, de média concentração e de alta concentração, em função do grau de incidência solar normal na região.

O fator de concentração de 2 a 10 vezes a incidência normal do Sol é considerado baixo; no geral, os sistemas de baixa concentração são estacionários e o tipo mais comum é o de calha em V, que utiliza, basicamente, dois espelhos laterais adjacentes aos módulos fotovoltaicos, como mostrado na figura 5.



Figura 5 - Módulos FV com concentradores com baixo fator de concentração
Fonte: HOFFMAN, 2005

A concentração média se enquadra na faixa de 10 a 60 vezes o valor da incidência normal e podem ter seus sistemas acoplados a sistemas rastreadores, visando um aumento ainda maior da eficiência. Células solares utilizadas para essa faixa de concentração são as de silício cristalino especialmente modificado para funcionar com elevados valores de corrente elétrica.

Os sistemas de alta concentração, por sua vez, variam de 100 até 1000 vezes o valor de incidência normal e atingem uma eficiência acima de 30%. Eles devem ser montados com sistemas de rastreamento de dois eixos, por conta do elevado custo do

tipo de célula usado. Em geral, os sistemas de alta concentração usam espelhos parabólicos ou lentes Fresnel, como mostrado na figura 6 a seguir (HOFFMAN, 2005).

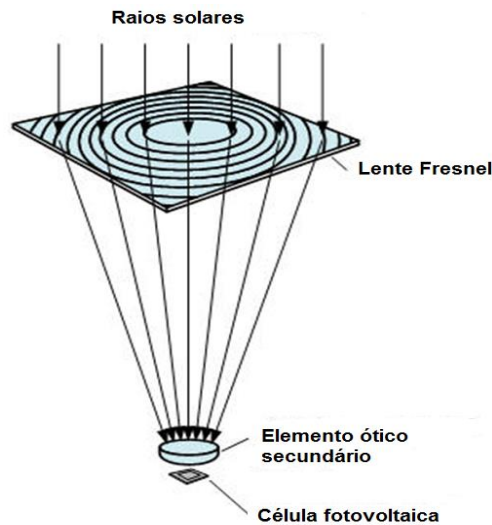


Figura 6 - Esquema de concentrador solar com lente Fresnel

Fonte: KALEIDO TECHNOLOGY, S. d.

2.4.2 Rastreadores Solares

Módulos solares com rastreamento automático da posição do Sol otimizam o ângulo de incidência dos raios solares automaticamente ao longo do dia e ao longo dos meses do ano. O sistema pode ter um ou dois graus de liberdade, como ilustrado na figura 7.



Figura 7 - Módulo solar com dois graus de liberdade de rastreamento

Fonte: VILALVA; GAZOLI, 2013

O sistema com apenas um grau de liberdade permite ajustar somente um dos ângulos de instalação do módulo: o ângulo azimutal (orientação com relação ao norte geográfico, em localidades no hemisfério norte, em localidades no hemisfério sul) ou o ângulo de inclinação do módulo com o Solo (VILALVA; GAZOLI, 2013).

Com um grau de liberdade adicional, é possível alterar os dois ângulos simultaneamente, fazendo com que o módulo esteja sempre recebendo os raios solares com o melhor ângulo de incidência possível. Nesse caso, o movimento do eixo vertical

permite ao módulo rastrear o movimento do Sol ao longo do dia e o movimento no eixo horizontal permite ajustar o ângulo e a inclinação do módulo para adaptar-se à altura solar (VILALVA; GAZOLI, 2013).

Os sistemas com rastreamento aumentam a captação de energia dos módulos. Entretanto, apesar de serem mais eficientes do ponto de vista de geração de energia, esse tipo de sistema tem um custo mais elevado de implantação além de requerer manutenção constante de suas partes mecânicas móveis e dos sistemas eletrônicos de controle (VILALVA; GAZOLI, 2013).

As condições de operação ótimas para um sistema fotovoltaico são conseguidas se a irradiação sobre a área do módulo solar FV é continuamente vertical. Ou seja, na prática toda a área do módulo solar FV deve ser continuamente ajustada para a posição real do Sol, o que é feito com o uso dos rastreadores solares (VILALVA; GAZOLI, 2013).

Existem sistemas de rastreamento que tanto podem utilizar um, como dois eixos de movimentação. Como o acompanhamento de um eixo afeta apenas um ângulo, as melhores condições para um eixo de monitoramento são obtidas se o eixo é paralelo ao eixo da Terra, ou seja, está alinhado na direção Norte-Sul. Já com os dois eixos, o seguimento ao Sol é sempre perpendicular ao módulo (DHANABAL et al, 2013; OH et al, 2012). Os sistemas de rastreamento podem ser utilizados isoladamente ou conectados a sistemas de concentração.

A figura 8 mostra um sistema de rastreamento de um eixo sem concentradores.



Figura 8 - Rastreador solar de um eixo, sem concentradores
Fonte: POULEK; LIBRA, 2000

O prédio Heliotrope, mostrado na figura 9, é um exemplo de um sistema solar fotovoltaico com rastreamento em dois eixos.



Figura 9 - Prédio Heliotrope, localizado na cidade de Freiburg, Alemanha
Fonte: SOLAR ARCHITEKTUR, S.d.

Esse prédio está situado na Alemanha, na cidade de Freiburg. O gerador FV tem uma potência de 5 kWp a Sol pleno, rastreando em dois eixos. Isso significa que o rastreamento é feito após a elevação do Sol durante o dia. À noite, ele retorna à posição orientada para o nascente.

Na Europa Central os testes têm mostrado que o rendimento de um sistema rastreado em dois eixos é cerca de 30% maior do que o rendimento de energia de um sistema FV estacionário.

Em locais onde a parcela de luz direta do Sol é mais abundante, esse valor pode ser ainda maior.

2.5 Sistemas de rastreamento solar

2.5.1 Análise Teórica do Desempenho de um Sistema com Módulo Solar FV fixo X um Sistema com Módulo Solar FV Rastreado

A Terra gira em uma órbita elíptica ao redor do Sol, tendo-o como um dos focos. A posição relativa do Sol e da terra é convenientemente representada por meio da esfera celeste em torno da Terra de modo que o plano equatorial intercepta a esfera celeste no equador e o eixo polar nos polos celestes. O movimento de Terra em torno do Sol é, então, retratado pelo movimento aparente do Sol na órbita elíptica com uma inclinação de $23,45^\circ$ em relação à Terra, tendo sua projeção no plano equatorial chamada ângulo de declinação solar.

A Terra, por sua vez, gira a uma taxa de uma revolução por dia em torno do eixo polar que é representada pela rotação da esfera celeste sobre o eixo polar; a posição instantânea do Sol é descrita pelo ângulo horário (ω), entre o meridiano que passa através do Sol e o meridiano do local. Assim, o ângulo é zero ao meio-dia e aumenta na direção do Oeste. Observando da superfície da Terra, para uma localização geográfica com (ω) de latitude, um conveniente sistema pode ser definido por uma linha vertical passando pelo local de interseção com a esfera celeste em dois pontos - o zênite e o nadir – que é oposto ao zênite - e subtendendo o ângulo ω , com o eixo polar (figura 10).

O grande círculo perpendicular ao eixo vertical é o horizonte (MOUSAZADEH et al,2009).

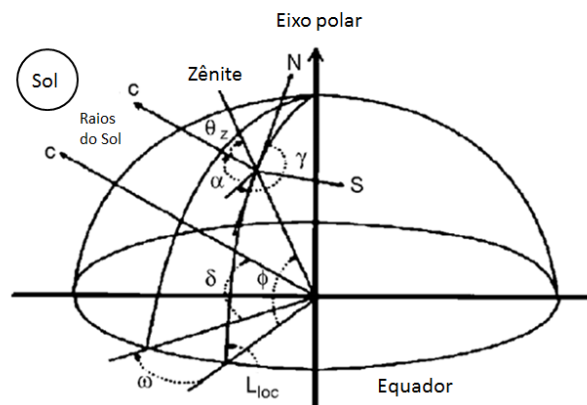


Figura 10 - Representação esquemática dos ângulos solares
Fonte: MOUSAZADEH et al, 2009

Segundo Mousazadeh et al (2009), o movimento diurno e sazonal da Terra afeta a intensidade da radiação sobre os sistemas solares. Os rastreadores solares devem mover os sistemas solares de modo a compensar estes movimentos, buscando sempre a melhor orientação em relação ao Sol. Por conta disso, embora o uso de rastreadores

solares não seja essencial, sua utilização pode aumentar a energia coletada de 10 a 100%, para diferentes períodos de tempo e de condições geográficas.

Por outro lado, como os sistemas de rastreamento causam grandes perdas de energia nos sistemas de conexão, seu uso não é recomendado em pequenos painéis solares. Na prática, verifica-se que o consumo de energia do dispositivo de rastreamento é da ordem de 2 a 3% da energia produzida pelo módulo (MOUSAZADEH et al, 2009).

Como o Sol está se movendo relativamente a Terra durante o dia, no caso de coletores solares fixos, a projeção de área de coletor, que é perpendicular à direção de radiação, é dada pela função cosseno do ângulo θ de incidência (figura 11).

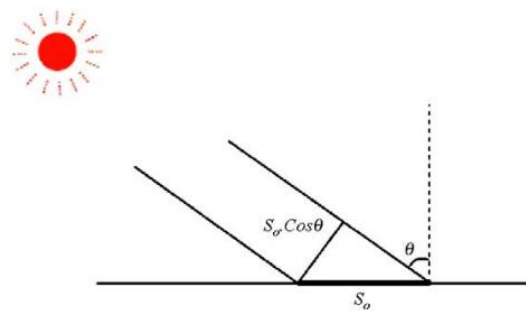


Figura 11 - Ângulo de incidência θ da radiação solar
Fonte: MOUSAZADEH et al, 2009

Quanto maior for o ângulo de incidência θ , menor é a potência do sistema.

No caso de se utilizarem rastreadores, o cálculo teórico da energia extraída é realizado assumindo que a máxima intensidade de radiação $I = 1.100 \text{ W/m}^2$ e está incidindo sobre a área que está orientada perpendicularmente à direção de radiação.

Tomando a duração do dia por um período de doze horas, $T = 12 \text{ h} = 43.200 \text{ s}$, a intensidade da energia captada com o coletor com rastreamento, que está sempre orientado para o Sol, pode ser considerada equivalente à de um coletor fixo e orientado perpendicularmente à direção de radiação apenas ao meio-dia. A área de coletor é marcada como S_0 .

Logo, para um coletor fixo, a área de projeção na área orientada perpendicularmente à direção de radiação é dada por $S = S_0 \cos\theta$ e varia no intervalo $(-\pi/2, +\pi/2)$ durante o dia.

A velocidade angular do movimento do Sol através do céu – dada por $\omega = 2\pi/T = 7,27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ e a diferença da perda de energia, desprezando-se a influência da atmosfera, corresponde à energia por unidade de área, calculada para um dia inteiro:

$$\begin{aligned}
 W &= \int_{-21.600}^{+21.600} IS_0 \cos \omega t \, dt = IS_0 \left[\frac{\sin \omega t}{\omega} \right]_{-21.600}^{+21.600} = \frac{2IS}{\omega} \\
 &= 3,03 \times 10^7 \, Ws = 8,41 \frac{kWh}{m^2} \, dia
 \end{aligned} \tag{1}$$

Se o sistema coletor possui rastreamento, desprezando a influência da atmosfera, a energia por unidade de área para o período de um dia é dada por:

$$W = IS_0 t = 4,75 \times 10^7 \, Ws = 13,2 \frac{kWh}{m^2} \, dia \tag{2}$$

Comparando as equações (1) e (2) verifica-se que, no último caso, ou seja, o sistema com rastreamento, obtém-se 57% a mais de energia. Isso ocorre porque, como os raios solares que atingem a superfície da Terra atravessam a espessa camada de atmosfera, à medida que se desviam a partir do meio-dia, o grau de insolação na superfície é enfraquecido.

3 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR

3.1 Introdução

Como visto anteriormente, a existência de um seguidor solar não é essencial para a operação de um painel solar, mas, sem ele seu desempenho é reduzido. Por outro lado, embora os seguidores solares possam aumentar o ganho de energia de geradores fotovoltaicos, alguns problemas em sua instalação, tais como custo, confiabilidade, consumo de energia, manutenção e desempenho, precisam ser considerados. (MOUSAZADEH et al, 2009).

Segundo Mousazadeh et al (2009), todos os sistemas de rastreamento têm algumas das seguintes características:

- Estrutura de coluna única.
- Um ou dois motores em movimento.
- Dispositivo de detecção de luz.
- Fornecimento de energia autônoma ou auxiliar.
- Seguidor solar se movendo de acordo com o calendário.
- Movimento contínuo ou passo a passo.
- Monitorando todo o ano ou, todo o ano exceto no inverno.
- Ajuste de orientação com ou sem o ajuste do ângulo de inclinação.

3.2 O Desenvolvimento dos Sistemas de Rastreamento Solar

O primeiro rastreador solar foi introduzido por Finster em 1962 e era completamente mecânico. Um ano depois, Saavedra apresentou um mecanismo com um controle eletrônico automático, que foi inicialmente utilizado para orientar um piroheliômetro (MOUSAZADEH et al, 2009).

Segundo MOUSAZADEH et al (2009), os rastreadores não precisam apontar diretamente para o Sol para serem eficazes. Se o módulo FV estiver desalinhado em 10° em relação aos raios solares, o ganho de saída será ainda de 98,5%. Em locais muito nublados, o ganho anual na saída de rastreadores pode estar na baixa gama de 20%, mas em geral, os ganhos anuais estão entre 30 e 40%. O ganho, em qualquer dia, pode variar de zero até cerca de 100%.

Bione et al (2004 apud MOUSAZADEH et al, 2009) compararam sistemas de bombeamento acionados por painéis fixos e com rastreamento com os sistemas FV com concentração. Em seu estudo, um sistema de concentração PV-V (em forma de cocho) foi montado com quatro cavidades e dois módulos FV para acompanhar o Sol ao longo do seu eixo N-S inclinado segundo um ângulo de 20° para o norte. Foram realizadas uma simulação teórica e uma comparação experimental entre três casos. Por meio da análise da curva característica diária dos três modos citados, os resultados mostraram que, para uma dada irradiância, a vazão de água bombeada foi significativamente diferente um do outro. Eles provaram que as relações de benefício obtidas por volume de água foi maior do que para a energia solar coletada. Ou seja: o sistema FV fixo, o sistema FV com rastreador e os sistemas de concentração com rastreamento bombearam 4,9 m³/dia; 7,4 m³/dia e 12,6m³/dia, respectivamente (MOUSAZADEH et al, 2009)

Em seus estudos, Tomson apud MOUSAZADEH et al, 2009 analisou o desempenho de dois posicionadores de um único módulo plano com concentrador. O coletor foi girado em torno de seu eixo único duas vezes por dia considerando desvios predefinidos. O efeito de diferentes ângulos de inclinação, da inclinação inicial e do ângulo de azimute inicial, foi avaliado no ganho diário e sazonal. A comparação da simulação com os resultados experimentais indicaram que o uso de uma simples unidade de rastreamento com entrada de baixa energia por um breve movimento diário, aumenta a produção de energia sazonal de 10 a 20% em relação ao obtido por um sistema com coletor fixo (MOUSAZADEH et al, 2009).

Agee et al (2007 apud MOUSAZADEH et al, 2009) examinaram aspectos como as tendências do mercado e do campo, as aplicações das tecnologias de seguimento solar, os custos associados, os requisitos de manutenção e a melhoria de eficiência obtida, aplicados a sistemas hidráulicos, programas de controle e rastreadores baseados em sensores - tipo de eixo único, tipo duplo eixos e seguidores de eixo polar. Eles descobriram que os sistemas de rastreamento de eixo polar têm seu rendimento semelhante ao do tipo de dois eixos, com um custo similar ao de um sistema de rastreamento de um único eixo.

3.3 Classificação dos Rastreadores

Vários métodos de seguimento do Sol foram pesquisados e avaliados para manter os painéis solares, concentradores solares, telescópios ou outros sistemas solares perpendiculares ao feixe de luz do Sol.

Um rastreador ideal iria permitir que a célula fotovoltaica acompanhasse com precisão a direção do Sol, para compensar tanto as variações do ângulo de altitude do Sol (todo o dia), deslocamento latitudinal do Sol (durante alterações sazonais) e alterações no ângulo de azimute.

Assim, sistemas de rastreamento solar são, geralmente, classificados em duas categorias: passivos (mecânicos) e ativos (elétricos) (MOUSAZADEH et al, 2009).

3.3.1 Rastreadores Passivos

Seguidores solares passivos são baseados na expansão térmica de um material (normalmente Freon) ou ligas com memória de forma. Geralmente, esse tipo de rastreador é composto por um par de atuadores trabalhando um contra o outro, que são, por igual iluminação, equilibrados. Com uma iluminação diferente nos atuadores, as forças desequilibradas são utilizadas para orientação do aparelho, de tal modo que a igualdade na iluminação dos atuadores o equilíbrio de forças é restaurado.

Seguidores solares passivos, em comparação com rastreadores ativos, são menos complexos, mas trabalham com baixa eficiência e em baixas temperaturas para trabalhar. Os testes demonstraram que os vários rastreadores passivos são eletricamente comparáveis com base em termos de desempenho. Embora os rastreadores passivos sejam geralmente menos caros, eles ainda não foram amplamente aceitos pelos consumidores (MOUSAZADEH et al, 2009).

Clifford (2004 apud MOUSAZADEH et al, 2009) apresentou um novo seguidor solar passivo modelado com computador. Ele constatou que, embora a expansão gerada nos metais tivesse desvios pequenos, as forças correspondentes eram grandes. O desenvolvimento do rastreador solar passivo incorporou duas tiras bimetálicas feitas de alumínio e de aço, posicionadas numa estrutura de madeira, de forma simétrica em ambos os lados de um eixo central horizontal. As tiras bimetálicas são sombreadas, de modo que a tira mais longe do Sol absorve a radiação solar, enquanto que a outra tira permanece sombreada de uma forma semelhante ao desenho ilustrado na figura 12 (MOUSAZADEH et al 2009).

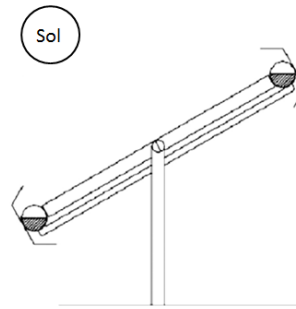


Figura 12 - Rastreador passivo usando dois tubos cilíndricos idênticos preenchidos com um fluido sob pressão parcial

Fonte: MOUSAZADEH et al, 2009

Comparando o modelo de computador com os resultados experimentais, verificou-se que os dois casos apresentaram resultados muito semelhantes um ao outro. Nesse trabalho a energia solar coletada com o rastreador tinha o potencial para aumentar a eficiência dos painéis solares em até 23% e recomendou o uso do mecanismo de retorno à noite e a utilização de um sistema de eixo duplo para o desenvolvimento futuro (MOUSAZADEH et al, 2009).

Poulek (2007 apud MOUSAZADEH et al, 2009) projetou e testou um rastreador solar passivo de eixo único com base em atuadores de liga com memória. O atuador foi facilmente deformado mesmo sob 70 °C e funcionou como um motor de calor. Quando aquecido acima da temperatura de transformação, ele retornou à sua forma original. Assim, Poulek concluiu que a eficiência desses atuadores é cerca de duas ordens de grandeza superior a dos atuadores bimetálicos (MOUSAZADEH et al, 2009).

3.3.2 Rastreadores Ativos

Segundo Mousazadeh et al (2009), os principais rastreadores ativos podem ser classificados em:

- Rastreadores microprocessados,
- Rastreadores baseados em sensores eletro-ópticos,
- Rastreadores controlados por PC, data e hora e ainda,
- Rastreadores com célula solar auxiliar dupla face e uma combinação desses três sistemas.

Seguidores solares eletro-ópticos são geralmente compostos de, pelo menos, um par de fotorresistores ligados antiparalelos. As células que recebem igual intensidade de iluminação, para que não haja nenhum ou apenas um insignificante sinal de controle, mantêm um motor de acionamento parado. Quando um dos sensores é iluminado

diferentemente, o motor é ligado e o acompanhamento do Sol é realizado (MOUSAZADEH et al, 2009).

Na célula solar auxiliar dupla face, os sensores acionam o sistema para a posição desejada e um PC controla, com base na data e hora, calcula a posição do Sol com algoritmos e cria sinais para o controle do sistema (MOUSAZADEH et al, 2009).

Sensores baseados em eletro-ótica (fotoretistores) e microprocessadores, (figura 13a) são utilizados para acionar um motor e, assim, orientar o módulo FV no sentido de que essa iluminação dos sensores eletro-ópticos torne-se igual e equilibrada.

Além disso, os fotodiodos ou fotoretistores podem ser montados em planos inclinados para aumentar a sensibilidade da fotocorrente (figura 13b).

É comum que em aplicações FV com concentrador, o dispositivo de sombreamento apresente-se como um tubo de colimação, que impede que a irradiação difusa entre no sensor e mascare a medição da posição de alinhamento com o Sol (figura 13c) (MOUSAZADEH et al, 2009).

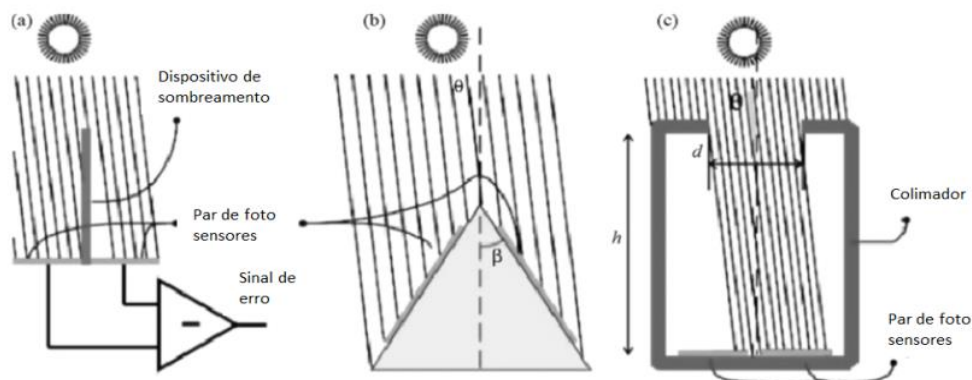


Figura 13 - (a) Princípio do equilíbrio de sombreamento (b) Sensores apontando para o Sol (c) Sensores de imagem do Sol por meio de um colimador

Fonte: MOUSAZADEH et al, 2009

Esses rastreadores, que possuem alta precisão, são utilizados principalmente em sistemas solares com concentradores, uma vez que são complexos e, por conseguinte, caros.

Abdallah (2004 apud MOUSAZADEH et al, 2009) concebeu e construiu sistemas rastreadores de um e de dois eixos, em malha aberta, controlados por CLP (Controlador Lógico Programável). Seu princípio de funcionamento é baseado na definição matemática da posição da superfície do módulo FV, definida por dois ângulos: a inclinação da superfície e ângulo de azimute. O declive foi considerado como igual ao ângulo zênite do Sol. Foram utilizados dois motores de rastreamento, um para a articulação de rotação em

torno do eixo de N-S e outro para a articulação rotativa sobre o eixo vertical. O dia com luz solar foi dividido em quatro intervalos e durante cada um deles, a velocidade dos motores solares foi definida e programada no CLP.

Ele previu que o consumo de energia para impulsionar os motores e sistemas de controle dificilmente ultrapassaria 3% da energia economizada pelo sistema de rastreamento.

A figura 14 apresenta a comparação entre a energia coletada por um sistema FV com rastreador de dois eixos e por um sistema FV fixo inclinado a 32°. Ou seja: a utilização de rastreamento de dois eixos resulta em um aumento no total diário de energia coletada de cerca de 41,34% em comparação com a de um painel fixo (MOUSAZADEH et al, 2009).

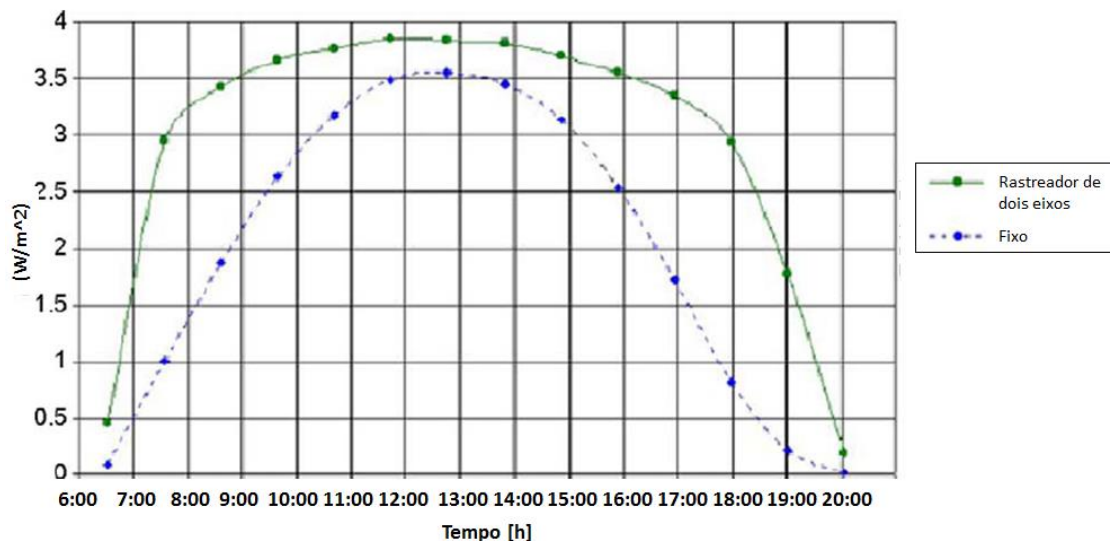


Figura 14 - Comparação entre um sistema de energia solar rastreado e um fixo
Fonte: MOUSAZADEH et al, 2009

Bingol (2006 apud MOUSAZADEH et al, 2009) implementou e testou um sistema de dois eixos de rastreamento do Sol com base em um microcontrolador. Ele usou fotoresistores (LDR's) como sensores, motores de passo como atuadores e um microcontrolador. Além disso, o sistema foi ligado a um computador por meio de uma entrada RS232 para monitoramento da posição do Sol. Um cristal, com uma frequência de 4 MHz, foi usado como um gerador de sinal de clock para o microcontrolador. O grau de liberdade do painel de eixo vertical foi fixado em 50°. Dois painéis solares, um estacionário (fixo) e outro rotativo, foram utilizados no teste. A temperatura dos painéis em função do tempo foi medida em intervalos de 50 minutos e os dados foram capturados.

Uma diferença de 9°C entre o painel com rastreamento e o estacionário foi observada (MOUSAZADEH et al, 2009).

Koyuncu (1991 apud MOUSAZADEH et al, 2009) avaliou um rastreador de dois eixos baseado em microprocessador. Dois interruptores de fim de curso ligados ao microprocessador foram utilizados para definir a máxima posição angular no leste e no oeste e limitar o movimento do painel. Os resultados do teste mostraram que, enquanto o plano do painel foi mantido normal ao Sol, o máximo de energia coletada foi obtido (MOUSAZADEH et al, 2009).

Lakeou (2006 apud MOUSAZADEH et al, 2009) concebeu e construiu um rastreador de dois eixos para seguir o Sol - em azimute e em direção solar - baseado em um controlador lógico programável (84-pin, Xilinx XC95108). Um controlador foi ligado a motores de corrente contínua através de uma estrutura de ponte-H. Após a escolha do local de instalação do sistema, foi determinada a faixa de elevação do azimute e os passos angulares foram calculados. O total de etapas de inclinação previa um horizonte de 12 anos para monitorar a geração de energia. Finalmente o dispositivo de rastreamento foi monitorado a partir de um PC utilizando um código desenvolvido em linguagem C ++. O resultado desse trabalho foi o desenvolvimento de um rastreador rentável e flexível (MOUSAZADEH et al, 2009).

Hamilton (1999 apud MOUSAZADEH et al, 2009), em sua tese, projetou e construiu um rastreador baseado em um microcontrolador, utilizando dois motores para inclinar o painel em dois planos de movimento. O algoritmo foi concebido para ler e amplificar as saídas dos sensores e, em seguida, comparar os dados digitalmente para determinar a posição exata do Sol e para ativar o posicionando motores de passo. O sensor foi uma pirâmide de quatro lados na estrutura com células solares montadas em cada lado. O microcontrolador foi programado em linguagem C. O dispositivo foi testado tanto no campo quanto em laboratório, utilizando uma lanterna portátil em 16 posições, dentro de uma área esférica. Os resultados mostraram que o sistema de seguimento do Sol recolhia a máxima energia ao longo do dia, enquanto o sistema estacionário o fazia apenas quando o Sol estava posicionado verticalmente (MOUSAZADEH et al, 2009).

Huang (2007 apud MOUSAZADEH et al, 2009) desenvolveu e avaliou um mecanismo de rastreo de um eixo para ajustar a posição do módulo FV em apenas três ângulos (três de rastreamento de posição): manhã, meio-dia e à tarde. O mecanismo incluiu um suporte único, uma plataforma de inclinação ajustável, um módulo FV acionado por

um motor e um sensor de posicionamento solar, composto por dois elementos fotosensores divididos por uma placa de sombreado vertical. Três chaves de fim de curso foram montadas na engrenagem de transmissão. O painel FV para com o toque no interruptor. A localização do interruptor determina o ângulo de paragem. Muitos estudos analíticos mostram que a máxima radiação solar incidente pode ser obtida se o ângulo de inclinação da superfície for aproximadamente igual à latitude. Ele calculou a energia total anual em vários ângulos do sensor e encontrou o máximo de energia anual total. Os resultados mostraram que o ângulo de paragem ótimo era 50° e o ângulo de comutação ideal era 25° , correspondente à metade do ângulo de parada. Repetindo o cálculo para a energia solar em diferentes ângulos de inclinação ao meio-dia e em diferentes latitudes, verificou-se que o ângulo máximo de rastreamento foi de cerca de 50° , independentemente da latitude. A partir dos resultados, ele comprovou que a geração de energia FV aumenta em 24,5% em relação ao de um módulo fotovoltaico fixo (MOUSAZADEH et al, 2009).

Kalogirou (1996 apud MOUSAZADEH et al, 2009) projetou e construiu um rastreador solar de um eixo, constituído por um sistema de controle com três fotoresistores e um motor DC. Um sensor foi responsável pela detecção de feixe direto; o segundo foi sensor para nuvens e o terceiro foi o sensor de luz difusa. O sistema de controle consistiu de: timer, muitas resistências e componentes eletrônicos. Quando qualquer um dos três sensores era sombreado, o motor era ligado. O sistema acompanhou o Sol na direção Leste Oeste e a velocidade de rotação final do coletor foi 0,011 rpm. Vários testes com o coletor solar mostraram que o mecanismo de rastreamento foi muito preciso. O erro encontrado para $100\text{W}/\text{m}^2$ de radiação foi de $0,2^\circ$ e para $600\text{W}/\text{m}^2$ de radiação, foi reduzido para $0,05^\circ$ (MOUSAZADEH et al, 2009).

Gagliano (2006 apud MOUSAZADEH et al, 2009) projetou e simulou um rastreador de dois eixos baseado em um sensor com fotoresistores (LDR's) e investigou os efeitos do ganho de energia entre um painel FV fixo e outro rastreado. O dispositivo de detecção consistiu de nove resistências dependentes da luz (LDR's), para rotação e de três LDR's alinhados para inclinação, posicionadas em suportes plásticos adequados. A principal vantagem do sistema de seguimento proposto foi o baixo custo do aparelho de detecção (MOUSAZADEH et al, 2009).

Zogbi (1984 apud MOUSAZADEH et al, 2009) projetou e construiu um rastreador de dois-eixos (elevação e azimute), de baixo custo com componentes eletrônicos clássicos. Quatro sensores eletro-óticos foram colocados em cada quadrante, formado por dois planos

retangulares que se cruzam entre si em uma linha. A unidade de controle do rastreamento consistiu de um amplificador e outros componentes eletrônicos para comparar os sinais recebidos a partir de cada par de sensores e comandar dois motores de rotação do dispositivo. O sistema teve um retorno para o leste feito por um circuito auxiliar à noite que o fazia retornar para leste na manhã seguinte. Quando a saída, a partir de um dos sensores, foi maior do que o limiar, o motor correspondente era ativado por um amplificador diferencial. Ele concluiu que a construção do protótipo operava com sucesso sob intensidade de luz variável (MOUSAZADEH et al, 2009).

Palavras (2001 apud MOUSAZADEH et al, 2009) desenvolveu um sistema de concentração de energia solar tipo parabólico (heliotérmico) com mecanismo de rastreamento de dois eixos. O diâmetro da parábola foi de 2,85 m e sua distância focal foi de 1,02 m. O rastreador foi implementado com um circuito eletrônico, que processou os sinais de um conjunto de sensores fotorresistivos (LDR's) e com sinais de saída para os relés de acionamento da parabólica, com um circuito de alimentação com 5 V. Quando os sensores estavam desequilibrados, suas resistências eram diferentes e o relé alimentava um sistema de potência em $24 V_{DC}$ que atuava na parábola. As medições mostraram que, no ponto focal, a temperatura atingiu $300^{\circ}C$ (MOUSAZADEH et al, 2009).

Roth (2004 apud MOUSAZADEH et al, 2009) concebeu e construiu um rastreador de dois eixos. Ele usou um piroheliômetro como instrumento de medição para seguir o Sol, potenciômetros e chaves fim de curso, juntamente com os eixos de movimento (um para cada um dos eixos) para enviar um sinal para a CPU proporcional ao movimento dos eixos. O microprocessador da série 16F877 formou a parte principal, conectado a um PC e dois sensores: um para informação da posição do Sol e o outro para a indicação da intensidade da radiação do Sol, sinalizando o começo e no fim do dia. Durante o modo de rastreamento horário, o rastreador calculava a posição do Sol com base em dados de data/hora. Os erros foram medidos durante o dia e armazenados para análise posterior. Os dados recolhidos durante o dia eram analisados e um novo conjunto de parâmetros para avaliação dos erros era computado. Esses dados eram utilizados no dia seguinte para calcular mais posições do Sol. No modo de Sol, o rastreador utilizava os dados da posição do Sol para controlar ativamente o sensor. Se a intensidade caía abaixo de um determinado nível, o sistema voltava temporariamente ao modo de relógio. Para uma radiação solar abaixo de $140 W/m^2$, o sistema caía subitamente para zero, mas acima desse valor, o sistema funcionava sob condições estáveis. Para a preparação e testes um piroheliômetro da Eppley foi

montado junto do rastreador e para fazer ajustes mais exatos e comparar a irradiância medida com o piroheliômetro, foram utilizados três piroheliômetros adicionais, sendo dois Eppley e o outro, um piroheliômetro Kipp e Zonen. As experiências apresentaram bons resultados comparáveis ao do rastreador suíço INTRA, a um custo bem menor (75 vezes mais barato do que Rastreador suíço) (MOUSAZADEH et al, 2009).

Poulek (2007 apud MOUSAZADEH et al, 2009) descreveu um seguidor solar muito simples e confiável para aplicações espaciais e terrestres. Componentes eletrônicos caros e de difícil obtenção e as baterias de armazenamento foram completamente eliminados. O sistema funcionava também em temperaturas abaixo de 40°C. A área do painel solar auxiliar do rastreador era cerca 1% da área total de painéis solares principais. Sua célula solar auxiliar dupla face com painéis solares também de dupla face permitiam o retrocesso de qualquer posição, em um ângulo de 360°, enquanto que rastreadores similares usando células solares monofaciais só permitem um rastreamento / retrocesso até um ângulo de 120°. Ele concluiu que o rastreador seguia o Sol com um desvio de 5°, sem qualquer redução na energia coletada. O sistema assim construído obteve mais do que 95% da energia de um rastreador ideal. (Figura 15) (MOUSAZADEH et al, 2009).

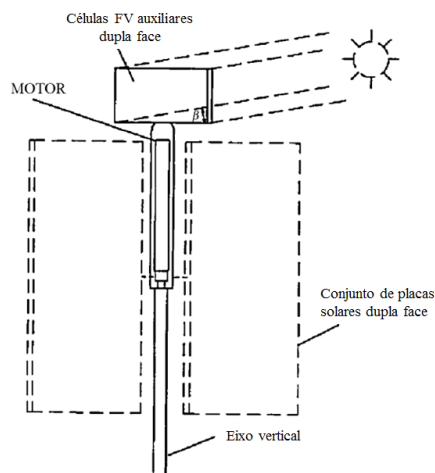


Figura 15 - Esquema de um rastreador terrestre

Fonte: MOUSAZADEH et al, 2009

Em outro trabalho, ele projetou e construiu um rastreador solar com base numa placa solar auxiliar dupla face capaz de retornar dentro de 5 min e com precisão média de rastreamento de 5° para ser instalado junto a um concentrador em forma de V com módulos de energia solar dupla face. Dois módulos antiparalelos de células solares, com 1% da área dos coletores solares principais foram conectados diretamente a um motor DC reversível

com uma transmissão de autotravamento. Em tempo nublado, toda vez que o Sol começava a brilhar, os módulos começavam a se mover. O resultado experimental mostrou que o uso de módulos fotovoltaicos dupla face, com reduzida sensibilidade à temperatura, pode aumentar o ganho de energia entre 15-25% em comparação com o mesmo rastreador/concentrador de uma única face. O eixo do seguidor solar foi construído em C-Si (carbono-silício) (MOUSAZADEH et al, 2009).

Poulek (1994 apud MOUSAZADEH et al, 2009) projetou um seguidor solar com base em um novo arranjo de células solares conectados diretamente a um motor DC reversível. A figura 16 mostra o princípio do rastreador. Um sinal diferencial foi usado para superar o atrito e a aerodinâmica do arrasto. O eixo de rotação do rastreador foi orientado na direção N-S com uma exatidão de cerca de 10%. A área do painel auxiliar do rastreador solar era cerca de 2% da área coletores principais e a energia excedente coletada foi até 40% superior (MOUSAZADEH et al, 2009).

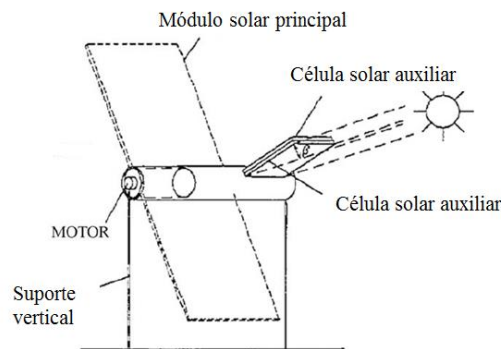


Figura 16 - Rastreador de eixo horizontal

Fonte: (MOUSAZADEH et al, 2009)

Bakos (2006 apud MOUSAZADEH et al, 2009) projetou e construiu um rastreador de dois eixos baseado na combinação de rastreamento convencional com fotorresistores e um método de programação de controle. O dispositivo eletromecânico era composto por quatro relés, dois circuitos eletrônicos, dois fotorresistores ligados em série e dois motores de corrente alternada. Sob operação manual, desenhando uma representação gráfica e definições do nascer e do por do Sol, o sistema foi conectado a um computador com um código escrito em linguagem C Visual ++ de programação. O sistema podia rastrear o Sol em direção Leste-Oeste e Norte-Sul. Ele concluiu que o sistema de rastreamento de dois eixos teve seu rendimento maior em até 46,46% , em comparação com a do coletor fixa (MOUSAZADEH et al, 2009).

Saxena (1990 apud MOUSAZADEH et al, 2009) projetou e fabricou um rastreador de dois eixos baseado em um microprocessador controlador que seguia o Sol em duas direções com dois motores de passo. O sistema funcionava em modos de circuito fechado e de circuito aberto. O seu sistema de dados consistiu na aquisição e armazenamento, facilidade de controle da bateria, sistema de monitoramento, RAM, placa de conversor, cartão de microprocessador e sensor para velocidade de ventos, nuvens, altitude, azimute. No modo de circuito fechado, o rastreador começava a operar às cinco horas e se movia em modo *CLOUD* (nuvem) até que o Sol aparecesse. O Rastreador era trazido de volta à posição de origem no meio da noite. Os dados para os parâmetros fotovoltaicos e parâmetros meteorológicos foram coletados a cada 10 min (MOUSAZADEH et al, 2009).

3.3.3 Conclusão

O ganho de energia, a partir de diferentes dispositivos de rastreamento, é classificado na tabela 2.

Tipo	Segundo eixo	Método de rastreamento	Modo de avaliação	Latitude local	Comparado com	Ganho
Dois eixos			Teoricamente		Fixo	57%
Dois eixos			Em geral		Fixo	0-100% diário 30-40% anual
Um eixo	Inclinado com duas posições		Simulação computacional		Fixo	10-20% Sazonal
Um eixo azimutal	Inclinado em três posições				Plano horizontal	72% anual
Inclinado otimizado	Fixo				Plano horizontal	30,2% anual
Um eixo azimutal	Inclinado em três posições				Ângulo horário de três posições	0%
Azimute variável	Inclinação fixa		Simulação computacional e experimental		Fixo com inclinação de 40°	9,9% anual
Rastreamento sazonal	Inclinação fixa		Simulação computacional e experimental		Fixo com inclinação de 40°	2,4% anual
Azimute variável	Inclinação fixa		Simulação computacional e experimental		Rastreamento sazonal	7,4% anual
Dois eixos	-		Experimental e teóricamente		Horizontal	30-40%
Dois eixos	-		Experimental		Inclinado horizontalmente 40°	30% anual
Eixo azimutal (vertical)	Horizontal		Experimental		Inclinado horizontalmente 40°	18% anual
Rastreador N-S	Inclinação 6°		Experimental		Inclinado horizontalmente 40°	11% anual
Dois eixos	-		Real		Inclinado 36°	37,7% anual
Dois eixos	-		Real		Inclinado fixo 30°	30,4% anual
Dois eixos	-		Simulação		Eixo N-S	10% anual
Dois eixos	-		Simulação		Eixo polar (N-S com eixo de inclinação sul)	3% anual
Dois eixos	-		Experimental		Inclinado 40° fixo	38% anual
Um eixo (eixo N-S)	-		Experimental		Inclinado 40° fixo	34% anual
Dois eixos	-		Teóricamente		Inclinado 40° fixo	54%
Inclinado com φ - 5 fixo	Fixo		Teóricamente		Horizontal	10% anual
Horizontal eixo N-S	Fixo		Teóricamente		Horizontal eixo Leste-Oeste	15% anual
Eixo polar	Inclinação sul		Teóricamente		Horizontal eixo N-S	10% anual
Dois eixos	-		Teóricamente		Eixo Polar	0%
Dois eixos	-		Teóricamente		Horizontal eixo N-S	26,2% anual
Dois eixos	-		Teóricamente		Horizontal eixo Leste-Oeste	10,9% anual
Um eixo	Face sul		Real		Inclinação sul fixa	20% anual
Dois eixos	-		Teóricamente	23,3°	Horizontal	7% anual
Dois eixos	-		Teóricamente	47,7°	Superfície horizontal	21% anual
Polar (azimute variável)	Inclinação fixa		Teóricamente	23,3°	Superfície horizontal	15,9% anual
Azimute	Horizontal		Teóricamente	23,3°	Superfície horizontal	13,1% anual
Rastreador E-O	N-S horizontal	Velocidade de rotação constante	Teóricamente	23,3°	Superfície horizontal	13% anual
Rastreador N-S	Leste Oeste Horizontal	Feixe de irradiação máxima	Teóricamente	23,3°	Superfície horizontal	8,3% anual
Dois eixos	-		Real		Inclinação sul fixa	40% anual
Dois eixos	-	Sensor Eletro-ótico	Experimental	32°	Inclinação fixa 32°	41,34% anual
Rastreador Leste-Oeste	Inclinação fixa	Sensor Eletro-ótico	Experimental		Inclinação fixa	20% anual
Rastreador N-S	Inclinação fixa	Sensor Eletro-ótico	Experimental		Inclinação fixa	30-45% anual
Dois eixos (azimutal e		Sensor Eletro-ótico	Experimental		Inclinação fixa	35% anual
Dois eixos (Portátil)		Sensor Eletro-ótico	Experimental		Inclinação fixa	30%
Dois eixos		Sensor Eletro-ótico	Experimental	32°	Inclinação fixa	43,87% anual
Azimute (vertical)		Sensor Eletro-ótico	Experimental	32°	Inclinação fixa	34,43%
Rastreador E-O	Inclinação fixa	Sensor Eletro-ótico	Experimental	32°	Inclinação fixa	37,53%
Rastreador N-S	Inclinação fixa	Sensor Eletro-ótico	Experimental	32°	Inclinação fixa	15,69%
Um eixo Leste-Oeste	Inclinação fixa	Célula auxiliar dupla face	Experimental		Rastreador completo	-5%
Um eixo Leste-Oeste	Inclinação fixa	Célula auxiliar dupla face	Experimental		Inclinação fixa	30%
Dois eixos		Combinação sensor eletro-ótico e base de tempo data/hora	Experimental		Inclinação fixa 40°	46,46%

Tabela 2 – Ganho de energia para os diferentes tipos de rastreadores

Fonte: MOUSAZADEH et al, 2009

Segundo Mousazadeh et al (2009), mesmo levando em consideração o estado da arte, todos os rastreadores solares são categorizados unicamente em dispositivos de um

eixo ou de dois eixos. No entanto, as superfícies de rastreo, incluindo rastreadores passivos ou ativos, também podem ser classificadas como na figura 17.

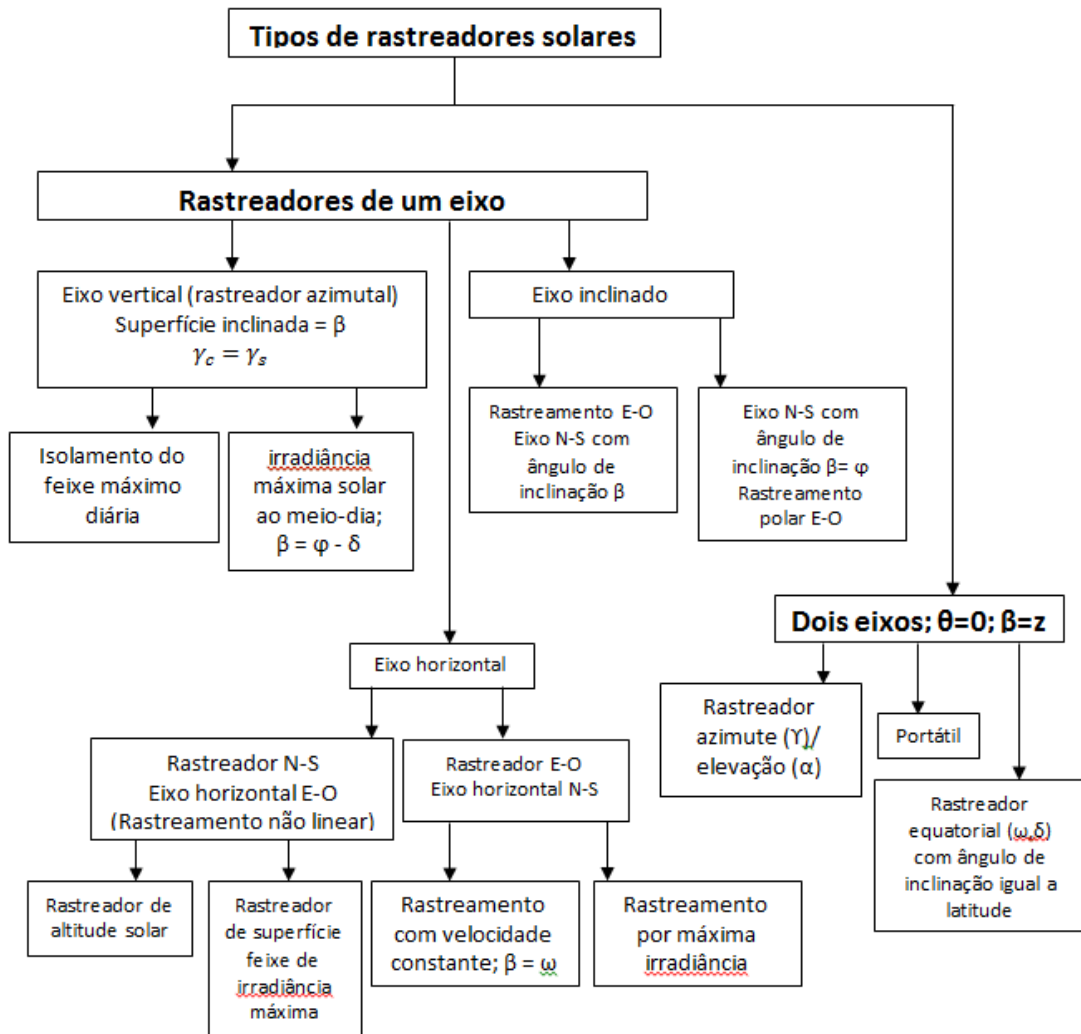


Figura 17 - Tipos de rastreadores
 Fonte: MOUSAZADEH et al, 2009

3.3.4 Rastreadores Disponíveis no Mercado

No anexo E, são mostrados os vários rastreadores disponíveis no mercado e seus respectivos custos.

4. PROPOSTA DE UM RASTREADOR SOLAR DE BAIXO CUSTO

No Capítulo 3 foram apresentadas algumas propostas de rastreadores solar, sempre visando aliar o melhor desempenho do sistema fotovoltaico com as tecnologias disponíveis a um menor custo.

No Brasil, os sistemas FV vêm sendo instalados prioritariamente em regiões com alto grau de insolação e significativos déficits de energia; que, por serem regiões mais remotas e com menor desenvolvimento econômico, não remuneram o investimento.

Localidades remotas situadas na região norte do Brasil, ou sítios mais pobres e secos situados na região nordeste carecem de um fornecimento de energia com um preço final do kWh o mais baixo possível. Na maioria dos casos, os sistemas FV utilizados nessas regiões são sistemas isolados, de menor capacidade e menos restritivos quanto aos requisitos da Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Sistemas FV instalados nos grandes centros urbanos possuem requisitos de desempenho mais restritivos, principalmente quando operam interligados à rede elétrica (sistemas de geração distribuída) e são estruturas mais sofisticadas, de maior custo e de desempenho otimizado. Em outras palavras, sistemas FV instalados nos grandes centros de carga se pagam em curto prazo de tempo pela comercialização da energia produzida enquanto que, para os sistemas instalados nas regiões mais pobres e mais remotas isso não ocorre.

O rastreador solar ora proposto busca atender a essa clientela menos favorecida e contribuir significativamente para o desenvolvimento dessas regiões através do fornecimento de uma energia elétrica com mais eficiência, mais qualidade, maior estabilidade e menor custo.

4.1 Modelo do rastreador a ser analisado

O circuito proposto compõe-se basicamente de dois LDR's (Resistores Dependentes da Luz), um comparador composto de dois amplificadores operacionais presentes em um único circuito integrado e quatro transistores, que amplificam os sinais provenientes dos amplificadores operacionais.

4.1.1 Características do Motor Solar

Na tabela 3 estão listadas as principais características do motor solar utilizado no sistema e apresentado na figura 18.

Marca: SAT CONTROL
Modelo: SM3SPMCB
Rotação Horizontal Típica 98° (100° max.);
Inclinação (elevação motor) 75° ;
Comprimento do Eixo do Motor 115mm,
Diâmetro do Eixo $\varnothing 40$ mm,
Velocidade de Rotação 1,33 $^\circ$ /s;
Fonte de Alimentação 7 a 43VDC;
Máximo Consumo em Modo espera 15mA;
Corrente de Consumo em Operação 110 a 150mA \pm 25%
Corrente de <i>In-rush</i> 200mA;
Temperatura de Operação -30°C a $+70^\circ\text{C}$;
Vida Útil 20.000 operações de 190° .

Tabela 3 - Características do Motor Solar
Fonte: SAT CONTROL, 2014

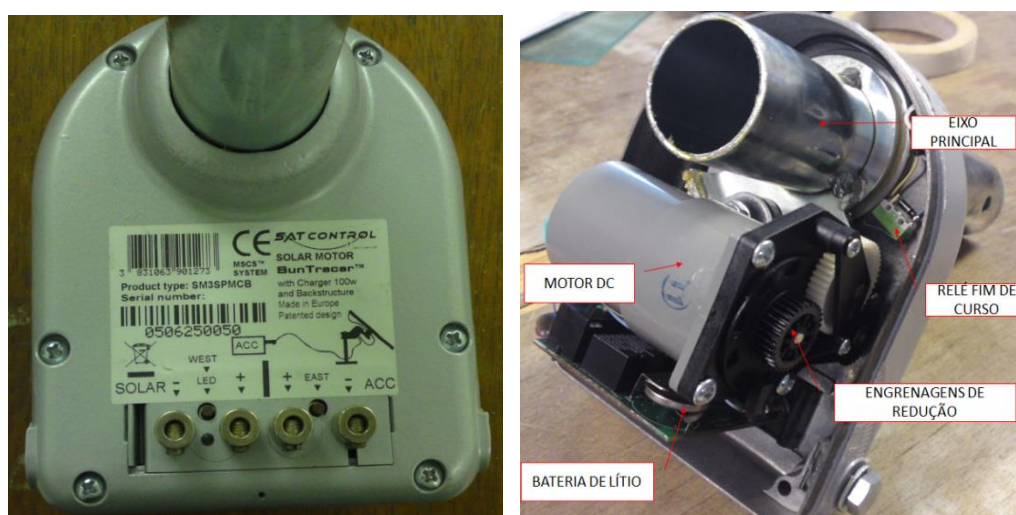


Figura 18 - Vista do motor solar completo
Fonte: Autor

4.1.2 Características do módulo solar fotovoltaico

Na tabela 4 estão listadas as principais características do módulo solar utilizado.

Fabricante: UNICOBA
Modelo TPS – M45S155E
Potência Nominal Máxima 45W
Tensão Nominal 15,25V
Tensão de Circuito Aberto: 19,2V
Corrente Nominal: 2,95 A;
Corrente de Curto Circuito: 3,30 A
Dimensões: 734x651x40mm

Tabela 4 – Características do módulo solar
Fonte: SAT CONTROL, 2014

O painel solar utilizado, disponível no LABEFEA, é mostrado na figura 19 juntamente com outros elementos do sistema.

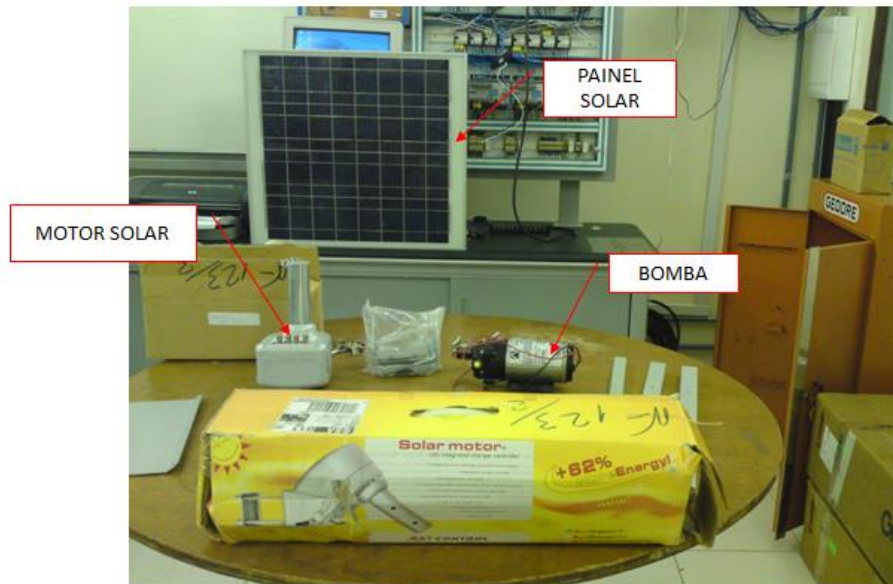


Figura 19 - Vista do módulo solar no LABEFEA
 Fonte: autor

4.1.3 Estrutura do Rastreador

O rastreador deve ser capaz de perceber a mudança na posição relativa do Sol e acionar o painel FV e realinhá-lo novamente perpendicular aos raios solares incidentes, conforme figura 20.

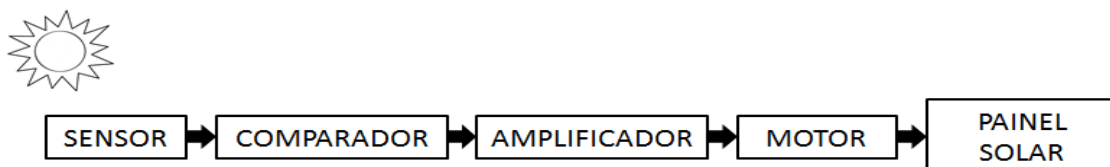


Figura 20 – Diagrama de blocos do rastreador completo
 Fonte: Autor

Para efeito de montagem, foi desenvolvida apenas a parte eletrônica do sistema de rastreamento composta de sensor, comparador e amplificador, já que o motor solar estava disponível no laboratório.

Logo, o sistema a ser implementado considerou o esquema mostrado na figura 21, a seguir:

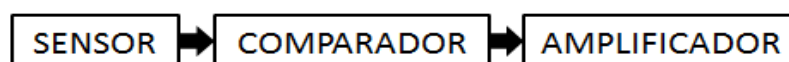


Figura 21 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico
 Fonte: Autor

4.2 Ensaios e Medições Realizadas

Antes de proceder com a montagem do sistema foi necessário realizar alguns ensaios nos componentes ora classificados como Módulo solar, Motor Solar e Circuito Eletrônico, a saber:

4.2.1 No módulo solar

- Curva característica sem luz (no escuro);
- Tensão de circuito aberto e tensão de curto circuito com irradiância máxima (faceando o Sol);
- Resistência interna com máxima transferência de potência.

4.2.2 No motor solar

- Curva característica Tensão x Corrente;
- Corrente de arrasto.

4.2.3 No circuito eletrônico

- Corrente de acionamento do motor;
- Corrente de curto circuito.

4.3 Desenvolvimento experimental

4.3.1 Circuito Proposto

O circuito eletrônico proposto para o rastreador é apresentado na figura 22.

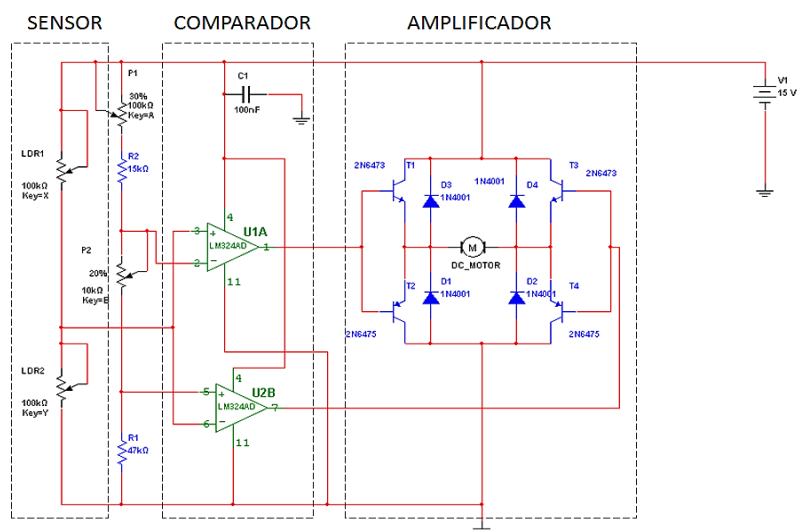


Figura 22 - Circuito proposto para o rastreador
Fonte: Autor

Como pode ser observado na figura 22, o circuito considerou ainda o emprego de resistores, potenciômetros e diodos de proteção, além dos elementos principais já caracterizados.

4.3.2 Material Utilizado

Os componentes utilizados na montagem do rastreador foram os seguintes:

- Circuito Integrado - 01 circuito LM 324
- LDR's – 02 unidades - Modelo 3190
- Transistores - 02 unidades - Tipo 2N6473
- 02 unidades - Tipo 2N647304
- Diodos – 04 unidades - Tipo 1N4001
- Potenciômetros - 01 unidade de 100 k Ω
- 01 unidade de 10 k Ω
- Resistores - 01 unidade de 47 k Ω / 1/4 W
- 01 unidade de 15 k Ω / 1/4 W

As especificações técnicas desses componentes estão apresentadas nos Anexos 2, 3, 4 e 5.

4.4. Medições de Campo

4.4.1 Equipamentos utilizados

- 02 Multímetros Minipa 2042
- 01 Fonte de alimentação ajustável Minipa MPS 303D

As características desses equipamentos estão apresentadas nos Anexos 6 e 7 respectivamente.

4.4.2 Medições no módulo FV

O módulo fotovoltaico foi avaliado sob duas condições específicas:

- Medições com o módulo FV no escuro
- Medições com o módulo FV fixo exposto ao Sol

a) Medições com o módulo FV no escuro

O módulo solar FV foi colocado com a face frontal virada para baixo sobre uma mesa, ficando completamente obscurecida. O esquema do circuito montado é mostrado na figura 23.

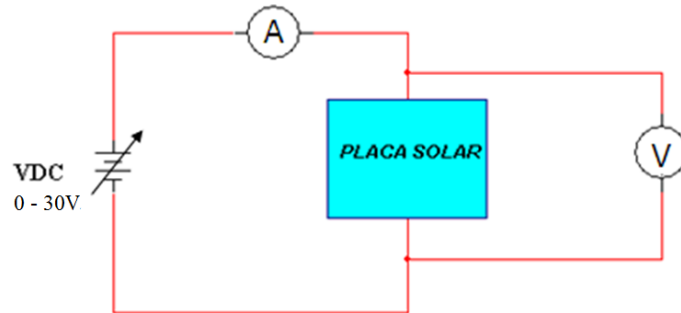


Figura 23 - Diagrama esquemático para medições no módulo FV no escuro.
 Fonte: Autor

O módulo solar FV foi conectado à fonte de alimentação ajustável em série com um multímetro na escala de amperímetro e em paralelo com um voltímetro na escala de tensão. Foram efetuadas medições com polarização direta e reversa, partindo-se de zero volts e aumentando-se progressivamente até um máximo de 27V para polarização reversa e 16,5V para polarização direta.

Na tabela 5 são apresentados os resultados das medições efetuadas. A figura 24 apresenta o gráfico obtido a partir das medições efetuadas, onde pode ser visto o comportamento de um diodo de junção PN polarizado reversa e diretamente.

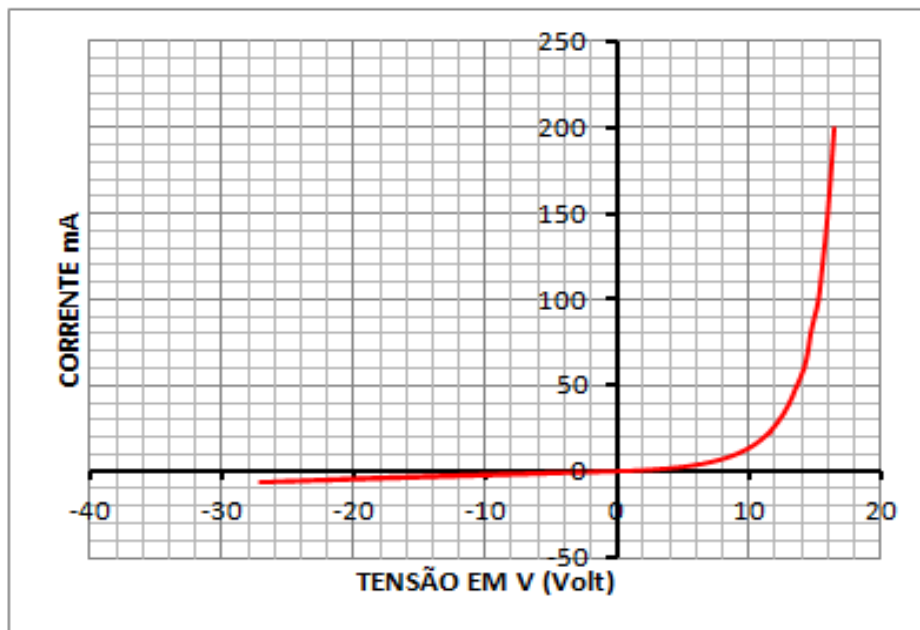


Figura 24 - Curva característica do módulo solar no escuro.
 Fonte: Autor

POLARIZAÇÃO REVERSA		POLARIZAÇÃO DIRETA		POLARIZAÇÃO DIRETA		POLARIZAÇÃO DIRETA	
TENSÃO (V)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)	CORRENTE (mA)
0,00	0,00	0,00	0,00	7,94	7,00	11,34	21,00
-1,33	-0,26	1,38	0,40	8,03	7,20	11,46	22,00
-1,40	-0,28	1,88	0,60	8,11	7,40	11,60	23,00
-1,60	-0,31	2,33	0,80	8,20	7,60	11,71	24,00
-1,70	-0,33	2,73	1,00	8,28	7,80	11,82	25,00
-1,80	-0,34	3,09	1,20	8,36	8,00	11,94	26,00
-1,90	-0,36	3,43	1,40	8,44	8,20	12,05	27,00
-2,00	-0,38	3,73	1,60	8,51	8,40	12,24	28,55
-2,50	-0,47	4,02	1,80	8,59	8,60	12,33	30,00
-3,00	-0,55	4,28	2,00	8,66	8,80	12,42	31,00
-4,00	-0,72	4,53	2,20	8,73	9,00	12,51	32,00
-5,00	-0,89	4,76	2,40	8,80	9,20	12,60	33,00
-6,00	-1,07	4,98	2,60	8,87	9,40	12,67	34,00
-7,00	-1,25	5,19	2,80	8,93	9,60	12,75	35,00
-8,00	-1,45	5,37	3,00	9,00	9,80	12,83	36,00
-9,00	-1,63	5,59	3,20	9,06	10,00	12,89	37,00
-10,00	-1,85	5,74	3,40	9,12	10,20	12,97	38,00
-11,00	-2,05	5,90	3,60	9,18	10,40	13,04	39,00
-12,00	-2,27	6,07	3,80	9,30	10,80	13,08	40,00
-13,00	-2,48	6,29	4,10	9,36	11,00	13,16	41,00
-14,00	-2,69	6,37	4,20	9,41	11,20	13,22	42,00
-15,00	-2,95	6,55	4,40	9,47	11,40	13,27	43,00
-16,00	-3,20	6,64	4,60	9,52	11,60	13,34	44,00
-17,00	-3,45	6,77	4,80	9,63	12,00	13,39	45,00
-18,00	-3,71	6,89	5,00	9,76	12,50	13,44	46,00
-19,00	-3,96	7,02	5,20	9,88	13,00	13,49	47,00
-20,00	-4,25	7,13	5,40	10,00	13,50	13,61	49,00
-21,00	-4,54	7,25	5,60	10,11	14,00	14,20	60,00
-22,00	-4,86	7,35	5,80	10,32	15,00	14,50	70,00
-23,00	-5,17	7,46	6,00	10,52	16,00	14,70	80,00
-24,00	-5,46	7,56	6,20	10,70	17,00	15,30	100,00
-25,00	-5,73	7,65	6,40	10,87	18,00	15,60	120,00
-26,00	-6,05	7,76	6,60	11,03	19,00	16,00	150,00
-27,00	-6,37	7,85	6,80	11,18	20,00	16,50	200,00

Tabela 5 - Resultado das medições efetuadas com o módulo FV no escuro

Fonte: Autor

b) Medições com o módulo FV fixo exposto ao Sol

O eixo do módulo solar FV foi alinhado na direção Norte-Sul com inclinação na latitude do município de Juazeiro/BA, Região Nordeste, latitude: 09°26'56"S, longitude: 40°31'27"W.

Foi utilizada a escala de ângulos ou goniômetro existente no próprio conjunto do módulo solar. Através de um artifício, que foi a colocação de um pino vertical colado no próprio módulo solar FV, foi simulado um relógio solar que permite o perfeito alinhamento da mesma conforme figura 25. O princípio de funcionamento desse relógio solar está apostado no Anexo D.



Figura 25 - Vista do módulo FV com o pino de alinhamento (relógio solar) e do goniômetro.
 Coordenadas Geográficas – latitude: 09°26'56"S, longitude: 40°31'27"W, altitude: 356m.
 Fonte: Autor

As medições da tensão de circuito aberto V_{OC} e da corrente de curto circuito I_{CC} foram efetuadas a cada 30 minutos sob as condições meteorológicas obtidas no LABMET da UNIVASF.

Os resultados estão apostos na Tabela 6.

Data: 16/03/2013

Condições meteorológicas:

PRECIPITAÇÃO [mm]	PRESSÃO ATMOSFÉRICA [hPa]	RADIAÇÃO GLOBAL [MJ/m ² .dia]	TEMPERATURA MÉDIA [°C]	UMIDADE RELATIVA %	VELOCIDADE DO VENTO [m/s]
0	969,9	26,38056902	27,5	57,8	3,388

Fonte: LABMET - UNIVASF, 2014

HORA	Voc(V)	Icc(A)
07:00	17,39	1,01
07:30	17,10	1,12
08:00	16,80	1,57
08:30	16,87	1,98
09:00	16,83	2,34
09:30	17,36	2,68
10:00	17,12	2,90
10:30	17,09	3,01
11:00	17,02	3,08
11:30	17,00	3,14
12:00	16,94	3,22
12:30	17,37	3,47

13:00	17,89	3,64
13:30	17,27	3,45
14:00	17,07	3,09
14:30	17,41	3,08
15:00	17,03	2,80
15:30	17,01	2,47
16:00	17,12	2,16
16:30	17,20	1,80
17:00	17,30	1,43

Tabela 6 - Medições realizadas com o módulo FV fixo

Fonte: Autor

Com os dados levantados, foi traçado o gráfico da Tensão de circuito aberto e Corrente de curto circuito em função do horário, obtendo-se os gráficos da figura 26.

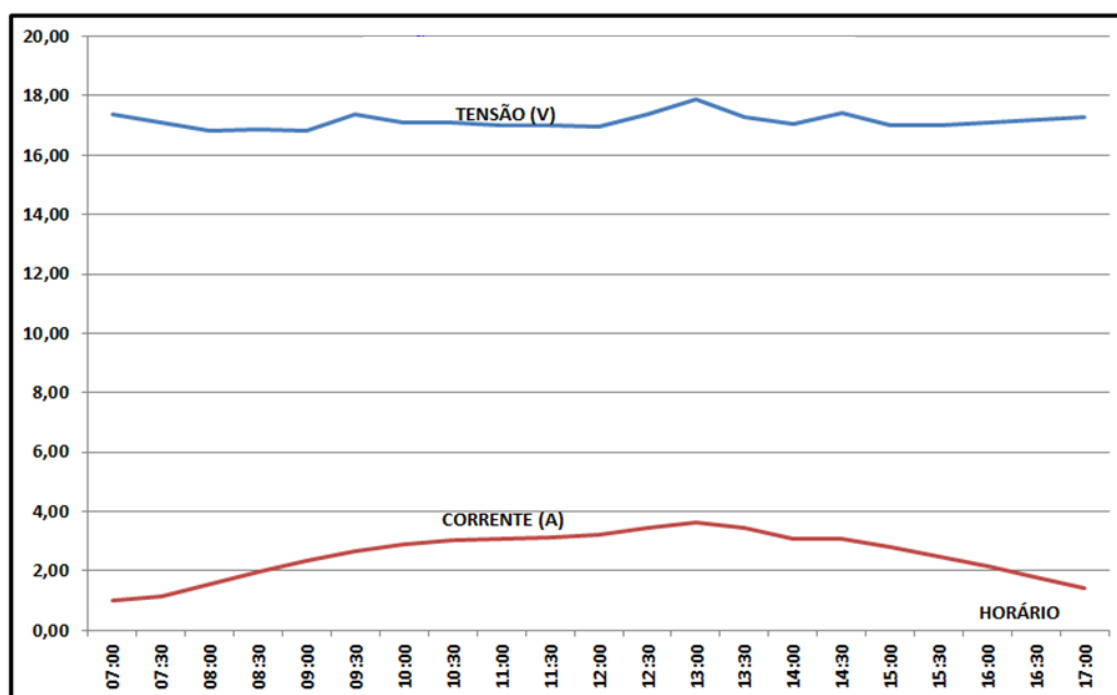


Figura 26 - Gráfico da tensão de circuito aberto/corrente de curto circuito x horário do dia com módulo fixo.

Fonte: Autor

Como pode ser observado, a tensão permanece mais ou menos constante em torno de um valor médio de 17,2V, enquanto que a corrente atingiu um máximo de 3,64A às 13:00h.

4.4.3 Curva característica do motor solar

O esquema mostrado na figura 27 foi utilizado para obter a corrente de acionamento do servomotor. Assim, variando a tensão, mediu-se a corrente, obtendo-se os dados da tabela 7.

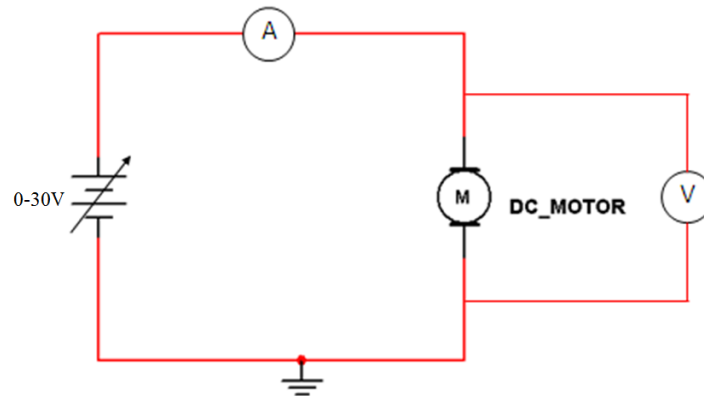


Figura 27 - Esquema do circuito para medição das características do servomotor
Fonte: Autor

TENSÃO (Volts)	CORRENTE (mA)
1,52	45,20
2,13	59,50
3,05	79,20
3,97	114,00
5,00	140,30
6,15	180,10
7,42	195,80
8,49	240,00
9,50	260,00
10,45	69,80
11,46	94,30
12,26	70,90
13,55	124,80

Tabela7- Característica Corrente x Tensão do Servomotor
Fonte: Autor

Analisando-se os dados obtidos, verificou-se que o motor permanece parado até uma tensão entre 9,50V e 10,45V, com uma corrente de curto circuito de até 260 mA, gerando apenas calor.

A partir desse ponto acontece o arrasto do motor com carga (módulo solar). A corrente cai abruptamente para 69,80 mA devido à FCEM induzida.

Para fins deste projeto, utilizou-se uma corrente de arrasto de 250 mA, compatível com a corrente fornecida pelo fabricante, como informado no anexo 8. A curva característica do motor solar está exposta na figura 28.

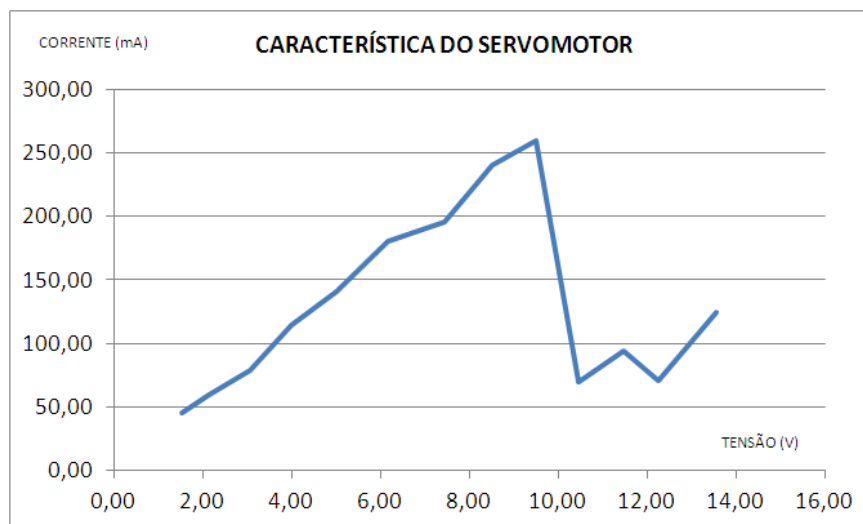


Figura 28 - Curva característica do servomotor
Fonte: Autor

4.5 Medições em Campo da Corrente de Curto Circuito e Tensão de Circuito Aberto do Módulo Solar

Foram realizadas medições no mês de junho de 2013, de menor incidência solar e em dezembro de 2013, quando a incidência solar é maior.

4.5.1 Medições no mês de junho/2013

a) Medições com o módulo solar fixo

O módulo teve seu eixo devidamente alinhado na direção norte/sul e inclinação de acordo com a latitude de Juazeiro/BA: 09°26'56"S.

As medições da tensão de circuito aberto V_{OC} e da corrente de curto circuito I_{CC} foram efetuadas, e os resultados apostos na tabela 8.

Data: 14/06/2013

Condições meteorológicas:

PRECIPITAÇÃO [mm]	PRESSÃO ATMOSFÉRICA [hPa]	RADIAÇÃO GLOBAL [MJ/m ² .dia]	TEMPERATURA MÉDIA [°C]	UMIDADE RELATIVA %	VELOCIDADE DO VENTO [m/s]
0	973,5	19,7967024	25,46	50,65	3,494

Fonte: LABMET - UNIVASF, 2014

HORA	Voc(V)	Icc(A)
07:00	17,39	1,01
07:30	17,10	1,12
08:00	16,80	1,57
08:30	16,87	1,98
09:00	16,83	2,34
09:30	17,36	2,68
10:00	17,12	2,90
10:30	17,09	3,01
11:00	17,02	3,08
11:30	17,00	3,14
12:00	16,94	3,22
12:30	17,37	3,47
13:00	17,89	3,64
13:30	17,27	3,45
14:00	17,07	3,09
14:30	17,41	3,08
15:00	17,03	2,80
15:30	17,01	2,47
16:00	17,12	2,16
16:30	17,20	1,80
17:00	17,30	1,43

Tabela 8 - Medições realizadas com o módulo fixo
Fonte: Autor

Com os dados obtidos, traçou-se o gráfico V_{OC} , I_{CC} versus horas do dia, obtendo-se as curvas mostradas na figura 28.

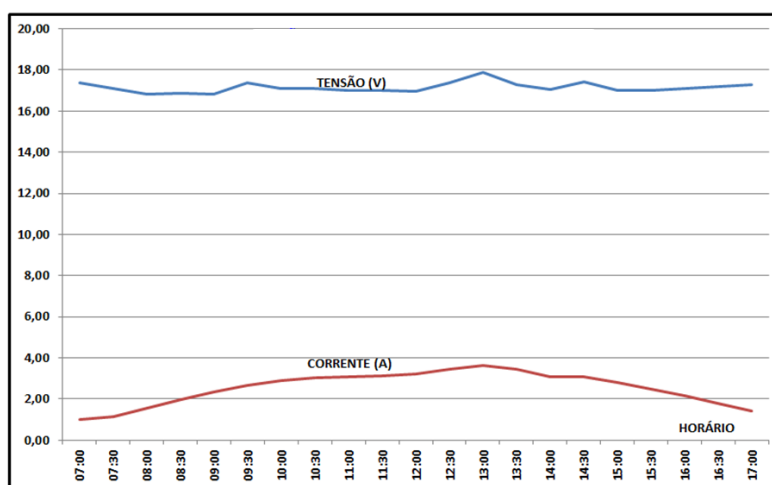


Figura 29 - Gráfico da tensão de circuito aberto/corrente de curto circuito x horário do dia com o módulo fixo
Fonte: Autor

Como observado, a tensão permanece mais ou menos constante em torno de uma média de 17,2V, enquanto que a corrente atingiu um máximo de 3,64A às 13:00h.

b) Medições com o módulo FV rastreando o Sol manualmente

As medições foram efetuadas, girando-se o módulo FV com o motor solar acionado manualmente e alimentado pelo próprio módulo solar, rastreando o Sol de 30 em 30 minutos, conforme a figura 30, iniciando-se às 07:00h e finalizando-se às 17:00h, pois o dispositivo fim de curso do motor solar não permite ângulos de giro maiores.



Figura 30 - Vista do módulo FV com rastreamento manual do Sol

Fonte: Autor

Os resultados estão apresentados na tabela 9:

HORA	Voc(V)	Icc(A)
07:00	18,02	2,23
07:30	17,58	2,67
08:00	17,39	2,93
08:30	17,25	3,01
09:00	17,10	3,06
09:30	17,44	3,14
10:00	17,16	3,20
10:30	17,15	3,22
11:00	17,05	3,20
11:30	17,01	3,20
12:00	16,94	3,21
13:30	17,46	3,43
14:00	17,21	3,20
14:30	17,08	3,27
15:00	17,17	3,08
15:30	17,20	3,05
16:00	17,40	2,93
16:30	17,42	2,57
17:00	17,51	2,10

Tabela 9 - Medições efetuadas com módulo rastreando o Sol manualmente

Fonte: Autor

Com as medições efetuadas, foi traçado o gráfico da Corrente de Curto Circuito/Tensão de Circuito Aberto em função do horário com rastreamento manual, mostrados na figura 31.

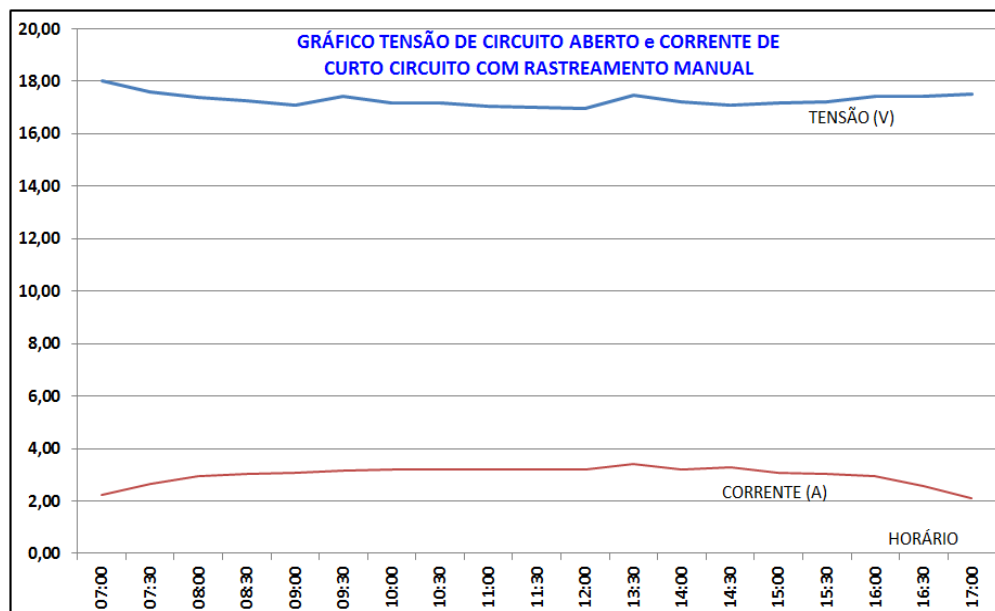


Figura 31 - Gráfico da corrente do curto circuito e tensão de circuito aberto com rastreamento manual
Fonte: Autor

A tensão de circuito aberto manteve-se aproximadamente constante, com uma média de 17,15V, enquanto que a corrente atingiu um máximo de 3,43A às 13:30h.

Como a tensão é praticamente constante, compararam-se apenas as correntes de Curto Circuito.

Na tabela 10, encontram-se resumidas as medições das Correntes de Curto Circuito com o módulo FV na posição fixa e rastreando o Sol manualmente.

Com os dados da tabela 10, foi obtido o gráfico de ambas as correntes, mostrado na figura 32.

HORA	FIXA	RASTREADA
	Icc (A)	Icc (A)
7:00	1,01	2,23
7:30	1,12	2,67
8:00	1,57	2,93
8:30	1,98	3,01
9:00	2,34	3,06
9:30	2,68	3,14
10:00	2,90	3,20
10:30	3,01	3,22
11:00	3,08	3,20
11:30	3,14	3,20
12:00	3,22	3,21
12:30	3,47	3,46
13:00	3,64	3,65
13:30	3,45	3,43
14:00	3,09	3,20
14:30	3,08	3,27
15:00	2,80	3,08
15:30	2,47	3,05
16:00	2,16	2,93
16:30	1,80	2,57
17:00	1,54	2,13
17:30	1,43	2,10

Tabela10 - Corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto com o módulo fixo e rastreado o Sol
 Fonte: Autor

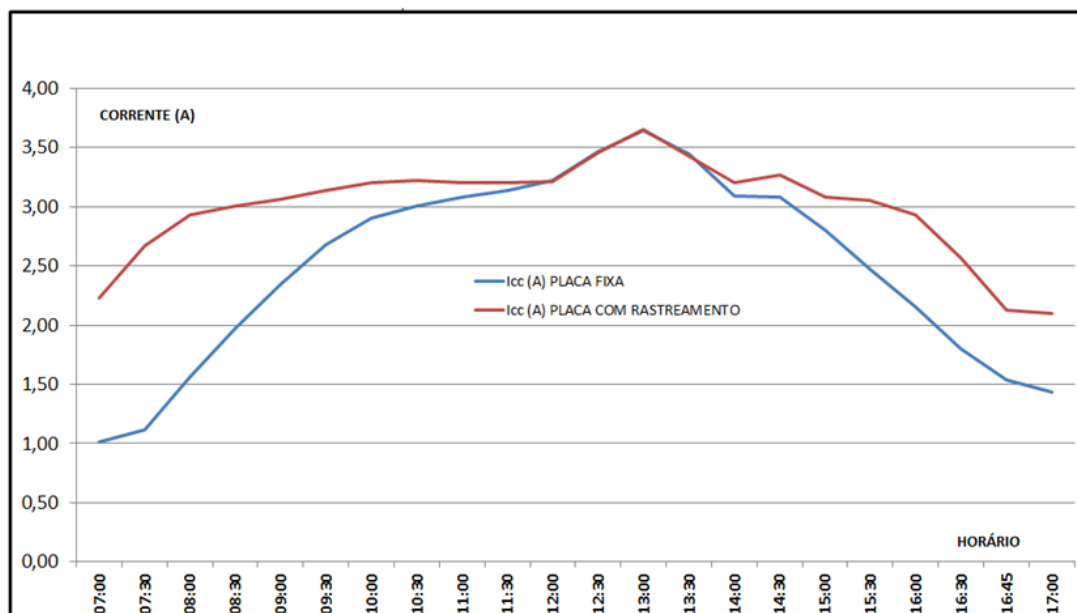


Figura 32 - Correntes de curto circuito com o modulo fixo e rastreado manualmente versus horas do dia
 Fonte: Autor

As correntes de Curto Circuito são praticamente iguais das 11:30h às 13:30h por conta da pequena diferença entre os graus de incidência do Sol, indiferentemente para o sistema com o módulo fixo ou com rastreamento. Entre 07:00h e 11:30h e das 13:30h e 17:00h, entretanto, a diferença é significativa.

Na figura 33, tem-se o diferencial das correntes para verificação do ganho de corrente.

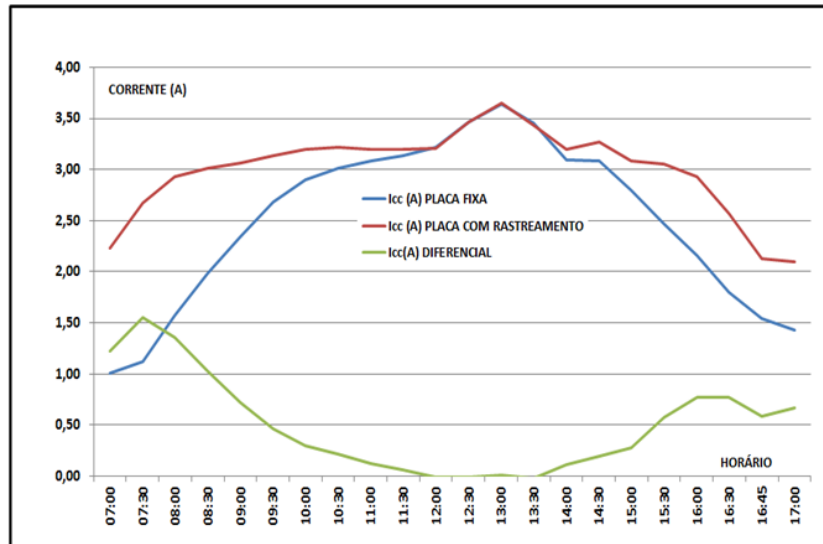


Figura 33 - Diferença das correntes de curto circuito com o módulo fixo e com rastreamento versus horas do dia
 Fonte: Autor

Fazendo-se a integração numérica das três curvas, obtém-se $\sum_{7h}^{17h} I_xh$, onde h é o intervalo de 30min = 0,5h, mostrado na tabela 11.

I _{xh} FIXA(Ah)	I _{xh} RASTREADADA(Ah)	Δ (I _{xh}) (Ah)
0,51	1,12	0,61
0,56	1,34	0,78
0,79	1,47	0,68
0,99	1,51	0,52
1,17	1,53	0,36
1,34	1,57	0,23
1,45	1,60	0,15
1,51	1,61	0,11
1,54	1,60	0,06
1,57	1,60	0,03
1,61	1,61	-0,01
1,74	1,73	-0,01
1,82	1,83	0,00
1,73	1,72	-0,01
1,55	1,60	0,06
1,54	1,64	0,10
1,40	1,54	0,14
1,24	1,53	0,29
1,08	1,47	0,39
0,90	1,29	0,39
0,77	1,07	0,30
0,72	1,05	0,34

Tabela11 - Valores da integração numérica. Delta de 30min

Fonte: Autor

A partir das integrais numéricas, foram obtidos os seguintes valores:

$$\sum_{7h}^{17h} I_x h (\text{fixo}) = 27,49 \text{ Ah} \quad (3)$$

$$\sum_{7h}^{17h} I_x h (\text{rastreado}) = 32,97 \text{ Ah} \quad (4)$$

O ganho foi calculado $(32,97 \text{ Ah} - 27,49 \text{ Ah})/27,49 \text{ Ah} = 0,199$, o que significou um ganho de 19,9%, que, mesmo com as imperfeições das medições, é bastante significativo, mostrando, inequivocamente, a validade do rastreamento.

4.5.2 Medições no mês de Dezembro/2013

O circuito acionador, montado no *protoboard*, foi acoplado eletricamente ao servomotor de acionamento do módulo solar e virado para o leste, com seu eixo na direção norte-sul e inclinação de acordo com a latitude de Juazeiro/BA: 09°26'56"S. Foram medidas as correntes de curto circuito I_{CC} e tensão de circuito aberto V_{OC} , com o módulo FV fixo e rastreado, simultaneamente, ou seja, fazendo um sombreamento em um dos sensores (LDR) e trazendo o módulo FV para posição horizontal, fez-se a leitura do amperímetro e do voltímetro, obtendo-se a corrente de curto circuito I_{CC} e tensão de circuito aberto V_{OC} .

Em seguida o sombreamento foi retirado e o módulo FV voltou para a posição de rastreamento; sob essa configuração foram novamente medidas as correntes de curto circuito I_{CC} e tensão de circuito aberto V_{OC} .

Os resultados obtidos estão registrados na tabela 12.

Data: 05/12/2013

Condições meteorológicas:

PRECIPITAÇÃO [mm]	PRESSÃO ATMOSFÉRICA [hPa]	RADIAÇÃO GLOBAL [MJ/m ² .dia]	TEMPERATURA MÉDIA [°C]	UMIDADE RELATIVA %	VELOCIDADE DO VENTO [m/s]
0	967,2	28,86748	31,01	44,45	2,331

Fonte: LABMET - UNIVASF, 2014

HORA	Voc(V) FIXA	Icc(A) FIXA	Voc(V) RASTREADA	Icc(A) RASTREADA
7:00	16,76	1,48	17,07	2,84
7:30	16,94	1,76	17,18	3,03
8:00	17,06	2,04	17,32	3,08
8:30	17,28	2,42	17,48	3,31
9:00	16,85	2,74	16,99	3,40
9:30	16,87	3,07	16,87	3,45
10:00	16,94	3,17	16,99	3,46
10:30	16,75	3,38	16,77	3,50
11:00	16,66	3,47	16,69	3,49
11:30	16,41	3,61	16,33	3,60
12:00	16,32	3,40	16,35	3,48
12:30	16,31	3,38	16,08	3,46
13:00	16,11	3,22	16,14	3,48
13:30	16,07	3,16	16,04	3,47
14:00	16,39	2,76	16,45	3,37
14:30	15,88	2,54	16,01	3,31
15:00	16,15	2,38	16,41	3,36
15:30	16,72	2,11	16,98	3,24
16:00	16,16	1,09	16,88	2,74
16:30	16,13	0,98	16,41	2,14
17:00	16,08	0,83	16,26	1,89

Tabela 12 - Medições efetuadas na Icc e Voc com o módulo fixo e com o rastreador ativo

Fonte: Autor

Com os dados levantados, foi traçado o gráfico V_{OC} , $I_{CC} \times$ horas do dia, obtendo-se o gráfico da figura 34 mostrado a seguir:

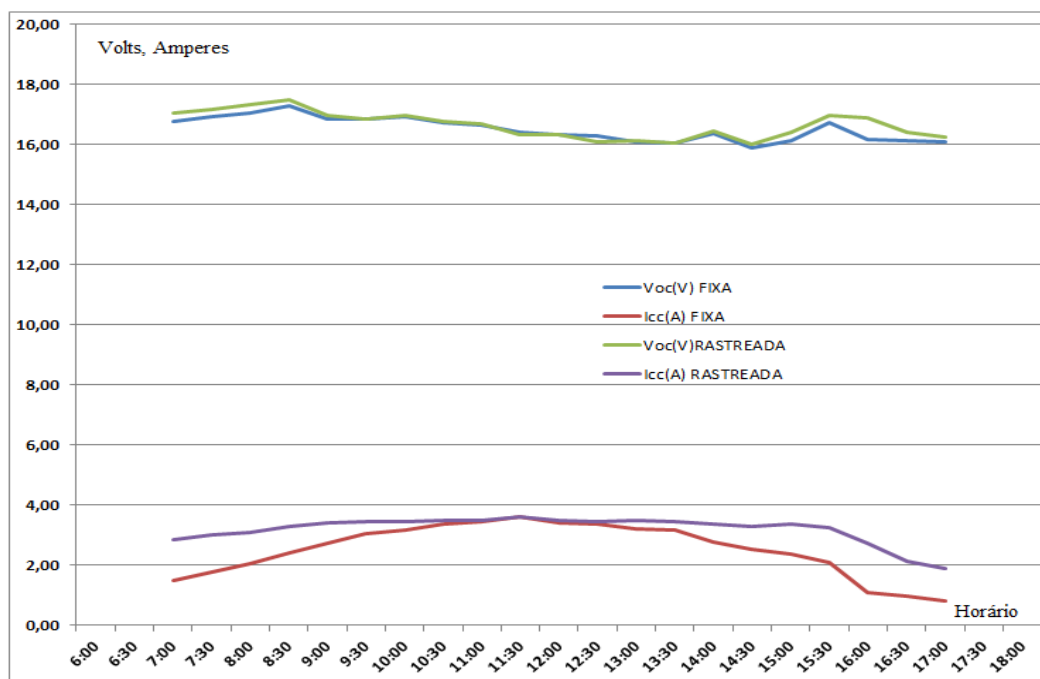


Figura 34 - Gráfico comparativo Voc/Icc com o módulo fixo e com rastreamento automático

Fonte: Autor

Como a tensão permaneceu praticamente constante, analisam-se as correntes. Na figura 35, observa-se que das 11:00h até as 12:30h as correntes são praticamente as mesmas. Entretanto, nos períodos compreendidos das 07:00h às 11:00h e das 12:30h às 17:00h, a diferença é significativa, aumentando muito a transformação da energia solar em elétrica, como mostrado no gráfico da figura 35 a seguir:

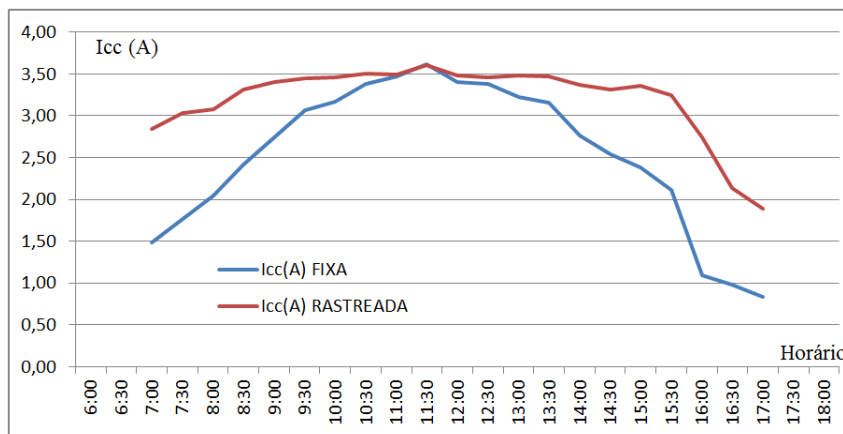


Figura 35 - Gráfico comparativo Icc com o módulo fixo e com rastreamento automático
 Fonte: Autor

Com as medições efetuadas, foram integradas numericamente as curvas $I \times h$ com o módulo fixo e rastreando o Sol, encontrando-se os valores listados na tabela 13.

HORA	FIXA Icc(A)	RASTREADA Icc(A)	FIXA I _{xh} (A.h)	RASTREADA I _{xh} (A.h)
07:00	1,54	2,78	0,77	1,39
07:30	1,76	3,03	0,88	1,52
08:00	2,04	3,08	1,02	1,54
08:30	2,42	3,31	1,21	1,66
09:00	2,74	3,40	1,37	1,70
09:30	3,07	3,45	1,54	1,73
10:00	3,17	3,46	1,59	1,73
10:30	3,38	3,50	1,69	1,75
11:00	3,47	3,49	1,74	1,75
11:30	3,61	3,60	1,81	1,80
12:00	3,40	3,48	1,70	1,74
12:30	3,38	3,46	1,69	1,73
13:00	3,22	3,48	1,61	1,74
13:30	3,16	3,47	1,58	1,74
14:00	2,76	3,37	1,38	1,69
14:30	2,54	3,31	1,27	1,66
15:00	2,38	3,36	1,19	1,68
15:30	2,11	3,24	1,06	1,62
16:00	1,09	2,74	0,55	1,37
16:30	0,98	2,14	0,49	1,07
17:00	0,83	1,89	0,42	0,95
		Σ	26,53	33,52

Tabela 13 - Resultado da integração numérica
 Fonte: Autor

Com os valores encontrados, verifica-se o ganho real do módulo FV com rastreamento automático e o módulo FV fixo, encontrando-se o valor de:

$$\text{Ganho} = (33,52\text{Ah} - 26,53\text{Ah})/26,53\text{Ah} = 1,266 \text{ ou } 26,6\%$$

Ou seja, a inserção de um dispositivo de rastreamento solar a um módulo solar FV é fundamental para aumentar a produção de energia.

4.5.3 Análise dos resultados

De acordo com os valores medidos, tanto no mês de junho como no mês de dezembro, os ganhos decorrentes do uso do rastreador foram significativos, como mostrado na tabela 14 abaixo:

MÊS	PLACA FIXA [A.h]	PLACA COM RASTREAMENTO [A.h]	TENSÃO MÉDIA [V]	ENERGIA COM PLACA FIXA [W.h]	ENERGIA COM PLACA RASTREADA	GANHO %
JUNHO/2013	27,49	32,97	17,15	471,45	565,44	19,93
DEZEMBRO/2013	26,53	33,52	16,51	438,01	553,42	26,35

Tabela 14 - Resultado comparativo do módulo FV fixo e rastreado em junho e dezembro/2013

Fonte: Autor

4.6 Viabilidade técnico-econômica do rastreador

Na tabela 15 é apresentada uma análise de custos e dos prazos de retorno do investimento considerando o sistema com o módulo FV fixo e com o módulo rastreado.

MÊS	ENERGIA COM PLACA FIXA [W.h]	ENERGIA COM MÓDULO RASTREADO [W.h]/dia	ENERGIA GERADA EM 1 ANO MÓDULO FIXO [kWh]	ENERGIA GERADA EM 1 ANO MÓDULO RASTREADO [kWh]	TARIFA RESIDENCIAL R\$ 500/MWh	RETORNO ANUAL DA ENERGIA GERADA R\$ (MÓDULO FV FIXO)	RETORNO ANUAL DA ENERGIA GERADA R\$ (MÓDULO FV RASTREADO)	CUSTO DO SISTEMA FIXO	CUSTO DO SISTEMA RASTREADO	PRAZO DE RETORNO DO INVESTIMENTO MÓDULO FIXO (ANOS)	PRAZO DE RETORNO DO INVESTIMENTO MÓDULO RASTREADO (ANOS)
JUN/2013	471,45	565,44	169,7220	203,5584	0,50	84,86	101,78				
DEZ/2013	438,01	553,42	157,6836	199,2312	0,50	78,84	99,62				
MÉDIA	454,73	559,43	163,7028	201,3948	0,50	81,85	100,70	1.217,86	1.647,00	14,88	16,36

Tabela 15 - Retorno dos investimentos

Fonte: Autor

Observa-se que os prazos de retorno dos investimentos (*payback*) são de 14,88 anos para o módulo fixo e 16,36 anos para o módulo rastreado.

Fato é que a utilização de um seguidor solar não é essencial para a operação de um painel solar, mas, com ele, a eficiência do sistema é maior, o que pode compensar o maior custo de instalação. Sem o rastreador o desempenho do sistema é menor.

De todo modo, ainda que os seguidores solares aumentem o ganho de energia de geradores fotovoltaicos, não se pode desconsiderar outros problemas decorrentes de sua instalação, além do custo, tais como confiabilidade, o consumo de energia, a manutenção e o desempenho geral do sistema. (MOUSAZADEH et al,2009)

Além disso, os sistemas com rastreamento requerem manutenção das partes mecânicas móveis e dos sistemas eletrônicos de controle (VILALVA; GAZOLI, 2013).

5 CONCLUSÕES

O Sistema com módulo FV acoplado ao rastreador da posição do Sol mostrou-se mais eficiente do que o mesmo sistema com painel fixo, com um rendimento significativamente superior. Entretanto, o custo do sistema de rastreamento e sua manutenção podem vir a inviabilizar a sua inserção em sistemas de pequena potência.

O rastreador desenvolvido, utilizando como sensores apenas dois LDR's, caracteriza-se pela simplicidade e versatilidade. Destaca-se por apresentar um simples sensoriamento solar, capaz de colocar continuamente o plano do FV em uma posição perpendicular aos raios solares diretos. As principais condicionantes do circuito eletrônico desenvolvido foram de baixo custo e pequeno consumo de energia. Com isso é possível considerar sua inserção em sistemas de menor potência e uso em locais mais remotos.

5.1 Considerações finais

O rastreador funcionou perfeitamente na sua função de acompanhar o movimento do Sol. O principal problema encontrado foi o retorno à posição “Leste” pela manhã. Como o painel encontrava-se virado para o Oeste, não tem incidência de luz suficiente para retorná-lo à posição inicial.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Existem muitos estudos interessantes que podem dar continuidade a esse trabalho.

Um deles é o desenvolvimento de estudos para o acoplamento de uma bateria com controlador de carga ou, ainda, um “supercapacitor”. Supercapacitores de 3F(Farad) disponíveis no mercado teriam como armazenar energia suficiente para promover o retorno do painel solar à sua posição inicial voltada para o Leste pela manhã.

Recomenda-se também, ampliar esses estudos para o acompanhamento do Sol em dois eixos, seguindo também, a inclinação do Sol nas estações do ano, em função do movimento do eixo da terra, podendo-se, para essa finalidade, utilizar-se o mesmo

circuito ora proposto acoplado a outro motor solar: um circuito monitora o eixo Leste-Oeste, e outro monitora a inclinação solar no sentido Norte-Sul.

Do ponto de vista acadêmico e dada a importância cada vez maior de diversificar a matriz energética com fontes de energia limpas e renováveis, é interessante fomentar a criação de laboratórios e áreas de testes para sistemas fotovoltaicos. Da mesma forma, é preciso investir em estações meteorológicas que possam fornecer dados climatológicos mais precisos e com isso, permitir o projeto e a implantação de sistemas mais eficientes e mais adequados à realidade da região em estudo.

REFERÊNCIAS

ALLDATASHEET.COM. **LM324**: datasheets, S.d. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/172921/UTC/LM324.html> > Acesso em: 02 dez. 2014.

AQUATEC. **Manual Técnico da Bomba Aquatec Modelo DDP 5800**. Disponível em: <http://www.aquatec.com/sg_userfiles/Industrial_5800_1.2_GPM_12V_dc_Pump.pdf>. Acesso em 20 mar. 2014.

BECQUEREL, E. Memoires sur les effets electriques produits sous l'influence des rayons. **Comptes Rendus des Séances Hebdomadaires**, v. 9, p. 561-567, 1839.

BOSCH. **Solar Energy**: monocristaline Solar Cell. Disponível em: <<http://www.bosch-solarenergy.com.au/>> Acesso em: 20 jul. 2013.

BUEMI. D. **Solar Energy**: many types, many applications. Disponível em: <<http://davebuemi.com/wp-content/uploads/2010/11/module.exploded.bmp>>. Acesso em: 22 jul. 2013.

CEPEL. **Tutorial de Energia Solar**: princípios e aplicações. Rio de Janeiro: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2006. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 25 jan. 2013.

CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S; PEARSON, G. L. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. **Journal of Applied Physics**, v. 25, p. 676-677, 1954.

DATASHEETLIB. **2N6476**: datasheet, S.d. Disponível em: <http://www.datasheetlib.com/datasheet/119948/2n6476_central-semiconductor.html>. Acesso em: 02 dez. 2014.

DATASHEETCATALOG.COM. **LM324D**: datasheet, S.d. Disponível em: <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/M/3/2/LM324D.shtml> . Acesso em: 02 dez. 2014.

DHANABAL, R. et al. Comparison of Efficiencies of Solar Tracker systems with static panel SingleAxis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 2, p. 1704-1709 Apr-May 2013.

DIODES. **1N4001 - 1N4007**: datasheets, S.d. Disponível em: <<http://www.diodes.com/datasheets/ds28002.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2014.

DONAUER SOLAR SYSTEMS. **Sistema fotovoltaico ISolado**. Disponível em: <<http://www.donaue.eu/pt/areas-de-negocio/sistemas-fotovoltaicos/sistemas-iSolados/kits-off-grid/>> Acesso em: 24 jul. 2013.

Electrónica. **Sensibilidade Espectral de Painel Solar Fotovoltaico**. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/energia-Solar/painel-Solar-fotovoltaico>>. Acesso em: 05 maio 2013.

Electronics Tutorials. **Semiconductor Basics**. Disponível em: <<http://www.electronicstutorials.ws>>. Acesso em: 20 mar. 2013.

EMPA - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology. Record efficiency of 18.7 percent for flexible Solar cells on plastics, Swiss researchers report. **ScienceDaily**, 20 maio 2011. Disponível em: www.sciencedaily.com/releases/2011/05/110519101355.htm. Acesso em: 20 jul. 2013.

EPE – Empresa Brasileira de Pesquisa Energética. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**: nota técnica. Rio de Janeiro, maio de 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_23/NT_EnergiaSolar_2012.pdf>. Acesso em 20 mar. 2013.

FRAAS, Lewis M. **Low-Cost Solar Electric Power**. Springer International Publishing. Switzerland, 2014.

HOFFMAN, V. U.; GOETZBERGER, A. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. 1.ed. Freiburg: Springer, 2005.

HONSBURG, Christiana; BOWDEN, Stuart. **Solar Energy**. PVEDUCATION, [2013]. Disponível em: <<http://pveducation.org/pvcdrom/modules/hot-spot-heating>> Acesso em: 23 jul. 2013.

KALEIDO TECHNOLOGY. **Solar Concentrator Optics**. Disponível em: <<http://www.kaleido-technology.com/Applications/Solar%20concentrator%20optics.htm.html>>. Acesso em: 02 ago. 2013.

LABMET – Laboratório de Metrologia. **[Previsão do tempo]**. Juazeiro: BA: Univasf, 2013. Disponível em <<http://www.univasf.edu.br/labmet/>>. Acesso em: 16 mar. 2013

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. 2.ed. Madrid, Delaware: Wiley, 2003.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2. ed., Rio de Janeiro: LTC, 1997. 782p. ISBN 9788521610861.

MERKASOL. **Estrutura de alumínio Solo 2 Painel**. Disponível em: <http://www.merkaSol.com/epages/62387086.sf/pt_PT/?ObjectPath=/Shops/62387086/Products/estructura002/SubProducts/estructura002-0002>. Acesso em: 16 dez. 2014.

MINIPA. **Manual do usuário**: ET 2042, 2003. Disponível em: <<http://web.if.usp.br/ifusp/files/Et-2042-1101%282%29.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2014.

MINIPA. **Manual do usuário: fonte de alimentação MPS 303D/ MPC 303D**, 1999. Disponível em: <<http://portal.if.usp.br/labdid/sites/portal.if.usp.br/labdid/files/MPS%20e%20MPC->

303D.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.

MOUSAZADEH, Hossein et al. A review of principle and sun-tracking methods for maximizing Solar systems output. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 1800–1818, 2009.

OH, Seung Jin et al. Development of an embedded Solar tracker for the enhancement of Solar energy utilization. **International Journal of Energy Research**, v. 36, p. 249-258, 2012.

PERTENCE JÚNIOR, Antonio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 5. ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, março de 2014. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 20 abr. 2014.

PORTO, Gabriella. **Relógio de Sol**. [Florianópolis]: InfoEscola. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/curiosidades/relogio-de-Sol/>>. Acesso em: 21 abr. 2014.

POULEK. V; LIBRA. M. A very simple Solar tracker for space and terrestrial applications. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 60, p. 99-103, 2000.

SAT CONTROL. **Solar motor**, 2014. Disponível em: <www.Solar-motors.com> acesso em 16 dez. 2014.

SOLAR ARCHITEKTUR. **Heliotrope Plants**. Disponível em: <<http://www.rolfdisch.de/index.php?p=home&pid=78&L=1&host=2#a566>>. Acesso em: 02 ago. 2013.

Solarbuzz. **Solar Energy Market Growth**. Disponível em: <<http://www.Solarbuzz.com/facts-and-figures/markets-growth/market-growth>>. Acesso em: 21 fev. 2014.

SOLAR FEEDS. **Polycrystalline Solar Cell**. Disponível em: <<http://www.Solarfeeds.com/>> Acesso em: 20 jul. 2013.

SOTECNISOL. **Tabelas preço de vendas**: painéis fotovoltaicos, 2011. Disponível em: <http://www.sotecniSol.pt/resources/Materiais/Paineis_Fotovoltaicos.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2014.

SUNROM. **Light Dependent Resistor – LDR**: datasheet. Disponível em: <<http://www.sunrom.com/media/files/p/54/3190-datasheet.pdf>>. Acesso em 02 dez. 2014.

TEIXEIRA, T.B. **Influencia da temperatura em aglomerados auto-configuráveis de células solares fotovoltaicas**. Monografia. Belo Horizonte: UFMG, 2008.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM324**: quadruple operational amplifier. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/lm324>>. Acesso em: 23 jan. 2014.

TSUDA, S. et al. a-Si Technologies for High Efficiency Solar Cells. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 164-166, n. 2, p. 679-684, 2 dez.1993.

UOL ECONOMIA. **Cotações**. <<http://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/euro-uniao-europeia/>>. Acesso em: 16 dez. 2014.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Hybrid Wind and Solar Electric Systems**. Washington, DC. Disponível em: <<http://energy.gov/energysaver/articles/hybrid-wind-and-Solar-electric-systems>>. Acesso em: 24 jul. 2013.

VILLALVA, Marcelo Gradelha; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1.ed. São Paulo: Érica, 2013.

ANEXO A

ESTUDO DAS CÉLULAS SOLARES

A.1 CARACTERÍSTICAS DAS CÉLULAS SOLARES

A célula solar é um componente elétrico com algumas propriedades que diferem marcadamente das “convencionais” fontes de energia. O conhecimento das características dessas células solares é um pré-requisito para a concepção e o dimensionamento de uma fonte de energia fotovoltaica para aparelhos ou sistemas interconectados e a realização de uma instalação confiável. Além disso, permite que as possibilidades e os limites de um fornecimento de energia fotovoltaica (FV) possam ser conhecidos e, assim, garante que a informação aos potenciais clientes e usuários seja bem fundamentada.

A.1.1 Curva característica de uma célula solar

No escuro, a curva característica da célula solar corresponde essencialmente a uma curva bem conhecida de um diodo normal, exposta na figura A1.

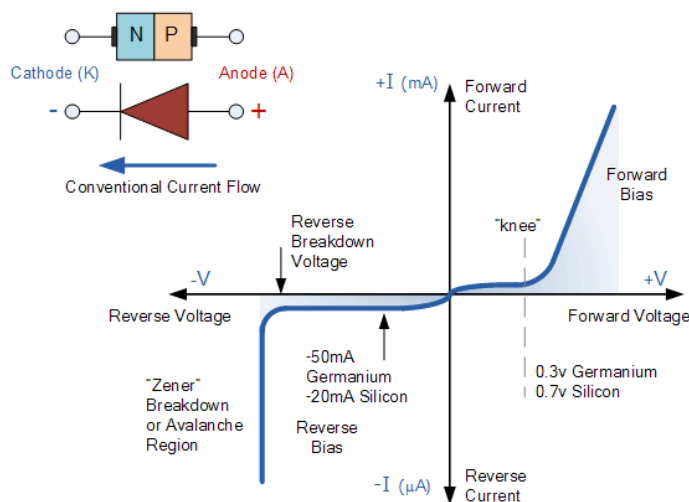


Figura A1 - Curva característica de um semiconductor de silício

Fonte: TEIXEIRA, 2008

Na direção de polarização direta (quadrante 1), praticamente, nenhuma corrente flui a baixas tensões, mas, acima de uma tensão de 0,7V, a corrente aumenta rapidamente. Na direção inversa (quadrante 3), o fluxo de corrente é bloqueado até um

certo limite de tensão (para células solares, umas poucas dezenas de volts), em que o diodo torna-se condutor. Em geral, isso resulta na destruição do componente.

Por contraste, uma corrente, muitas vezes, maior que a corrente nominal, na polarização direta, geralmente, não causa problemas.

A incidência de iluminação na célula solar cria portadores de cargas livres, que permitem que a corrente flua por meio de uma carga ligada à mesma. O número de portadores de cargas livres criados é proporcional à intensidade da radiação incidente, de modo que a fotocorrente (I_{ph}), gerada internamente na célula solar, é também proporcional à intensidade da radiação. Assim, o circuito equivalente simplificado, mostrado na figura A2, pode ser usado para representar uma célula solar.

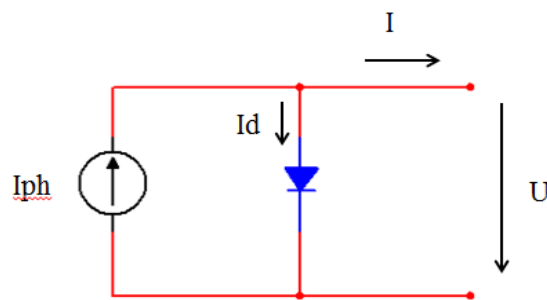


Figura A2 - Diagrama simplificado do circuito equivalente para uma célula solar

Fonte: Autor

A célula solar é constituída por um diodo criado pela junção PN e uma fonte equivalente de corrente com magnitude da corrente, dependendo da intensidade da radiação.

A.1.2 Desenvolvimento teórico de uma célula fotovoltaica

O modelo equivalente associado a uma célula obtém-se a partir do modelo da junção PN. Adiciona-se o termo correspondente à corrente I_{ph} proporcional à luminosidade, bem como um termo representativo de fenômenos internos.

A corrente I da célula será então:

$$I = I_{ph} - I_{0d} \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (A1)$$

$$I_d = I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (U + R_s \cdot I)}{K \cdot T}} - 1 \right) \quad (A2)$$

Onde:

I_{ph} : fotocorrente, ou corrente gerada pela luminosidade (A).

I_{od} : corrente de saturação do diodo (A).

R_s : resistência em série (Ω).

R_{sh} : resistência shunt (Ω).

K : constante de Boltzmann ($= 1,32 \times 10^{-23}$).

q : carga do elétron ($= 1,602 \times 10^{-19}$ C).

T : temperatura da célula (K).

I : corrente de saída da célula (A).

U : tensão de saída da célula (V).

Das equações acima, pode-se deduzir um esquema equivalente tal como representado na figura A3:

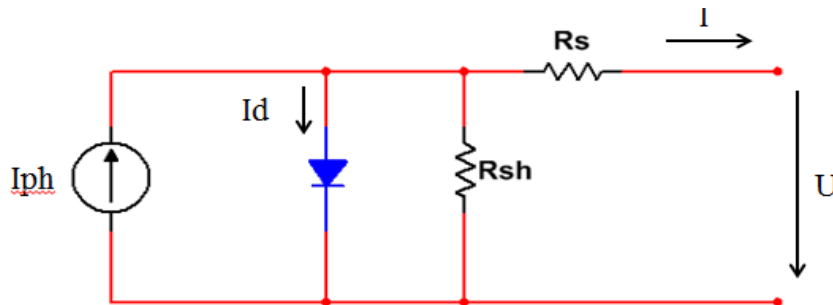


Figura A3 - Esquema equivalente de uma célula fotovoltaica

Fonte: Autor

O diodo é um modelo de comportamento da célula quando na obscuridade. A fonte de corrente I_{ph} é gerada pela luminosidade.

Por fim, as duas resistências modelam as perdas internas. A resistência em série R_s representa as perdas pelo efeito Joule do material e a resistência Shunt R_{sh} representa as perdas devido a correntes parasitas, que circulam na célula.

Idealmente, pode se desprezar o termo $R_s \cdot I$ face a U e trabalhar assim com um modelo simplificado:

$$I = I_{ph} - I_{od} \left(e^{\frac{q \cdot U}{K \cdot T}} - 1 \right) \frac{U}{R_{sh}} \quad (A3)$$

Como a resistência shunt é de valor muito superior ao da resistência série, pode ainda desprezar-se a corrente nessa resistência, obtendo-se assim:

$$I = I_{ph} - I_{od} \left(e^{\frac{q \cdot U}{K \cdot T}} - 1 \right) \quad (A4)$$

A.1.3 Curvas características de células solares

No que se segue, as quantidades necessárias para caracterizar as células solares e módulos solares serão explicados, usando-se células solares cristalinas como um exemplo, mas o conceito aplica-se, também, a outros tipos de células solares.

A.1.3.1 CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

Conforme Hoffman (2005), a corrente de curto – circuito I_{sc} é proporcional à radiação solar. Além disso, a corrente de curto – circuito depende da temperatura da célula. Essa corrente aumenta para células solares feitas de silício cristalino em cerca de (0,05% a 0,07%)/ Kelvin¹ e cerca de 0,02%/Kelvin para células de silício amorfo.

A.1.3.2 TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO

A tensão de circuito aberto (V_{oc}) corresponde à tensão através do diodo interno quando a fotocorrente total gerada flui através deste diodo.

Essa tensão aumenta rapidamente com a iluminação, até que atinja um valor de saturação. A partir desse ponto, aumenta lentamente e, muitas vezes, esse aumento não é visto por causa das resistências internas. Células solares de silício cristalino chegam a um típico valor de 0,5 V a 0,7V e o silício amorfo 0,6V a 0,9V (HOFFMAN, 2005).

Considerando que a tensão de circuito aberto e também a tensão no ponto de trabalho podem ser assumidas como sendo quase independentes do valor da radiação incidente na célula, para as típicas intensidades de radiação ao ar livre, essas tensões caem acentuadamente em interiores pouco iluminados com radiação incidente de apenas alguns W/m². Além disso, a tensão de circuito aberto e também a tensão no ponto de trabalho são fortemente dependentes da temperatura. Isso deve ser considerado em células solares instaladas ao ar livre, que podem atingir temperaturas, dependendo da

1 Um Kelvin corresponde à diferença de temperatura de 1°C, é também conhecida como escala absoluta de temperatura.

instalação, até mais elevadas do que 40 K, superiores à temperatura ambiente, Hoffman (2005).

A.1.4 Potência

A potência fornecida por uma célula solar é o produto da corrente pela tensão. Se a multiplicação for feita ponto a ponto, para uma carga variável de zero até valores dez vezes ou maiores que a resistência interna do módulo solar FV, Resistência de Thevenin (R_{th}), a curva de potência mostrada na figura A4 será obtida para um nível de radiação definido. Embora a corrente tenha o seu máximo no ponto de curto – circuito, a tensão será zero, e a potência será também zero.

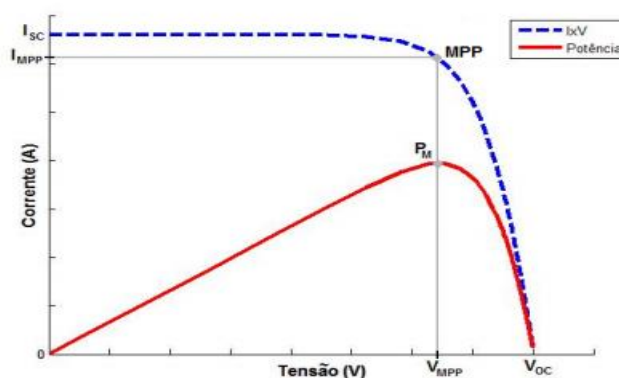


Figura A4 - Curvas de potência de saída de uma célula solar

Fonte: TEIXEIRA, 2008

Conforme pode ser observado na figura A4, a tensão no ponto de máxima potência V_{MPP} varia entre 75% a 90% da tensão de circuito aberto, V_{oc} , e a corrente, neste mesmo ponto I_{MPP} , varia de 75% a 95% da corrente de curto circuito, I_{sc} , ou seja:

$$V_{MPP} = (0,75 \text{ a } 0,9)V_{oc} \quad (A5)$$

$$I_{MPP} = (0,75 \text{ a } 0,95)I_{sc} \quad (A6)$$

Devido à tensão de a célula depender da temperatura, a potência fornecida também muda com a temperatura. A potência de uma célula solar é medida sob condições de teste internacionalmente especificadas *Specified Test Conditions* (STC) com os seguintes parâmetros, conforme (HOFFMAN, 2005).

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

Temperatura da célula solar = 25°C.

Densidade do ar = 1,51.

A potência nominal é mostrada em watt de pico (Wp). Deve-se notar que o termo mais comumente usado “potência de pico” é enganador, pois, com uma menor temperatura da célula ou intensidade de radiação mais elevada, o valor pode ser excedido. No entanto, os módulos podem operar sob radiação consideravelmente menores do que a da condição de teste (HOFFMAN, 2005).

A.2 PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPP²) TEÓRICO

O ponto de máxima potência acontece quando a resistência da carga torna-se igual à resistência interna da fonte, situação demonstrada teoricamente a seguir.

Seja o diagrama elétrico apresentado na figura A5, representativo do circuito de Thévenin equivalente de um módulo FV com carga.

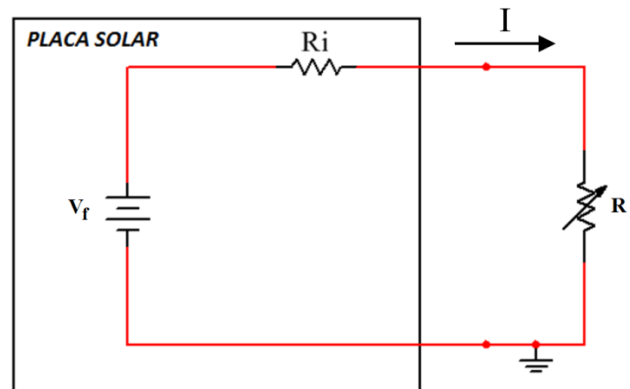


Figura A5 - Diagrama esquemático do módulo com carga
Fonte: Autor

Onde R_i é a resistência interna do módulo FV, V_f é a tensão gerada internamente, R_L é a resistência de carga e I a fotocorrente gerada. A potência dissipada na carga é dada por:

$$P = R_L \times I^2 \quad (\text{A7})$$

Uma vez que a resistência interna está em série com a resistência de carga, pela lei Ohm,

$$I = \frac{V_f}{R_i + R_L} \quad (\text{A8})$$

Substituindo (A8) em (A7):

$$P = R_L \times \left(\frac{V_f}{R_L + R_i}\right)^2 = V_f^2 \times \frac{R_L}{(R_L + R_i)^2} \quad (\text{A9})$$

Sendo a tensão gerada internamente ao módulo constante, conforme Hoffman e Goetzberger, (2005), a potência terá um máximo quando a derivada de P em relação a R_L for zero, logo para:

$$\frac{dP}{dR_L} = 0 \quad (\text{A10})$$

$$\frac{d\left[\frac{R_L}{(R_L + R_i)^2}\right]}{dR_L} = 0 \quad (\text{A11})$$

e,

$$\left[\frac{u}{v}\right]' = \frac{vu' - uv'}{v^2} \quad (\text{A12})$$

$$u = R_L \quad u' = 1 \quad (\text{A13})$$

$$v = (R_L + R_i)^2 \quad v' = 2(R_L + R_i) \quad (\text{A14})$$

Substituindo (A13) e (A14) em (A12):

$$\frac{dP}{dR_L} = \frac{(R_L + R_i)^2 - R_L \times 2(R_L + R_i)}{(R_L + R_i)^4} = 0 \quad (\text{A15})$$

$$\frac{(R_L + R_i) - 2 \times R_L}{(R_L + R_i)^3} = 0 \quad (\text{A16})$$

$$R_L + R_i - 2 \times R_L = 0 \quad \text{ou} \quad R_i - R_L = 0 \quad (\text{A17})$$

Conclui-se que a máxima transferência de potência vai ocorrer quando:

$$R_L = R_i \quad (\text{A18})$$

A máxima transferência de potência ocorrerá quando a resistência de carga for igual à resistência interna da fonte.

A.2.1 Valor da eficiência

Apenas uma parte da radiação solar incidente sobre a célula solar é convertida em eletricidade. A razão entre a energia elétrica de saída para a radiação solar de entrada

é definida como o valor da eficiência. Isso depende do tipo de célula. Para o valor de eficiência do módulo, a potência de saída é dividida pelo total da radiação incidente no módulo, porque toda a área do módulo não é coberta por células solares. O valor de eficiência do módulo é sempre inferior ao valor da eficiência de uma única célula (HOFFMAN, 2005).

A.2.2 Sensibilidade espectral

Dependendo da tecnologia e do material utilizado, as células solares variam na sua sensibilidade a diferentes gamas espectrais da radiação incidente. Como um exemplo, a figura A6 ilustra a sensibilidade espectral relativa, também conhecida como resposta espectral de uma célula de silício amorfo, silício monocristalino e de filme fino (HOFFMAN, 2005).

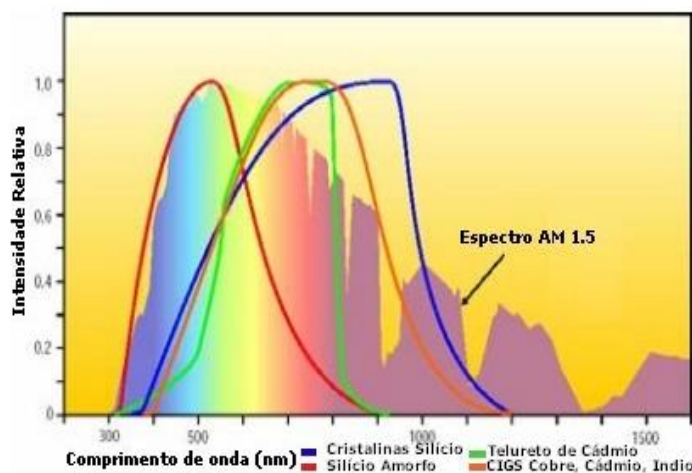


Figura A6 - Sensibilidade espectral de células de silício amorfo, monocristalino e filme fino
Fonte: Electrónica, S.d.

Pode ser observado na Figura A6 que o silício cristalino tem uma maior sensibilidade no comprimento de onda longo, enquanto que o módulo de silício amorfo é mais eficiente na gama visível do espectro (HOFFMAN, 2005; DHANABAL et al, 2013).

ANEXO B

TECNOLOGIAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

B.1 INTRODUÇÃO

Uma única célula solar de silício cristalino, com uma área de superfície de cerca de 100cm^2 , gera uma corrente de 3A a uma tensão de 0,5V, quando expostos a Sol pleno. Até cinco anos atrás, um típico módulo FV, feito de silício cristalino, constituía-se de cerca de 30 a 36 células ligadas em série, com uma potência de pico de aproximadamente 50W. Hoje, módulos com uma potência de pico de 300W já podem ser encontrados em escala comercial. Tal módulo possui mais de 100 células solares ligadas em série e em paralelo (HOFFMAN, 2005).

A figura B1 mostra a vista explodida de um módulo FV de silício cristalino.

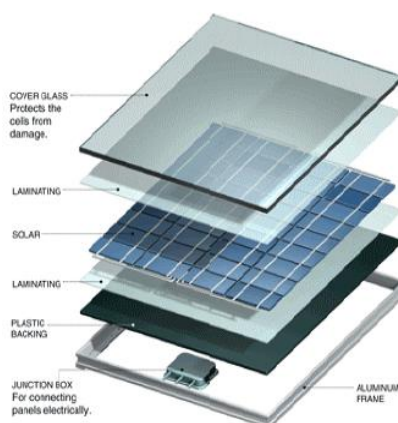


Figura B1 - Componentes de um módulo solar fotovoltaico

Fonte: Buemi, 2010

Uma única célula solar de silício cristalino gera energia elétrica em uma faixa de 1,5Wp. Na maioria dos casos práticos, isso não é suficiente. Portanto, é necessário interligar um certo número de células solares para construir um módulo solar. Dependendo da faixa de potência do módulo, a ligação das células solares pode ser realizada em série ou em paralelo.

A figura B2 mostra uma ligação em série de células solares. Nela, a mesma corrente flui de cada célula solar, e a tensão total é a soma parcial das tensões através das células individuais. A conexão em séries das células solares e também dos módulos solares provoca um efeito indesejado quando uma célula solar ou módulo é total ou

parcialmente sombreada. O elo mais fraco na cadeia determina a qualidade de todo o sistema. Mesmo quando apenas uma célula é sombreada, o efeito é o mesmo como se todas as células ou módulos fossem sombreados. Desse modo, a saída de potência cai drasticamente.

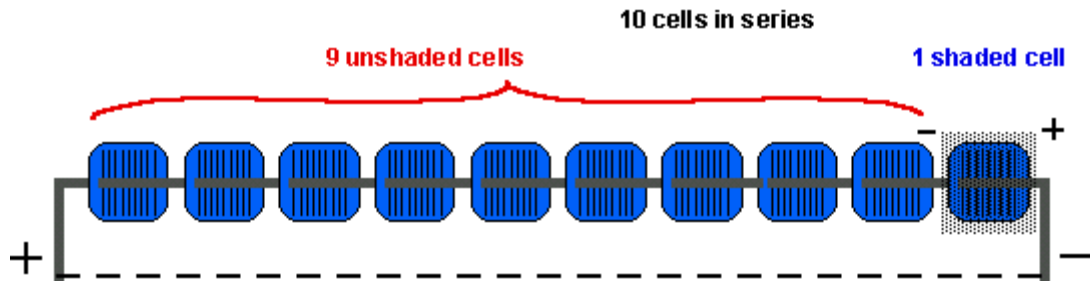


Figura B2 - Diagrama de 10 células ligadas em série, sendo uma delas sombreada

Fonte: HONSBURG; BOWDEN, 2013

Um outro efeito indesejável causado nas conexões em série é a ocorrência de pontos quentes, quando as células individuais são parcialmente sombreadas. A ocorrência do ponto quente pode ser compreendida ao perceber-se que o diodo sombreado apresenta uma resistência muito elevada quando comparada com a carga. Em seguida, a maior parte da queda de tensão gerada pelo resto das células aparece no diodo sombreado. Para evitar essa condição de operação, diodos chamados de *bypass* são ligados antiparalelos às células solares, tais que as diferenças de tensão não surjam na direção inversa das células solares. A Solução ideal é mostrada na figura B3, com um diodo de derivação para cada célula solar. No entanto, na prática, é suficiente instalar um diodo de derivação para cada 15 ou 20 células solares. Em geral, essas conexões são incluídas pelo fabricante na caixa de conexão. Como mencionado anteriormente, na ligação dos módulos solares em série, o elo mais fraco da cadeia determina a qualidade completa do conjunto. Módulos FV de tecnologias diferentes ou de diferentes fabricantes não devem ser ligados em série. Isso também se aplica para a ligação em série de várias células solares, compondo um módulo. Na prática, as diferenças na eficiência de células solares ou módulos individuais de um mesmo fabricante são possíveis. Essa situação é chamada de incompatibilidade, e as perdas são chamadas de perdas por incompatibilidade.

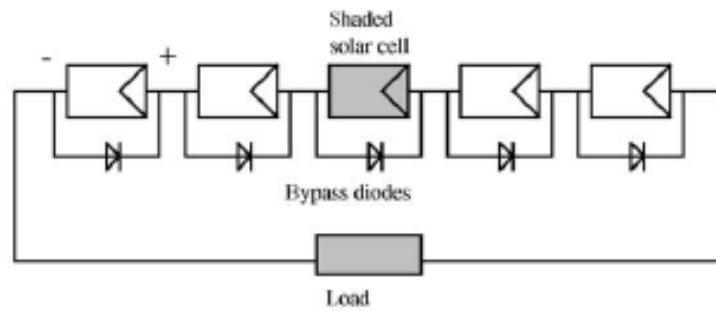


Figura B3 - Ligação em série de células solares com diodo de derivação (bypass)
 Fonte: HOFFMAN, 2005

Se correntes mais elevadas são exigidas em um sistema, essas podem ser obtidas por conexão em paralelo das células individuais, como é mostrado na figura B4.

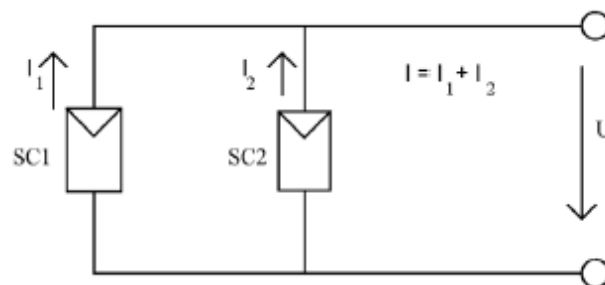


Figura B4 - Ligação em paralelo das células ou módulos solares
 Fonte: HOFFMAN, 2005

Em uma ligação paralelo, a tensão de cada célula ou módulo é igual, enquanto que a corrente total é a soma de todas as correntes parciais.

B.2 RADIAÇÃO SOLAR E A ORIENTAÇÃO DOS MÓDULOS

As fusões termonucleares que acontecem no núcleo do Sol são liberadas em forma de energia eletromagnética. A teoria que, atualmente, é mais aceita sobre essa energia eletromagnética pode ser representada como uma combinação de energia alternada e campos eletromagnéticos, ou partículas de energia chamadas fótons. Essa definição de radiação é difícil de entender, mas nos permite descrever e prever como essa radiação irá se comportar (CEPEL, 2006).

A radiação produzida no núcleo do Sol possui temperaturas aproximadas de 15.000.000 de Kelvin. A temperatura estimada da superfície do Sol é de aproximadamente 5.800 Kelvin.

A radiação provinda do Sol, que viaja através do espaço, é constituída de diferentes comprimentos de onda. A radiação é classificada quanto ao comprimento de onda, e quanto menor esse comprimento, maior a energia de radiação.

A Terra, um pequeno corpo, se comparada ao Sol, intercepta a radiação solar a aproximadamente 150 milhões de quilômetros de distância do Sol. A Terra recebe 2 bilionésimos da radiação emitida pelo Sol, o que equivale a 35.000 vezes a energia usada por todas as pessoas do planeta em um ano.

A constante solar, que define a quantidade de energia absorvida pela atmosfera terrestre, é de 1,94 calorias por centímetro quadrado por hora.

De toda a radiação solar interceptada pela Terra, cerca de 35% é refletida de volta para o espaço. As nuvens e a poeira atmosférica são as maiores responsáveis por essa reflexão da radiação solar; porém, a água, a neve e a terra, que estão localizadas na superfície terrestre, também provocam uma reflexão dessa radiação.

A composição da atmosfera é o fator mais importante na determinação da radiação que chega à superfície da Terra. Quando o Sol está diretamente acima de um determinado ponto de incidência, a quantidade de energia que passa através da atmosfera é alta; já quando o Sol não está diretamente acima do ponto de incidência, como, por exemplo, durante o pôr do Sol, o nível de energia, que passa pela atmosfera é consideravelmente mais baixo.

Em virtude dos efeitos de translação, rotação e da inclinação da Terra, os níveis de radiação solar incidentes variam em função dos meses do ano. A inclinação da Terra, que é de 23,5°, determina também as estações do ano nos hemisférios Norte e Sul. A figura B5 mostra, de forma esquemática, as variações das estações do ano e as posições do planeta em relação ao Sol.

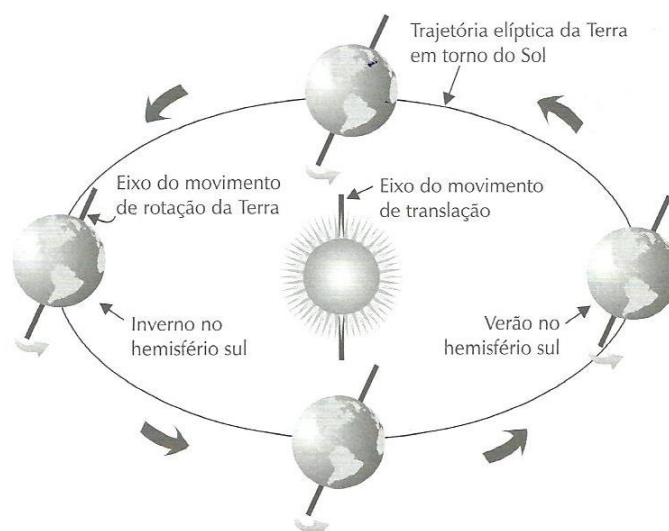


Figura B5 - Influência da posição do planeta terra em relação ao Sol nas estações do ano
 Fonte: VILLALVA; GAZOLI, 2013

A angulação que os raios solares fazem com uma superfície determinam a quantidade de energia que será absorvida. Desde que os raios que venham para a Terra sejam perfeitamente paralelos, uma superfície que seja perpendicular a esses raios absorverá a maior parte da energia. Com o movimento do Sol, a absorção da energia pela superfície, descrita anteriormente, decresce. Entretanto, uma superfície pode ter inclinação de 25° com a perpendicular de incidência dos raios solares e, ainda assim, absorver 90% da radiação. O ângulo que os raios fazem com uma superfície irá determinar o nível de absorção da energia (CEPEL, 2006; VILLALVA, GAZOLI, 2013).

O total de energia absorvida consiste não só da radiação direta que é absorvida, mas também da radiação difusa e refletida.

É importante saber que a captura de energia Solar depende da área da superfície de absorção. Para se absorver uma determinada quantidade de energia vinda do Sol, uma área grande o suficiente é necessária para se obter a absorção desejada.

Em função desses aspectos, podem ser utilizados sistemas de rastreamento, visto que os mesmos têm por finalidade acompanhar o movimento do Sol ao longo do dia, otimizando, assim, a absorção dos raios solares. Entretanto, na prática, a maioria dos sistemas fotovoltaicos utilizados dispõem de montagem fixa.

B.3 SISTEMAS DE CONEXÃO FOTOVOLTAICOS

As aplicações fotovoltaicas terrestres podem ser divididas em dois tipos principais: os sistemas autônomos (*off-grid*) e os sistemas conectados a rede (*on-grid*).

A figura B6 mostra um gráfico que representa a evolução da capacidade instalada dos sistemas FV *on-grid* e *off-grid*, de 2006 até 2010.

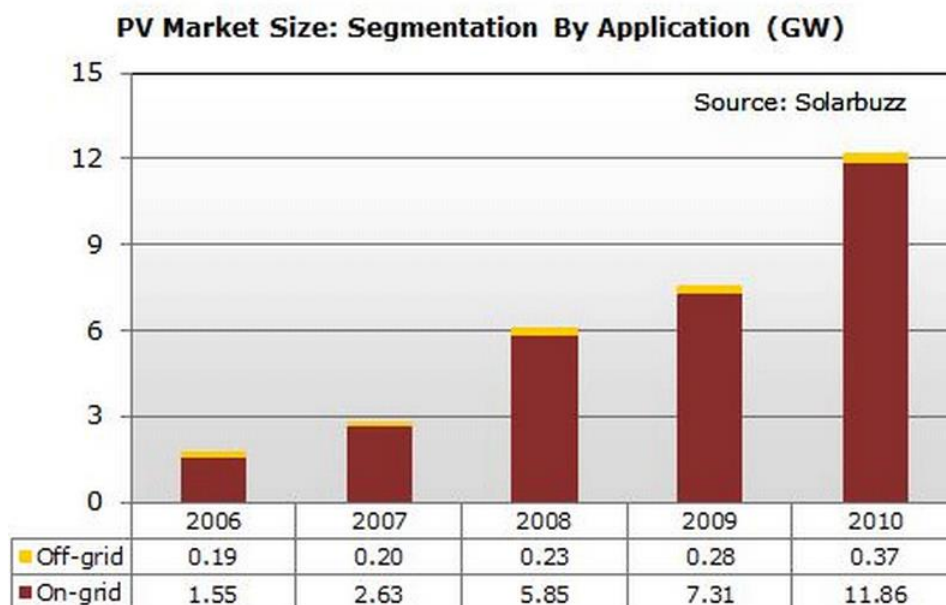


Figura B6 - Percentagem de sistemas FV off-grid e on-grid, de 2006 até 2010
 Fonte: Solarbuzz, S.d.

Como se observa, os sistemas conectados à rede apresentaram um crescimento acentuado, dos anos 2006 até o ano de 2010. Esse percentual foi de 665% enquanto que, nos sistemas off-grid, esse percentual foi de apenas 95%. Tal fato se deve ao barateamento da tecnologia FV, bem como da ampliação das linhas de transmissão ao redor do mundo.

Os sistemas FV isolados podem ser de alguns miliwatts até vários quilowatts. Eles não têm conexão com a rede elétrica convencional. Com a finalidade de assegurar o fornecimento ao sistema autônomo de energia elétrica, quando em horas do dia sem radiação (noites) ou baixos índices de radiação (dias nublados ou chuvosos), o sistema autônomo dispõe de armazenadores de energia (baterias). Se os sistemas são utilizados somente durante o momento em que a radiação é suficiente para fornecer ao sistema potência elétrica diretamente, um sistema de armazenamento não é necessário. Isso também se aplica à situação em que o produto entregue pelo sistema pode ser armazenado, por exemplo: água (HOFFMAN, 2005).

Atualmente, existe uma grande variedade de sistemas autônomos. Os exemplos vão desde calculadoras e relógios solares a sistemas de controle de tráfego para dispositivos que são capazes de fornecer energia elétrica para um ou para vários edifícios em áreas remotas. Eles podem ser sistemas de corrente contínua pura, com ou

sem uma bateria de armazenamento, ou podem ser sistemas de corrente alternada com um inversor, conforme a figura B7.

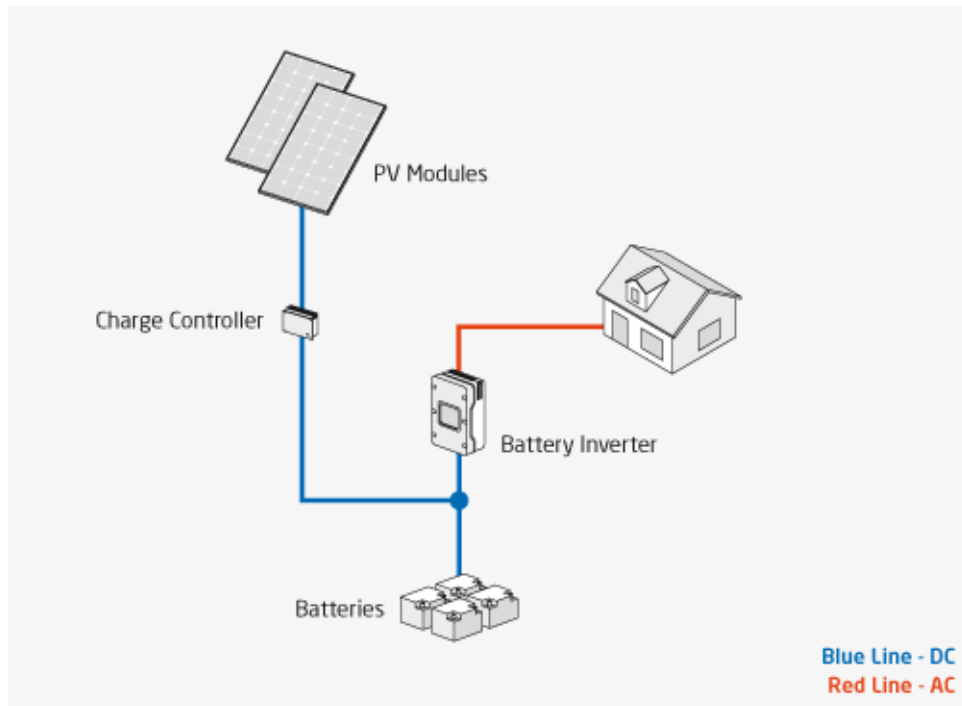


Figura B7 - Esquema de um sistema FV iSolado
Fonte: US DEPARTMENT ENERGY, S.d.

Os sistemas independentes (*off-grid*) podem ser implementados com um gerador FV como a única fonte de energia ou com fontes de energia auxiliares, como os chamados sistemas híbridos, onde geradores adicionais empregam combustíveis fósseis a exemplo do óleo diesel ou gás, ou, ainda, energias renováveis, como energia eólica, biomassa e hídrica. A escolha da capacidade de armazenamento e da potência relativa de um gerador FV e uma fonte de alimentação auxiliar dependem das condições de radiação, da segurança necessária para o abastecimento e, por último, da economia. A figura B8 dá uma visão geral da percentagem de aplicação *off-grid* no mercado FV mundial. Mais de um terço de todos os sistemas autônomos fotovoltaicos são usados em unidades rurais e residências fora do alcance das redes elétricas convencionais (HOFFMAN, 2005).

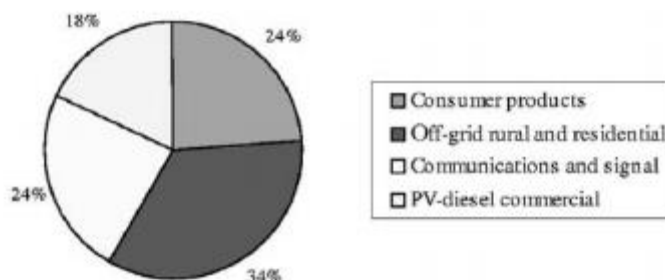


Figura B8 - Percentagem de aplicação do sistema FV off-grid ao redor do mundo
 Fonte: HOFFMAN, 2005

A figura B9 mostra um esquema de geração híbrida de energia elétrica para uma residência.

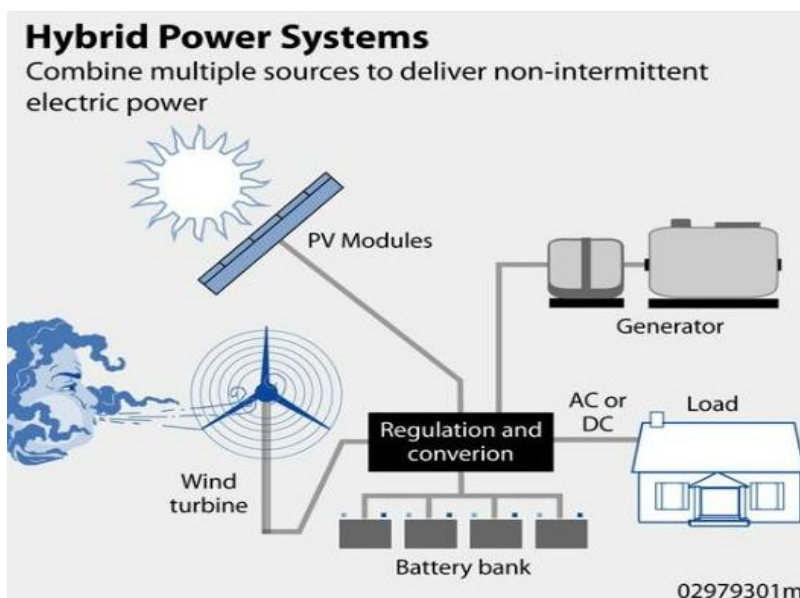


Figura B9 - Esquema de geração híbrida de energia elétrica
 Fonte: US DEPARTMENT ENERGY, S.d.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (*on grid*) são instalados no telhado de edifícios ou integrados em suas fachadas. Podem, também, compor estruturas para estacionamento, servindo de cobertura e gerando energia. O armazenamento de energia não é necessário nesse caso; assim, dispensam-se as baterias. Em dias ensolarados, o gerador solar fornece energia para os aparelhos elétricos. O excesso de energia gerada é, então, disponibilizado para a rede pública de distribuição. Durante a noite ou em dias onde há pouca incidência de Sol, o sistema recebe energia da rede pública. No caso de uma tarifa favorável, como a que está em vigor em alguns países, é vantajoso entregar toda a energia gerada à rede pública. Por exemplo, na Alemanha, cerca de 80% dos mais de 50.000 sistemas fotovoltaicos ligados à rede, são instalados

em telhados de edifícios ou residências. A vantagem da instalação de um sistema fotovoltaico, em um edifício ou sobre o mesmo, é que não é necessária qualquer zona separada para o gerador solar. A figura B10 mostra um diagrama que representa a instalação de um sistema fotovoltaico interligado à rede de distribuição (HOFFMAN, 2005).

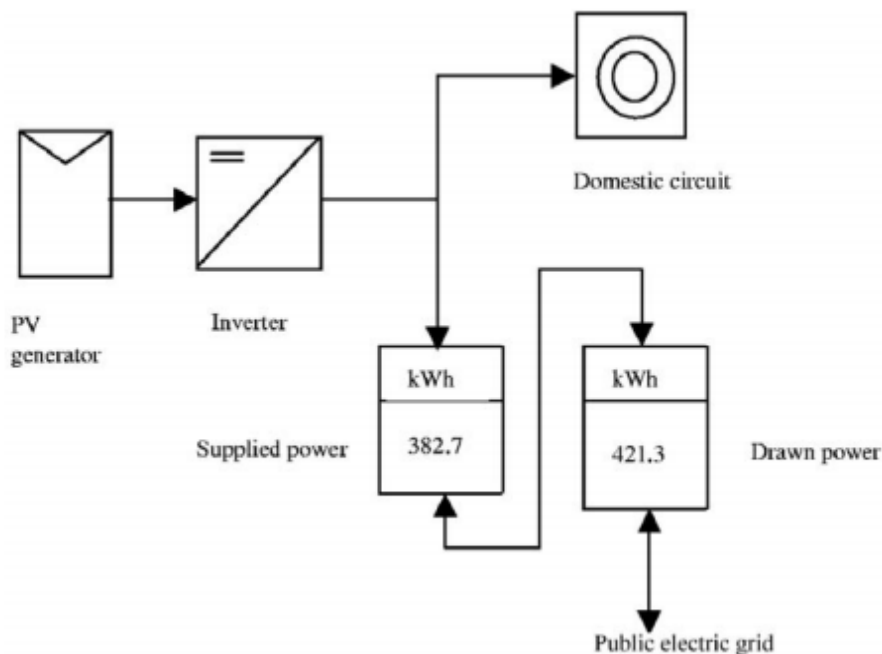


Figura B10 - Diagrama de blocos de um sistema interligado a rede de distribuição
 Fonte: HOFFMAN, 2005

Atualmente, o sistema de fornecimento de energia elétrica nos países industrializados é baseado em uma estrutura com grandes centrais geradoras, que abastecem os consumidores por meio de uma densa rede de distribuição.

Essa estrutura vai sofrer cada vez mais no mercado globalizado, uma vez que não é flexível o suficiente na escolha de fontes de energia primárias para, assim, permitir o fluxo de energia e a otimização dos seus custos. Além disso, a obtenção de autorização para grandes usinas ou ampliações da rede se tornará cada vez mais complicada. Portanto, esse tipo de estrutura de capital intensivo dificilmente poderia ser implementado para eletrificação abrangente nos países em desenvolvimento. Há várias abordagens em curso para desenvolver determinadas estruturas que permitam a otimização das redes elétricas já existentes nos países industrializados e, ecologicamente, aceitáveis em países emergentes. Essas abordagens visam ajudar na transição para uma estrutura mais descentralizada de pequenos e médios geradores.

Nesses conceitos, novos dispositivos como a cogeração, células de combustível, e sistema de energias renováveis, tais como a fotovoltaica e a eólica, têm papel fundamental. No entanto, por conta das limitações operacionais específicas de todos esses componentes, novos dispositivos têm de ser incorporados em uma tal estrutura, para conseguir uma utilização otimizada destas novas tecnologias.

ANEXO C

MONTAGEM E TESTE DO CIRCUITO EM SOFTWARE

C. 1 PROJETO DO CIRCUITO ELABORADO

Nesta proposta, utilizou-se um circuito mais elaborado à base de amplificadores operacionais, escolhendo-se o LM324 comparador conforme a figura C1 a seguir (JÚNIOR, 1996).

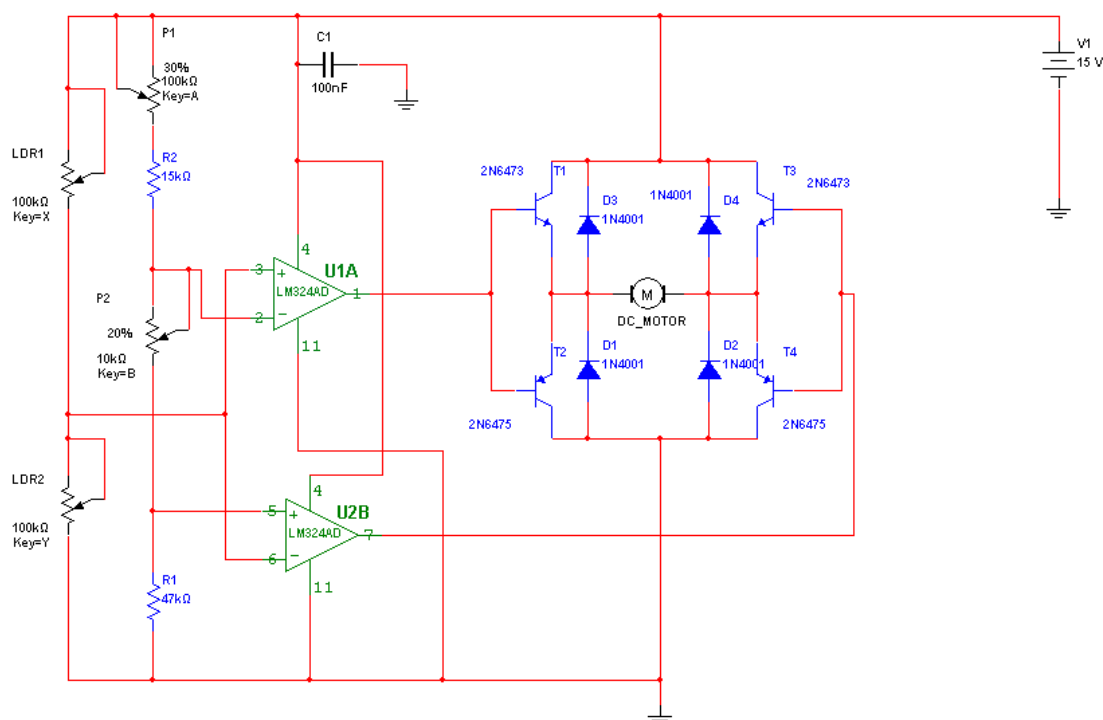


Figura C1 - Circuito eletrônico com amplificador operacional simulado no Multisim®
Fonte: Autor

O circuito foi simulado no Multisim^{®3}, funcionando perfeitamente. Com apenas 5% na diferença nas resistências entre os dois LDR's, o servomotor é acionado. Na simulação, substituímos os LDR's por potenciômetros dentro da faixa dos LDR's e o servomotor por uma lâmpada de 12V para permitir melhor visualização do funcionamento.

3 *Software* de simulação e projeto de circuitos eletrônicos da National Instruments.

O circuito proposto funciona da seguinte forma: os dois amplificadores operacionais comparam as tensões nas entradas inversoras e não inversoras. Se os LDR's apresentarem a mesma resistência, por igual iluminação, a tensão é a mesma nas duas entradas e, assim, a saída é zero e os dois transistores entram em corte. Quando existe uma variação entre as resistências dos dois LDR's, os dois comparadores oferecem saídas positiva ou negativa, dependendo de qual LDR tem resistência maior ou menor, e o resultado é que os transistores são, então, acionados, alimentando o servomotor em um sentido ou noutro, arrastando o módulo solar FV. Os dois potenciômetros de 100k Ω e 10k Ω servem para ajustar a sensibilidade do circuito. O amplificador operacional usado foi o LM324D, cujo esquema e aspecto estão mostrados na figura C2.

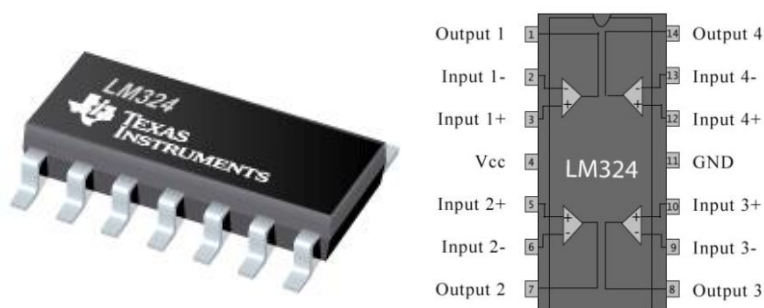


Figura C2 - Aspecto e esquema do Operacional LM324D
 Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, 2014

Na figura C3, expõe-se a montagem do circuito em *Protoboard*.

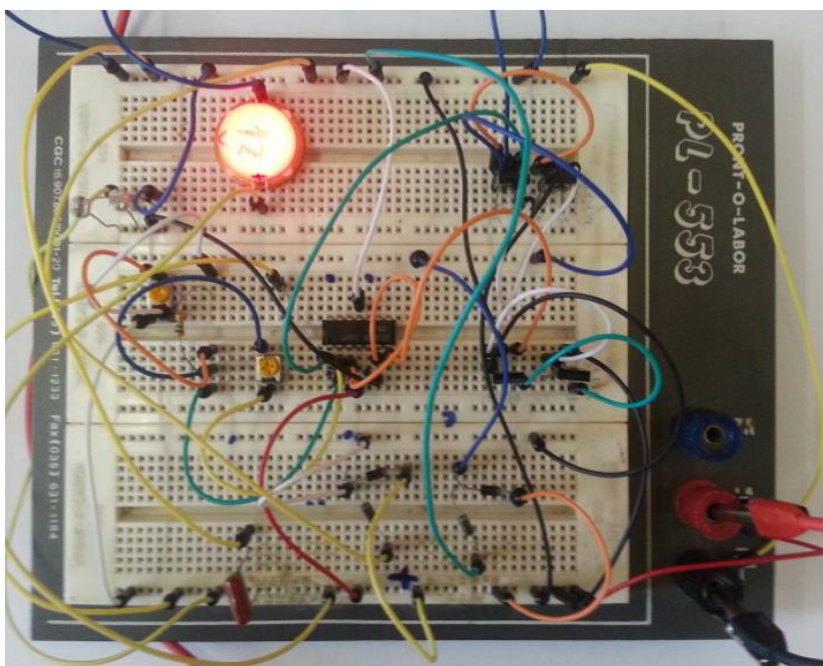


Figura C3 - Circuito montado na Protoboard
 Fonte: Autor

C. 2 MEDIÇÕES DAS CORRENTES NO SIMULADOR E NO CIRCUITO REAL

No circuito mostrado na figura C4, foi efetuada a medição da corrente de curto circuito I_{sc} entre os terminais do motor, encontrando-se $I_{sc} = 1,888A$.

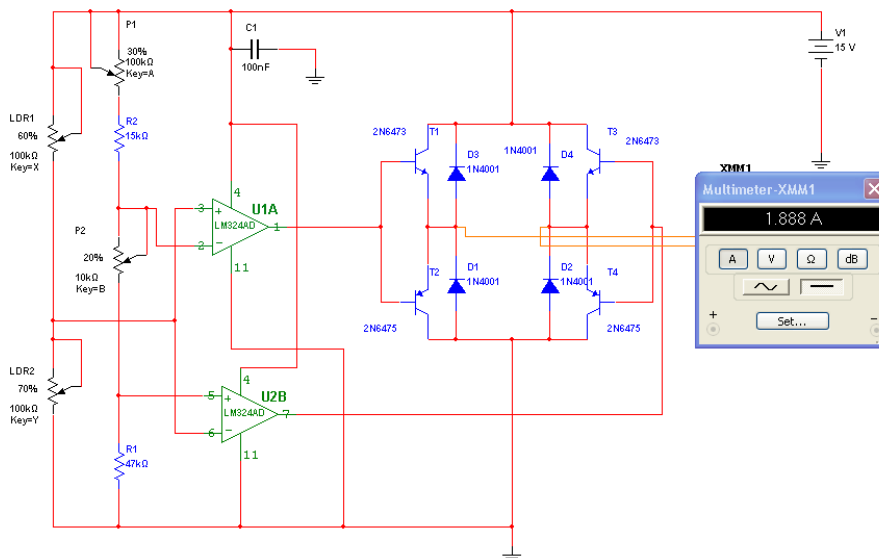


Figura C4 - Medição da corrente de curto circuito do circuito acionador no simulador Multisim®

Fonte: Autor

As correntes reais medidas do circuito acionador do motor foram as constantes da tabela C1.

Condição do Circuito	Corrente (mA)
Repouso	1,5
Acionado sem Carga	22,1
Curto Circuito	1.580

Tabela C1 - Correntes do circuito acionador do repouso ao curto circuito

Fonte: Autor

Comparando-se as correntes medidas no simulador e no circuito real, observa-se que são bastante próximas, ou seja, 1,888A e 1,58A respectivamente. A diferença deve-se ao fato de, no circuito real, ter-se a impedância interna dos componentes que afetam o valor real. Como a corrente de acionamento do motor está na faixa de 110 a 150mA, com corrente de partida 200mA, correspondendo a menos de 15% da corrente de curto circuito, considera-se o circuito projetado bastante satisfatório.

ANEXO D

RELÓGIO SOLAR

Um relógio de Sol, conforme o exposto na figura D1, também chamado de gnômon, é um dispositivo obsoleto, que servia para determinar a hora do dia, usando como referência a posição do Sol. Os tipos de relógios mais comuns, conhecidos como relógios de jardim, feitos sobre um desenho horizontal, o Sol projeta sua sombra sobre a superfície com linhas que indicam as horas do dia. Uma haste com uma ponta fina, ou afiada, é colocada de certa forma sobre o relógio, para que, quando o Sol se mova, a sombra da haste se alinhe com as diferentes linhas das horas.



Figura D1 - Relógio de Sol

Fonte: PORTO, S.d.

ANEXO E

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM E SEM RASTREADORES DISPONÍVEIS
COMERCIALMENTE**



TABELA PREÇOS DE VENDA

BOSCH by SotecnSol

Sistema Fotovoltaico de 3,76 kW	P. Venda (€)
Kit Plus	
Sistema de 16 painéis de 235Wp, estrutura de alumínio anodizado a 0°, Inversor Kaco 3600xi DCS-PT-3.6 e Contador c/ GSM	12069,77
Kit Basic	
Sistema de 16 painéis de 235Wp, estrutura de alumínio anodizado a 0°, Inversor Kaco 3600xi DCS-PT-3.6	11572,09
Sistema Fotovoltaico de 4,23 kW	
Kit Plus	
Sistema de 18 painéis de 235Wp, estrutura de alumínio anodizado a 0°, Inversor Kaco 3600xi DCS-PT-3.6 e Contador c/ GSM	13308,53
Kit Basic	
Sistema de 18 painéis de 235Wp, estrutura de alumínio anodizado a 0°, Inversor Kaco 3600xi DCS-PT-3.6	12810,85
Sistema Fotovoltaico de 3,76 kW - Seguidor	
Kit Plus	
Sistema de 16 painéis de 235Wp, seguidor de 2 eixos, Inversor Kaco 3600xi DCS-PT-3.6 e Contador c/ GSM	17649,61
Kit Basic	
Sistema de 16 painéis de 235Wp, seguidor de 2 eixos, Inversor Kaco 3600xi DCS-PT-3.6	17151,94
Sistema Fotovoltaico de 4,23 kW - Seguidor	
Kit Plus	
Sistema de 18 painéis de 235Wp, seguidor de 2 eixos, Inversor Kaco 3600xi DCS-PT-3.6 e Contador c/ GSM	18778,29
Kit Basic	
Sistema de 18 painéis de 235Wp, seguidor de 2 eixos, Inversor Kaco 3600xi DCS-PT-3.6	18280,62

Os preços indicados não incluem transporte
Estes preços são acrescidos da taxa do IVA em vigor
Estes preços podem ser alterados sem aviso prévio
Tabela emitida em 28 de Fevereiro de 2011

Fonte: sotecniSol, 2011

CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DO RASTREADOR

Philips Semiconductors

Product specification

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

DESCRIPTION

The LM124/SA534/LM2902 series consists of four independent, high-gain, internally frequency-compensated operational amplifiers designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages.

UNIQUE FEATURES

In the linear mode, the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.

The unity gain crossover frequency and the input bias current are temperature-compensated.

FEATURES

- Internally frequency-compensated for unity gain
- Large DC voltage gain: 100dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1MHz (temperature-compensated)
- Wide power supply range Single supply: $3V_{DC}$ to $30V_{DC}$ or dual supplies: $\pm 1.5V_{DC}$ to $\pm 15V_{DC}$
- Very low supply current drain: essentially independent of supply voltage (1mW/op amp at $+5V_{DC}$)
- Low input biasing current: $45nA_{DC}$ (temperature-compensated)
- Low input offset voltage: $2mV_{DC}$ and offset current: $5nA_{DC}$
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage: $0V_{DC}$ to $V_{CC}-1.5V_{DC}$ swing

PIN CONFIGURATION

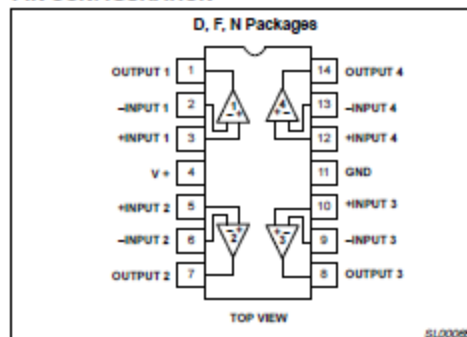


Figure 1. Pin Configuration

ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	LM124N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	LM124F	0581B
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-25°C to +85°C	LM224N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-25°C to +85°C	LM224F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-25°C to +85°C	LM224D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0°C to +70°C	LM324N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0°C to +70°C	LM324F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0°C to +70°C	LM324D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0°C to +70°C	LM324AN	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0°C to +70°C	LM324AD	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +85°C	SA534N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-40°C to +85°C	SA534F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +85°C	SA534D	SOT108-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +125°C	LM2902D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +125°C	LM2902N	SOT27-1

Fonte: ALLDATASHEET.COM, Sd.

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V_{CC}	Supply voltage	32 or ± 16	V_{DC}
V_{IN}	Differential input voltage	32	V_{DC}
V_{IN}	Input voltage	-0.3 to +32	V_{DC}
P_D	Maximum power dissipation, $T_A=25^\circ\text{C}$ (still-air) ¹		
	N package	1420	mW
	F package	1190	mW
	D package	1040	mW
	Output short-circuit to GND one amplifier ² $V_{CC} < 15V_{DC}$ and $T_A = 25^\circ\text{C}$	Continuous	
I_{IN}	Input current ($V_{IN} < -0.3V$) ³	50	mA
T_A	Operating ambient temperature range		
	LM324/A	0 to +70	$^\circ\text{C}$
	LM224	-25 to +85	$^\circ\text{C}$
	SA534	-40 to +85	$^\circ\text{C}$
	LM2902	-40 to +125	$^\circ\text{C}$
LM124	-55 to +125	$^\circ\text{C}$	
T_{STG}	Storage temperature range	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
T_{SOLD}	Lead soldering temperature (10sec max)	300	$^\circ\text{C}$

NOTES:

- Derate above 25°C at the following rates:
F package at $9.5\text{mW}/^\circ\text{C}$
N package at $11.4\text{mW}/^\circ\text{C}$
D package at $8.3\text{mW}/^\circ\text{C}$
- Short-circuits from the output to V_{CC+} can cause excessive heating and eventual destruction. The maximum output current is approximately 40mA, independent of the magnitude of V_{CC-} . At values of supply voltage in excess of $+15V_{DC}$ continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction.
- This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input bias clamps. In addition, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This action can cause the output voltages of the op amps to go to the $V+$ rail (or to ground for a large overdrive) during the time that the input is driven negative.

Fonte: DATASHEETCATALOG.COM, S.d.

Light Dependent Resistor - LDR

Two cadmium sulphide(cds) photoconductive cells with spectral responses similar to that of the human eye. The cell resistance falls with increasing light intensity. Applications include smoke detection, automatic lighting control, batch counting and burglar alarm systems.



Applications

Photoconductive cells are used in many different types of circuits and applications.

Analog Applications

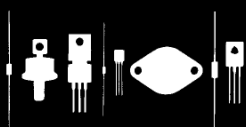
- Camera Exposure Control
- Auto Slide Focus - dual cell
- Photocopy Machines - density of toner
- Colorimetric Test Equipment
- Densitometer
- Electronic Scales - dual cell
- Automatic Gain Control – modulated light source
- Automated Rear View Mirror

Digital Applications

- Automatic Headlight Dimmer
- Night Light Control
- Oil Burner Flame Out
- Street Light Control
- Absence / Presence (beam breaker)
- Position Sensor

Electrical Characteristics

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Cell resistance	1000 LUX	-	400	-	Ohm
	10 LUX	-	9	-	K Ohm
Dark Resistance	-	-	1	-	M Ohm
Dark Capacitance	-	-	3.5	-	pF
Rise Time	1000 LUX	-	2.8	-	ms
	10 LUX	-	18	-	ms
Fall Time	1000 LUX	-	48	-	ms
	10 LUX	-	120	-	ms
Voltage AC/DC Peak		-	-	320	V max
Current		-	-	75	mA max
Power Dissipation				100	mW max
Operating Temperature		-60	-	+75	Deg. C

<p>Central Semiconductor Corp. Central Semiconductor Corp. Central Semiconductor Corp. Central™ Semiconductor Corp.</p> <p>145 Adams Avenue Hauppauge, New York 11788</p>		<p>2N6473 2N6474 NPN 2N6475 2N6476 PNP</p> <p>COMPLEMENTARY SILICON SWITCHING TRANSISTORS</p> <p>JEDEC TO-220 CASE</p>
---	---	--

DESCRIPTION

The CENTRAL SEMICONDUCTOR 2N6473 Series types are complementary silicon power transistors manufactured by the epitaxial base process designed for general purpose amplifier and switching applications.

MAXIMUM RATINGS ($T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

	SYMBOL	2N6473	2N6474	UNIT
		2N6475	2N6476	
Collector-Base Voltage	VCBO	110	130	V
Collector-Emitter Voltage ($R_{BE}=100\Omega$)	VCER	110	130	V
Collector-Emitter Voltage	VCEO	100	120	V
Emitter-Base Voltage	VEBO		5.0	V
Collector Current	IC		4.0	A
Base Current	IB		2.0	A
Power Dissipation	PD		40	W
Operating and Storage Junction Temperature	TJ, Tstg		-65 TO +150	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance	θ_{JC}		3.125	$^\circ\text{C/W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

SYMBOL	TEST CONDITIONS	2N6473		2N6474		UNIT
		2N6475	MIN	MAX	MIN	
ICEV	VCE=Rated VCEO, VBE=1.5V			0.1	0.1	mA
ICEV	VCE=Rated VCEO, VBE=1.5V, $T_C=100^\circ\text{C}$			2.0	2.0	mA
ICER	VCE=Rated VCER, $R_{BE}=100\Omega$			0.1	0.1	mA
ICER	VCE=Rated VCER, $R_{BE}=100\Omega$, $T_C=100^\circ\text{C}$			2.0	2.0	mA
ICEO	VCE=½ Rated VCEO			1.0	1.0	mA
IEBO	VBE=5.0V			1.0	1.0	mA
BVCEO	IC=100mA	100			120	V
BVCER	IC=100mA, $R_{BE}=100\Omega$	110			130	V
VCE(SAT)	IC=1.5A, IB=0.15A			1.2	1.2	V
VCE(SAT)	IC=4.0A, IB=2.0A			2.5	2.5	V
VBE(ON)	VCE=4.0V, IC=1.5A			2.0	2.0	V
VBE(ON)	VCE=2.5V, IC=4.0A			3.5	3.5	V
hFE	VCE=4.0V, IC=1.5A		15	150	15	150
hFE	VCE=2.5V, IC=4.0A		2.0		2.0	
hfe	VCE=4.0V, IC=0.5A, f=50kHz		20		20	
fT	VCE=4.0V, IC=0.5A (2N6473, 2N6474)		4.0		4.0	MHz
fT	VCE=4.0V, IC=0.5A (2N6475, 2N6476)		5.0		5.0	MHz
Cob	VCB=10V, f=1.0MHz		250		250	pF

Fonte: DATASHEETLIB, S.d.



1N4001 - 1N4007

1.0A RECTIFIER

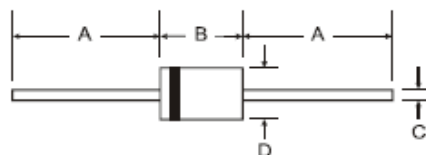
[Please click here to visit our online spice models database.](#)

Features

- Diffused Junction
- High Current Capability and Low Forward Voltage Drop
- Surge Overload Rating to 30A Peak
- Low Reverse Leakage Current
- Lead Free Finish, RoHS Compliant (Note 3)

Mechanical Data

- Case: DO-41
- Case Material: Molded Plastic. UL Flammability Classification Rating 94V-0
- Moisture Sensitivity: Level 1 per J-STD-020D
- Terminals: Finish - Bright Tin. Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Cathode Band
- Mounting Position: Any
- Ordering Information: See Page 2
- Marking: Type Number
- Weight: 0.30 grams (approximate)



Dim	DO-41 Plastic	Min	Max
A	25.40	—	—
B	4.08	5.21	—
C	0.71	0.864	—
D	2.00	2.72	—

All Dimensions in mm

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

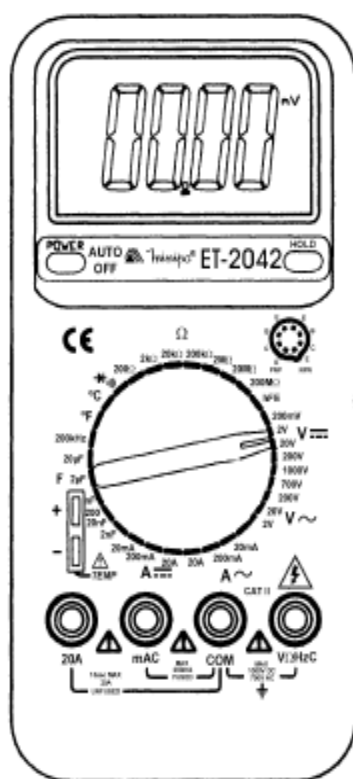
Characteristic	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit	
Peak Repetitive Reverse Voltage	V_{RRM}									
Working Peak Reverse Voltage	V_{RWM}	50	100	200	400	600	800	1000	V	
DC Blocking Voltage	V_R									
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V	
Average Rectified Output Current (Note 1) @ $T_A = 75^\circ\text{C}$	I_O					1.0				A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load	I_{FSM}					30				A
Forward Voltage @ $I_F = 1.0\text{A}$	V_{FM}					1.0				V
Peak Reverse Current @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	I_{RM}					5.0				μA
at Rated DC Blocking Voltage @ $T_A = 100^\circ\text{C}$						50				
Typical Junction Capacitance (Note 2)	C_j	15				8			pF	
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$					100				K/W
Maximum DC Blocking Voltage Temperature	T_A									$^\circ\text{C}$
Operating and Storage Temperature Range	T_J, T_{STG}									$^\circ\text{C}$

Notes: 1. Leads maintained at ambient temperature at a distance of 9.5mm from the case.
2. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V DC.
3. EU Directive 2002/95/EC (RoHS). All applicable RoHS exemptions applied, see EU Directive 2002/95/EC Annex Notes.

Fonte: DIODES, S.d.

CARACTERÍSTICAS DO MULTÍMETRO MINIPA 2042


MULTÍMETRO DIGITAL ET-2042



MANUAL DE INSTRUÇÕES

4. ESPECIFICAÇÕES

4.1 Especificações Gerais

- Display: 3 ½ Dígitos (2000 Contagens).
- Taxa de Medição: 3 vezes / s.
- Indicação de Polaridade: Automática.
- Ajuste Automático de Zero.
- Indicação de Sobre-faixa: Dígitos mais significativo (1).
- Indicação de Bateria Fraca:  .
- Ambiente de Operação: 0°C a 40°C, RH<80%.
- Ambiente de Armazenamento: -10°C a 50°C, RH<80%.
- Uso Interno.
- Altitude Máxima: 2000m.
- Grau de Poluição: II.
- Segurança: IEC 1010 Categoria de Instalação II.
- Alimentação: 1 x 9V (6LF22, NEDA1604A).
- Dimensões: 190(A) x 88.5(L) x 27.5(P)mm.
- Peso: Aproximadamente 320g.

4.2 Especificações Elétricas

A precisão é dada como $\pm(\% \text{ da Leitura} + \text{Número de Dígitos})$, para temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa $< 75\%$.

• Tensão DC

Faixa	Precisão	Resolução
200mV	$\pm (0.5\% + 3D)$	100 μ V
2V		1mV
20V		10mV
200V		100mV
1000V	$\pm (1.0\% + 5D)$	1V

- Impedância de Entrada: 10M Ω .
- Proteção de Sobrecarga: 200mV: 250VDC / AC RMS.
2V ~ 1000V: 1000VDC / AC RMS

• Corrente DC

Faixa	Precisão	Resolução
20mA	$\pm (0.8\% + 3D)$	10 μ A
200mA	$\pm (1.2\% + 4D)$	100 μ A
20A	$\pm (2.0\% + 5D)$	10mA

- Queda de Tensão: 200mV.
- Máxima Corrente de Entrada: 20A (durante 15 s)
- Proteção de Sobrecarga: Fusível de Ação Rápida 0.2A/250V para a Entrada mA. A faixa 20A não possui fusível.

CARACTERÍSTICAS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO MINIPA MPS 303D



FONTE DE ALIMENTAÇÃO DIGITAL

Modelos

MPS-303D / MPC-303D

Manual do Usuário

Especificações Elétricas

- Operação Tensão Constante
 - Saída: 0~30V (continuamente ajustável)
 - Regulação: Linha $\leq (0.01\% + 3mV)$
 - Carga $\leq (0.01\% + 3mV)$
 - Tempo de Recuperação: $\leq 100\mu s$ (variação de carga de 50%, carga mínima de 0.5A)
 - Ripple e Ruído: $\leq 0.5mV$ RMS (5Hz - 1MHz)
 - Coefficiente de Temperatura: $\leq 300ppm/^{\circ}C$
- Operação Corrente Constante
 - Saída: 0~3A (continuamente ajustável)
 - Regulação: Linha $\leq (0.2\% + 3mA)$
 - Carga $\leq (0.2\% + 3mA)$
 - Ripple e Ruído: $\leq 3mA$ RMS
- Saída Fixa de 5V (somente MPC-303D)
 - Regulação: Linha: $\leq 5mV$
 - Carga: $\leq 100mV$
 - Corrente de Saída: 3A
 - Ripple e Ruído: $\leq 3mV$ RMS
 - Precisão Tensão de Saída: $5 \pm 0.25V$
- Mostrador
 - Digital: Display 3 dígitos à LED de 7 segmentos (Display Duplo na MPC-303D)
 - Precisão: $\leq (0.5\% \text{ Leit.} + 2 \text{ Díg.})$
 - Faixa de Tensão: 99.9V
 - Faixa de Corrente: 9.99A
 - Mostra Volts ou Amperes conforme posição da chave
- Isolação
 - Chassis - Terminal de Saída: $\leq 20M\Omega$ (DC 500V)
 - Chassis - Cabo AC: $\leq 30M\Omega$ (DC 500V)
- Proteção de Sobrecarga
- Proteção de Inversão de Polaridade

Fonte: MINIPA, 1999

CARACTERÍSTICAS DO MOTOR SOLAR



Fonte: SAT CONTROL, 2014

TECHNICAL DATA OF THE **SunTracer™** SOLAR MOTOR

Operation protocol	MSCS™
Horizontal rotation	typically 98° (100° max.)
Motor inclination (elevation)	75°
Pole diameter	ø40 mm
Gear type	steel hardened cogwheel gear
Rotation speed	1.33°/s ±25% @100W solar cell @ -10°C
Operating system voltage	12/24V solar system voltage
Operating supply voltage from a solar cell	from 7 to 43 VDC
Adjustable charger voltage at 12V system	switch-on (8-13V), switch-off (13,6-18,6V) @ 12V system
Adjustable charger voltage at 24V system	switch-on (21-26V), switch-off (26,6-31,6V) @ 24V system
Maximum continuous charge current	30 A at voltage >12V
Power consumption in idle state	15 mA ±25%
Operating power consumption (50W solar cell)	110-130 mA ±25%
Start-up current	200 mA @ t<0,25s
Operating temperature range	-25°C +70°C
Operating relative humidity	0% to 100% relative humidity
Connector	tubular clip, 19mm ² , over a wire
Connection	two 2-wire cables, with a 4mm ² Cu inner conductor
EAST-WEST limit	limit switches & software limit
Minimum moving step (automatic)	3.2°
Max. operating torque of the output pole	35.9 Nm @17V & @0.5°/s (measured)
Sun Clock synchronization	two buttons pressed simultaneously for 5 sec
Lifetime	20.000 periods over 190° (95°E+95°W)

Real energy measurement of two equal solar panels (fixed and motorized)

Two equal solar panels were exposed to the real sun and converted electrical power was measured.

Test conditions:

Solar panels (both): 50W (producer spec. at AM 1.5)

Date: July 2005

Time: 4:00 to 20:00 (sun time)

Geo. Latitude: 46° N

Weather conditions: sunny, but not totally clear

Results:

Average energy of fixed: 209,2Wh

Average energy of motorized: 338,5Wh

Note: sum of motor energy consumption through all day is 0.0832Wh or 0.025% of all collected energy.

Efficiency of motorized panel: 161,8%

CUSTO COMPARATIVO DOS SISTEMAS FV COM E SEM COM RASTREAMENTO



miniseguidor Solar SF4 3,4 m2 de 1 eje

★ Seja o primeiro a avaliar este produto

📦 Disponível
pode ser enviado dentro de 7 dias

preço anterior ~~554,18 €~~

481,58 €

El precio incluye el IVA

1

Fonte: MERKASOL, 2014

Categorias » Painéis Solares » Painéis Policristalino » Painel Solar Policristalino 230W 24V Alto Rendimiento



Novo Painel Solar Policristalino 230W 24V Alto Rendimiento

★ Seja o primeiro a avaliar este produto

📦 Disponível
pode ser enviado dentro de 2 dias

preço anterior ~~272,25 €~~

223,85 €

El precio incluye el IVA

1

Fonte: MERKASOL, 2014

Estrutura de alumínio solo 2 Painel

★ Seja o primeiro a avaliar este produto

📦 Disponível

pode ser enviado dentro de 2 dias



133,10 €

El precio incluye el IVA

GRADOS

20°

1



Adicionar ao carrinho

👉 Adicionar à minha lista

↔ Comparar

📧 Recomendar

↔ Artigos semelhantes

Fonte:
MERKASOL, 2014

RETORNO DOS INVESTIMENTOS:

EURO Escolha uma moeda ▼

Principal Intraday Histórico da moeda

Última negociação registrada: 16:00

	Horário	Compra	Venda	% Variação	Variação	Máximo	Mínimo
↑	16:00	3,4175	3,4203	1,9920	0,0668	3,4577	3,3500

Período a ser consultado:
de a

Fonte: UOL ECONOMIA, 2014