

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO  
AUTOMÁTICO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

**ALCEU FERREIRA ALVES**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP  
Dezembro – 2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO  
AUTOMÁTICO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

**ALCEU FERREIRA ALVES**

Orientador: Prof. Dr. José Angelo Cagnon

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP  
Dezembro – 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Alves, Alceu Ferreira, 1964-  
A474d Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos / Alceu Ferreira Alves.  
- Botucatu : [s.n.], 2008.  
xiv, 152 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2008

Orientador: José Angelo Cagnon

Inclui bibliografia

1. Energia Solar. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Sistemas fotovoltaicos. 4. Rastreamento Solar. I. Cagnon, José Angelo. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu) Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU**

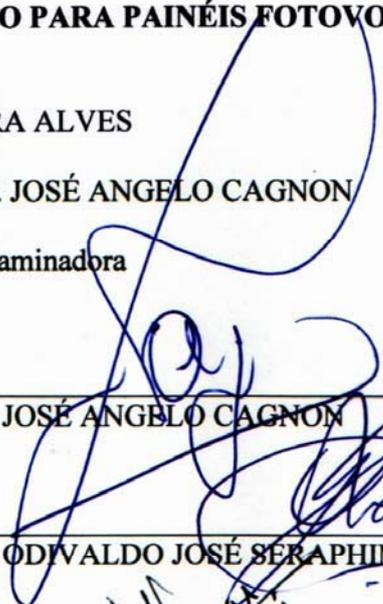
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: “DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO  
AUTOMÁTICO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS”**

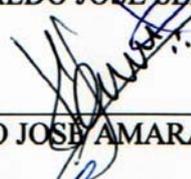
**ALUNO: ALCEU FERREIRA ALVES**

**ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON**

**Aprovado pela Comissão Examinadora**

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ODIVALDO JOSÉ SERAPHIM

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. JOSÉ ALFREDO COLOVAN ULSON

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. DIOGENES PEREIRA GONZAGA

**Data da Realização: 01 de dezembro de 2008.**

Dedico os anos de esforço dispendidos na realização deste trabalho às pessoas que me acompanharam nesta árdua tarefa, sempre me oferecendo palavras de incentivo e carinho:

Aos meus pais Alceu e Hermínia, pela confiança, pelas orações e pela paciência durante todos estes anos em que acompanharam minha batalha por este objetivo,

Às minhas filhas Gabriela e Giovana, razões do meu existir,

À memória de meu avô Manuel, que partiu do nosso convívio sem ver realizado este sonho, mas que me abençoou com sua simplicidade espontânea e certamente está feliz hoje com esta conquista,

Às demais pessoas que sinceramente me amam e celebram junto comigo o objetivo alcançado.

## AGRADECIMENTOS

A Deus Nosso Senhor, por esta graça alcançada.

Ao Dr. José Angelo Cagnon, pela orientação, incentivo e inestimável ajuda na condução da pesquisa, e principalmente, pela amizade e compreensão nos momentos de desânimo.

À minha querida Marina, pela ajuda na elaboração das figuras, e especialmente pelo carinho e atenção quando vinha o cansaço, apoiando-me e incentivando-me a todo instante.

Aos colegas do Depto. de Eng. Elétrica da Faculdade de Engenharia da UNESP – Bauru, que acompanharam as dificuldades enfrentadas e ofereceram preciosas sugestões, em especial o professor Paulo José Amaral Serni e os técnicos Osmar Luis Martinelli e Edson Oshiro.

Aos alunos Daniel Spoladore e Henrique Geraldo de Moraes, pela colaboração na parte experimental e no desenvolvimento do programa de controle, trabalho que tornou esta caminhada mais suave e menos demorada.

Aos demais amigos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração desta pesquisa.

À FAPESP e à FUNDUNESP, pelo apoio financeiro e à direção da FE/UNESP-Bauru, pela cessão do espaço para instalação dos equipamentos.

## SUMÁRIO

1	RESUMO .....	1
2	INTRODUÇÃO.....	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1	Energia Solar .....	9
3.1.1	As Características do Sol.....	11
3.1.2	A Constante Solar.....	11
3.1.3	O Espectro Solar Extraterrestre .....	13
3.1.4	Irradiância Solar Extraterrestre.....	15
3.1.5	Radiação Solar Extraterrestre sobre uma Superfície .....	17
3.1.6	Características da Radiação Solar ao Nível do Solo .....	19
3.1.7	O Espectro Solar na Superfície da Terra .....	20
3.2	A Posição do Sol .....	21
3.2.1	Os movimentos da Terra .....	21
3.2.2	A medida do Tempo .....	23
3.2.2.1	Os Fusos Horários .....	24
3.2.2.2	O Horário de Verão .....	24
3.2.2.3	O Tempo Sideral.....	25
3.2.2.4	O Ângulo Horário.....	25
3.2.2.5	A Hora Solar.....	26
3.2.2.6	A Equação do Tempo .....	27
3.2.2.7	Conversão do Tempo.....	29
3.2.3	O Ângulo de Declinação.....	30
3.2.4	O Ângulo de Latitude .....	31
3.3	Energia Solar Fotovoltaica .....	33
3.3.1	Histórico .....	33
3.3.2	Tecnologia e Eficiência .....	35
3.3.2.1	Silício Cristalino.....	36
3.3.2.2	Filmes finos .....	37

3.3.3	Módulos Fotovoltaicos .....	39
3.3.3.1	Diodo de Passagem.....	40
3.3.3.2	Diodo de Bloqueio.....	40
3.3.3.3	Características Elétricas.....	41
3.3.4	Componentes de um Sistema Solar Fotovoltaico .....	44
3.3.5	Sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica.....	46
3.3.6	Sistemas de Armazenamento de Energia – Baterias .....	48
3.4	Sistemas de Posicionamento.....	50
3.5	Motores de Passo .....	54
3.5.1	Princípios de Operação.....	54
3.5.2	Tipos de motores de passo.....	55
3.5.2.1	Motor de passo de relutância chaveado (SRM).....	55
3.5.2.2	Motor de passo de ímã permanente .....	56
3.5.2.3	Motor de passo híbrido.....	57
3.5.3	Tipos de enrolamentos para motores de passo .....	57
3.5.3.1	Motor de passo unipolar .....	57
3.5.3.2	Motor de passo bipolar .....	59
3.5.3.3	Motor de passo bifilar.....	60
3.5.4	Características de um motor de passo.....	61
3.5.4.1	Características dinâmicas .....	61
3.5.4.2	Características estáticas .....	63
3.5.5	Precisão do ângulo de passo .....	65
3.5.6	Modos de operação.....	65
3.5.6.1	Operação a Passo pleno .....	65
3.5.6.2	Operação a Meio-passo .....	66
3.5.6.3	Operação a Micro-passo .....	66
3.6	Controlador Lógico Programável .....	67
3.6.1	Características Gerais .....	67
3.6.2	Características de Hardware e Software.....	70
3.6.3	Linguagem de Programação .....	71
3.6.4	Conceitos Básicos da Programação em Ladder.....	74

3.6.4.1	Instrução END .....	74
3.6.4.2	Corrente Lógica Fictícia .....	74
3.6.4.3	Implementação da Lógica de Controle .....	75
3.6.4.4	Tipos de Dados .....	80
3.6.4.5	Características Gerais do Visilogic .....	80
3.6.4.6	Estrutura do Aplicativo em Visilogic .....	81
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	83
4.1	Laboratório de Campo .....	83
4.2	Descrição do Sistema Experimental .....	84
4.2.1	Características do Sistema Fotovoltaico .....	86
4.2.2	Características do Sistema de Posicionamento .....	87
4.2.3	Descrição dos sensores .....	87
4.2.3.1	Medida de Tensão Elétrica .....	88
4.2.3.2	Medida de Corrente Elétrica .....	88
4.2.3.3	Medida de Temperatura .....	88
4.2.3.4	Medida de Radiação Solar .....	88
4.2.4	Descrição do dispositivo de coleta de dados .....	89
4.2.4.1	Configuração do <i>Hardware</i> do CLP .....	89
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	92
5.1	Laboratório de Campo .....	93
5.2	Projeto e Construção dos Suportes Mecânicos .....	94
5.3	Testes Funcionais e Escolha dos Motores de Passo .....	96
5.4	Projeto e Teste do Circuito de Acionamento dos Motores .....	99
5.5	Desenvolvimento do Sistema de Controle e Monitoramento .....	103
5.5.1	Programação do CLP – Rotinas de Cálculos .....	104
5.5.2	Programação do CLP – Rotinas de Movimento dos Motores .....	105
5.5.3	Sistema de Aquisição de Dados .....	107
5.6	Testes em Campo e Calibração do Sistema .....	111
5.7	Coleta dos Dados Experimentais .....	112
5.8	Análise da Viabilidade Econômica .....	135

6	CONCLUSÕES .....	137
7	Referências Bibliográficas .....	141
8	Apêndice.....	151
8.1	Script do MatLab para coleta de dados e cálculo da energia gerada.....	151

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama ilustrativo da divergência de energia do Sol à Terra.....	12
Figura 2 – Curva padrão da Irradiância Espectral Solar Extraterrestre.....	14
Figura 3 – Exemplo de um gráfico com a escala de comprimento de onda distorcida .....	15
Figura 4 – Efeito Cosseno sobre o conceito de Irradiância Extraterrestre .....	16
Figura 5 – Variação da distância Terra-Sol ao longo do ano .....	22
Figura 6 – Plano Elíptico de Órbita da Terra em torno do Sol (adaptado de Iqbal, 1983).....	22
Figura 7 – Ângulo Horário .....	26
Figura 8 – Variação do Ângulo Horário durante um dia.....	26
Figura 9 – Gráfico correspondente à Equação do Tempo .....	28
Figura 10 – Ilustração definindo o Ângulo de Declinação.....	30
Figura 11 – Variação Anual do Ângulo de Declinação.....	32
Figura 12 – Capacidade Mundial Instalada de Sistemas Fotovoltaicos (fonte: EPIA, 2008) ...	34
Figura 13 – Estrutura da célula solar de silício em corte (fonte: EPIA, 2008, adaptado) .....	35
Figura 14 – Esquema de ligação do diodo de passagem para célula solar ou grupo de células	40
Figura 15 – Esquema de ligação do diodo de bloqueio (fonte: CRESESB, 1999).....	41
Figura 16 – Curva característica I x V típica de uma célula fotovoltaica de silício.....	42
Figura 17 – Curvas I x V de um painel fotovoltaico de silício.....	43
Figura 18 – Curva típica Potência X Tensão para uma célula de silício monocristalino .....	43
Figura 19 – Parâmetros de potência máxima (adaptado de: CRESESB, 1999) .....	44
Figura 20 – Configuração Básica de um Sistema Fotovoltaico Isolado.....	46
Figura 21 – Sistema Fotovoltaico de Geração de Energia Elétrica .....	47
Figura 22 – Diagrama cinemático do Sistema de Rastreamento .....	53
Figura 23 – Esquema de Ligação e Corte Transversal – Motor de Relutância Chaveado .....	56
Figura 24 – Secção transversal de um motor de passo híbrido .....	57
Figura 25 – Diagrama de ligação e Secção Transversal de um Motor de Passo Unipolar .....	58
Figura 26 – Diagrama de ligação e Secção Transversal de um Motor de Passo Bipolar .....	59
Figura 27 – Diagrama de ligação e Secção Transversal de um Motor de Passo Bifilar .....	60
Figura 28 – Curvas características do conjugado em função da velocidade .....	62

Figura 29 – Frequência de partida em função da inércia da carga .....	63
Figura 30 – Característica do conjugado em função do deslocamento angular do rotor.....	64
Figura 31 – Exemplos de representação de instruções no Ladder.....	72
Figura 32 – Esquema conceitual de um sistema CLP .....	72
Figura 33 – Colunas e Linhas utilizadas na programação em Ladder.....	73
Figura 34 – Escada com a instrução END ao final do ciclo de execução .....	74
Figura 35 – Escada com a ilustração da Corrente Lógica Fictícia .....	75
Figura 36 – Acionamento de múltiplas saídas a partir da mesma entrada .....	76
Figura 37 – Acionamento de múltiplas saídas a partir de derivações da entrada.....	76
Figura 38 – Lógica de Controle com 2 elementos após a derivação .....	77
Figura 39 – Lógica de Controle alternativa a 2 elementos após a derivação .....	78
Figura 40 – Contatos NA ou NF referenciados ao mesmo ponto de entrada .....	79
Figura 41 – Exemplo de tela do Editor Ladder do Visilogic.....	81
Figura 42 – Diagrama explicativo de um ciclo completo de <i>Scan</i> no Ladder.....	82
Figura 43 – Desenho do Laboratório Experimental (vista superior).....	84
Figura 44 – Diagrama completo do sistema experimental desenvolvido.....	85
Figura 45 – Características do CLP utilizado.....	90
Figura 46 – Aspecto externo da CPU Vision 230 da Unitronics.....	90
Figura 47 – Conjunto de módulos de expansão do CLP .....	91
Figura 48 – Vista externa do Laboratório de Campo .....	93
Figura 49 – Armários de aço e Painéis Fotovoltaicos instalados em campo.....	94
Figura 50 – Detalhe do suporte mecânico de sustentação do Painel Fixo.....	95
Figura 51 – Detalhe do suporte mecânico de sustentação do Painel Móvel.....	96
Figura 52 – Foto do conjunto motor de passo + redutor – eixo inclinação .....	98
Figura 53 – Foto do conjunto motor de passo + redutor – eixo azimute.....	98
Figura 54 – Montagem para testes do Circuito <i>Driver</i> usando o CI A3982.....	100
Figura 55 – Esquema elétrico do circuito de acionamento e controle dos motores de passo..	102
Figura 56 – Placa do circuito de acionamento e controle dos motores de passo.....	103
Figura 57 – Diagrama em Blocos representando as Rotinas de Cálculos .....	104
Figura 58 – Diagrama em Blocos representando as Rotinas de Movimentação .....	105
Figura 59 – Circuito da Placa de Condicionamento e Conversão de Sinais.....	107

Figura 60 – Foto da placa de condicionamento e conversão dos sinais dos sensores .....	108
Figura 61 – Detalhe do sensor de temperatura sobre a superfície do painel fotovoltaico .....	109
Figura 62 – Detalhe do sensor de radiação instalado no plano do painel fotovoltaico .....	110
Figura 63 – Detalhe do sensor de radiação instalado em plano horizontal .....	110
Figura 64 – Detalhe da vareta indicadora do correto posicionamento .....	111
Figura 65 – Transferidor para calibração do Ângulo Horário .....	112
Figura 66 – Potência instantânea dos Painéis Fotovoltaicos – 26/06/2008 .....	116
Figura 67 – Insolação incidente nos Painéis Fotovoltaicos – 26/06/2008 .....	117
Figura 68 – Relação entre Potência Gerada e Temperatura do Módulo – 26/06/08 .....	118
Figura 69 – Relação entre Potência Gerada e Irradiância sobre o Módulo – 26/06/08 .....	119
Figura 70 – Potência instantânea dos Painéis Fotovoltaicos – 03/03/2008 .....	122
Figura 71 – Insolação incidente nos Painéis Fotovoltaicos – 03/03/2008 .....	124
Figura 72 – Relação entre Potência Gerada e Temperatura do Módulo – 03/03/08 .....	124
Figura 73 – Relação entre Potência Gerada e Irradiância sobre o Módulo – 03/03/08 .....	125
Figura 74 – Potência instantânea dos Painéis Fotovoltaicos – 08/04/2008 .....	126
Figura 75 – Insolação incidente nos Painéis Fotovoltaicos – 08/04/2008 .....	126
Figura 76 – Temperaturas dos Painéis Fotovoltaicos e Ambiente – 08/04/2008 .....	127
Figura 77 – Potência instantânea dos Painéis Fotovoltaicos – 06/05/2008 .....	128
Figura 78 – Insolação incidente nos Painéis Fotovoltaicos – 06/05/2008 .....	129
Figura 79 – Dados médios de geração de energia e ganho do sistema móvel .....	130
Figura 80 – Trem de pulsos aplicado ao motor de passo para movimento de 1° .....	132
Figura 81 – Tensão medida no resistor em série com o conjunto CLP + expansões .....	133

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Valor da Constante Solar em Diferentes Unidades (fonte: Stine e Geyer, 2001)....	13
Tabela 2 – Coeficientes da Equação 8 (fonte: Stine e Geyer, 2001).....	29
Tabela 3 – Eficiências de Módulos e Células Fotovoltaicas (fonte: EPIA, 2008) .....	38
Tabela 4 – Relação entre Nível Lógico de Entrada e condição do Elemento de Controle.....	79
Tabela 5 – Grandezas elétricas, intervalos de 20 min., 7h às 17h, dia 26/06/2008.....	114
Tabela 6 – Demais grandezas, intervalos de 20 min., 7h às 17h, dia 26/06/2008.....	115
Tabela 7 – Grandezas elétricas, intervalos de 20 min., 7h às 17h, dia 03/03/2008.....	120
Tabela 8 – Demais grandezas, intervalos de 20 min., 7h às 17h, dia 03/03/2008.....	121
Tabela 9 – Dados médios de geração de energia elétrica por ambos os painéis .....	130
Tabela 10 – Custo do Sistema Fotovoltaico Móvel (atualizado em Novembro de 2008).....	135
Tabela 11 – Custo do Sistema Fotovoltaico Fixo (atualizado em Novembro de 2008).....	136

**LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação (1) – Irradiância Solar Extraterrestre .....	16
Equação (2) – Irradiância Solar Extraterrestre em Superfície Paralela ao Solo .....	17
Equação (3) – Radiação Solar Extraterrestre em Superfície Horizontal .....	18
Equação (4) – Cálculo da Massa de Ar .....	21
Equação (5) – Cálculo do Ângulo Horário .....	27
Equação (6) – Equação do Tempo Simplificada .....	27
Equação (7) – Expressão para cálculo do Ângulo referente ao Número do Dia no Ano .....	27
Equação (8) – Equação do Tempo com Maior Precisão .....	28
Equação (9) – Equação para Cálculo da Hora Local .....	29
Equação (10) – Equação para Correção da Longitude Local .....	29
Equação (11) – Equação para Cálculo do Ângulo de Declinação .....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

<u>Referência</u>	<u>Descrição</u>	<u>Unidade</u>
$\delta$	Ângulo de Declinação	graus
$\phi$	Ângulo de Latitude	graus
$\theta_z$	Ângulo de Zênite Solar	graus
$\omega$	Ângulo Horário (ou Ângulo de Azimute)	graus
$\lambda$	Comprimento de Onda	$\mu\text{m}$
CPT	Condições Padrão de Teste	–
$I_{SC}$	Constante Solar (valor = 1367)	$\text{W.m}^{-2}$
CLP	Controlador Lógico Programável	–
$I_{SCC}$	Corrente de Curto Circuito ( <i>Short Circuit Current</i> )	A
$I_{MP}$	Corrente de Potência Máxima	A
EOT	Equação do Tempo ( <i>Equation Of Time</i> )	min
LCT	Hora do Relógio Local ( <i>Local Clock Time</i> )	h
$t_s$	Hora Solar	h
DST	Horário de Verão ( <i>Daylight Savings Time</i> )	h
$I_o$	Irradiância Solar Extraterrestre	$\text{W.m}^{-2}$
$I_{o,h}$	Irradiância Solar Extraterrestre sobre superfície horizontal	$\text{W.m}^{-2}$
N	Número do dia no ano Juliano (considerado ciclo anual)	–
n	Número do dia no ano Juliano (considerado ciclo quadrianual)	–
$P_M$	Potência Máxima do Pannel Fotovoltaico	Wp
$H$	Radiação Solar	$\text{Wh.m}^{-2}$
$H_{o,h}$	Radiação Solar Extraterrestre sobre superfície horizontal	$\text{Wh.m}^{-2}$
STC	<i>Standard Test Conditions</i> (equivalente a CPT)	–
$V_{OC}$	Tensão de Circuito Aberto ( <i>Open Circuit Voltage</i> )	V
$V_{MP}$	Tensão de Potência Máxima	V
UA	Unidade Astronômica (valor médio = $1,496 \times 10^{11}$ )	m

## 1 RESUMO

A necessidade de oferecer alternativas para energização de propriedades rurais de pequeno porte com eficiência, confiabilidade e custo acessível, motivou a realização desta pesquisa, cujo enfoque principal foram os sistemas fotovoltaicos e a busca por um melhor desempenho destes sistemas a partir de estratégias de posicionamento dos painéis solares em direção ao Sol.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento experimental de um conjunto posicionador automático para módulos fotovoltaicos e a avaliação do funcionamento deste conjunto considerando-se o aumento na geração de energia elétrica em função da complexidade de implementação e do consumo de energia pelo próprio sistema de movimentação, além de seus custos de implantação.

Foi projetado e implementado um dispositivo eletromecânico simplificado, capaz de sustentar e movimentar um módulo fotovoltaico ao longo do dia e ao longo do ano, sempre mantendo sua superfície direcionada em posição perpendicular aos raios solares incidentes. Utilizaram-se motores de passo, controlador lógico programável e componentes de baixo custo, que resultaram em um conjunto de manutenção simplificada,

sem uso de sensores e com otimização dos movimentos, devido ao ajuste de inclinação do painel ser realizado somente uma vez ao dia.

A avaliação do ganho na geração de energia elétrica baseou-se na coleta dos dados elétricos (tensão e corrente) e ambientais (insolação e temperatura) de dois sistemas fotovoltaicos com as mesmas características, instalados lado a lado, sujeitos às mesmas condições de insolação, temperatura e carga elétrica, sendo um fixo e outro móvel.

A partir dos resultados obtidos concluiu-se pela viabilidade da proposta, não apenas pelo êxito no aumento da geração de energia, mas também pela boa relação custo/benefício, indicando que o sistema posicionador desenvolvido mostra-se vantajoso nestes aspectos e abre uma interessante perspectiva de aproveitamento mais eficiente da energia solar para geração de energia elétrica em localidades não atendidas pela rede de distribuição convencional, como é o caso de propriedades em regiões isoladas ou de difícil acesso.

Os resultados sugerem ainda novas frentes de pesquisa na área, haja vista a possibilidade de otimização do programa com a utilização de técnicas de lógica nebulosa, simplificação do *hardware* empregado e aperfeiçoamento do sistema mecânico de sustentação dos painéis com uso de estruturas mais leves e motores de menor potência.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC POSITIONING SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PANELS. Botucatu, 2008, 152p.

Thesis (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.

Author: ALCEU FERREIRA ALVES

Adviser: JOSÉ ANGELO CAGNON

## SUMMARY

The need to offer alternatives of electricity supply to the small rural properties, providing them with efficiency, reliability and accessible cost, has motivated the development of this research, whose main approach was photovoltaic systems and the search for better performance of these systems with the solar panels positioning toward the sun.

This work presents the experimental development of an automatic positioning system for photovoltaic modules and the evaluation of this system's behavior taking in account the increase in generation of electric energy as a function of the complexity of implementation and the consumption of energy by the movement system itself, and its costs of implantation also.

It was designed and built a simplified electromechanical device, which is able to support and to move a photovoltaic module along the day and along the year, always keeping its surface aimed to the sun rays. Stepper motors, programmable logic controller and low cost components were used, and these have resulted on a simplified maintenance set, with no sensors and optimization of movements, due the adjustment of panel's inclination take place only once a day.

The methodology adopted to evaluate the gain in the electricity generation was based on the acquisition of electrical data (voltage and current) and environmental data (insolation and temperature) from two photovoltaic systems whose have identical physical and electrical characteristics and were installed side by side, submitted to the same conditions of insolation, temperature and electric load. One of the solar panels was mounted on a fixed mechanical structure, and the other one on a mobile structure.

The obtained results demonstrate the feasibility of the proposed mobile system, not only because of the real increase observed in electric energy generation, but also by the excellent cost effectiveness obtained, which suggests a new perspective in how to explore the solar energy for generation of electric energy more efficiently, mainly in localities not attended by the utilities, like properties located at remote areas.

The results also suggest new horizons of research in this area, considering the possibility of improvement to the control program with the use of fuzzy logic, simplification in the hardware and a new design of the mechanical system using lighter structures and small stepper motors which spend less energy.

---

Keywords: photovoltaic system, solar positioning system, solar energy, energy efficiency

## 2 INTRODUÇÃO

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana, sendo que a eletricidade, em termos de suprimento energético, tornou-se uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, passando a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos países e regiões. Apesar dos avanços tecnológicos e benefícios proporcionados pela energia elétrica, cerca de um terço da população mundial ainda não tem acesso a esse recurso; dos dois terços restantes, uma parcela considerável é atendida de forma muito precária. No Brasil, a situação é menos crítica, mas ainda muito preocupante. Apesar da grande extensão territorial do país e da abundância de recursos energéticos, há uma grande diversidade regional e uma forte concentração de pessoas e atividades econômicas em regiões com problemas de suprimento energético (ANEEL, 2005).

Dados do ano de 1999 disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e publicados pela Agência Nacional de Energia Elétrica, informavam que, apesar de mais de 81% da população brasileira viver na zona urbana, cerca de 13,5 milhões de habitantes do território nacional ainda não tinham acesso à energia elétrica,

sendo que esta população localizava-se predominantemente em áreas rurais (ANEEL, 2005; NASCIMENTO, 2000).

A eletrificação rural no Brasil é, essencialmente, uma questão de natureza social que só pode ser resolvida a médio e longo prazos, desde que amparada por políticas específicas de fomento e mecanismos de regulação, que devem efetivamente integrar o conjunto de ações esboçadas no novo cenário energético brasileiro para a democratização do acesso à energia elétrica.

Em 2004 o Governo Federal iniciou o “Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Luz para Todos”, com o objetivo de levar energia elétrica para a população do meio rural, após constatar que 80% das famílias sem acesso à energia elétrica residiam nestas áreas. A meta inicial era, em cinco anos, levar a eletricidade para 2 milhões de famílias, beneficiando 10 milhões de pessoas.

Até julho de 2008 haviam sido atendidas 8,2 milhões de pessoas e o programa foi ampliado em mais 2 anos, até 2010, com a previsão de atendimento de mais 5 milhões de pessoas. A maior parte das ligações que ocorreram até este momento foi de extensão de rede, utilizando 569 mil transformadores, 3,7 milhões de postes e 709 mil km de cabos (MME, 2008).

Programas específicos com enfoque nas fontes alternativas de energia causaram um impacto inicial na utilização dos sistemas fotovoltaicos isolados no Brasil, com números ainda incipientes. Exemplo destes foi o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), do Ministério de Minas e Energia (agora incorporado ao programa Luz para Todos), com quase 9.000 sistemas fotovoltaicos de potência média de 535 W para escolas, postos de saúde, igrejas, centros comunitários, bombeamento d’ água, etc.

O PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia) contemplou inicialmente a geração de energia elétrica a partir das fontes biomassa, eólica e PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas). Algumas destas fontes, como o bagaço de cana e PCH, já atingiram o estágio de competição com outras fontes convencionais, enquanto outras, como a eólica, dependem de programas de incentivos mais específicos, que promovam sua integração competitiva na matriz energética nacional. Com respeito à energia solar, que não foi contemplada na primeira fase do programa, as tecnologias do aproveitamento

fotovoltaico apresentam elevado potencial em nosso país, merecendo atenção na definição de novas etapas deste programa de incentivo (MME, 2007).

Um fator importante na expansão do uso da tecnologia fotovoltaica para geração de eletricidade é o apelo ambiental, pois estes sistemas têm como característica a não modificação do equilíbrio térmico da Terra. Os equipamentos solares utilizam parte da irradiação disponível como calor ou como eletricidade úteis, antes da energia ser finalmente degradada como calor para o meio ambiente. Portanto, não há aumento ou diminuição líquida do calor. Além disso, tais sistemas são capazes de contribuir para o suprimento de energia elétrica, sem emissão de gases de efeito estufa ou de gases ácidos; não é necessária a formação de lagos para reservatórios, o desmatamento só ocorre em grandes instalações, as quais muitas vezes são construídas em áreas desérticas ou semi-áridas.

Pesquisas que buscam o aumento da eficiência nos sistemas fotovoltaicos têm sido desenvolvidas e enfocam diferentes alternativas para alcançar este objetivo. As variadas tecnologias de construção das células fotovoltaicas têm resultado em melhor eficiência na conversão de energia solar em elétrica.

As células de silício monocristalinas e policristalinas possuem a tecnologia mais difundida, maior volume de produção industrial e, por conseqüência, menores custos. Solarbuzz Inc. (2001) informa que as células cristalinas representam 93% do mercado mundial, atribuídos principalmente à sua relação custo/benefício.

Diversas outras formas de construção de células fotovoltaicas têm sido pesquisadas nas últimas décadas, sempre com o objetivo maior de reduzir custos e aumentar a eficiência e dentre estas se destacam os materiais de filmes finos construídos com Silício amorfo (a-Si), Cobre-Índio-Selênio (filmes CIS) e Cádmio-Telúrio (filmes Cd-Te).

Além da possibilidade de aumentar-se a eficiência dos sistemas fotovoltaicos com o desenvolvimento de novos materiais para as células, soluções mais simples enfocando os demais componentes do sistema podem ser adotadas, resultando em ganhos significativos na conversão de energia.

Um enfoque bastante interessante, adotado em muitos sistemas comercialmente disponíveis, é o uso de algoritmos de controle do tipo MPPT (Maximum Power Point Tracking), no qual extrai-se sempre a maior potência elétrica instantânea do painel solar, independente da condição de operação, ou seja, ajusta-se a carga que é conectada

de modo a obter-se a máxima potência, através do uso de um conversor eletrônico de potência de alta eficiência (PIAO, 2005).

O uso de posicionadores automáticos para os painéis solares e/ou concentradores solares configuram-se também em alternativas para oferecer uma maior quantidade de energia solar ao painel, permitindo deste modo, uma maior geração de potência elétrica. Resultados apresentados por diversos pesquisadores demonstram a viabilidade de tais sistemas, levando a aumentos de eficiência de até 40% na conversão de energia sem o uso de concentradores, e de até 60% utilizando concentradores solares.

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico móvel que aumente o aproveitamento da energia solar. Para alcançar este objetivo, será utilizada uma alternativa simplificada, que é o posicionamento em malha aberta dos painéis fotovoltaicos, acompanhando a trajetória aparente do Sol através das equações de movimento da Terra em relação ao Sol, e dispensando outras soluções mais complexas como o desenvolvimento de novos materiais ou o uso de concentradores.

Este sistema de posicionamento dispensa o uso de sensores de rastreamento, evitando movimentos desnecessários no caso de ocorrência de sombras ou nuvens, resultando em economia de energia na movimentação, além de inovar ao propor uma estratégia de movimentação em dois eixos na qual apenas um motor é acionado continuamente ao longo do dia, enquanto o segundo motor movimenta-se apenas uma vez no início do dia.

Para avaliação do melhor aproveitamento da energia solar pelo sistema móvel proposto, será realizada uma comparação entre o sistema desenvolvido e outro sistema idêntico, sujeito às mesmas condições de operação, porém fixo.

Por fim, discute-se a viabilidade de implantação do sistema proposto a partir de seus custos, verificando se o ganho na geração de energia elétrica com a movimentação dos painéis é realmente compensador.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Energia Solar**

O Sol, a principal fonte de energia da Terra, do qual derivam todas as demais formas de energia necessárias à vida, situa-se no centro do sistema solar e emite energia na forma de radiação eletromagnética a uma taxa altíssima e de maneira praticamente ininterrupta. Para se ter uma idéia da dimensão da energia liberada pelo Sol, pode-se dizer que esta é equivalente à energia liberada por um forno trabalhando a uma temperatura aproximada de 6.000°K.

Segundo Stine e Geyer (2001), se fosse possível coletar a energia emitida correspondente a 10 hectares da superfície solar, toda a demanda energética atual da Terra estaria suprida; entretanto, existem três principais razões pelas quais isto não pode ser feito.

Primeiramente, pelo fato da Terra guardar uma certa distância do Sol, a energia emitida pelo Sol espalha-se como espalha-se a luz de uma vela, e apenas uma pequena fração da energia emitida por determinada área da superfície solar atinge área equivalente da superfície da Terra.

Em segundo lugar, pelo fato da Terra rotacionar sobre seu eixo polar, qualquer dispositivo de coleta colocado sobre a superfície terrestre receberá a energia radiante emitida pelo Sol apenas durante a metade de cada dia.

O terceiro fator e também menos previsível diz respeito às condições da atmosfera que envolve a Terra e que interfere diretamente na quantidade de energia que pode atingir a sua superfície. Em situações bastante favoráveis, a redução da energia incidente na superfície é da ordem de 30%; entretanto, condições desfavoráveis podem levar a situações de diversos dias seguidos com uma quantidade mínima de energia solar atingindo a superfície da Terra.

A quantidade de energia solar que atinge a Terra é chamada de insolação (ou Irradiância Solar) e sua unidade usual é Watts por metro quadrado ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). A insolação é, na realidade, uma medida da potência instantânea que atinge uma determinada área na Terra, e esta potência pode variar ao longo do tempo. Seu valor máximo é usado no projeto de sistemas solares para determinação da taxa máxima de entrada de energia no sistema; caso o sistema inclua armazenamento de energia, necessita-se saber a variação da insolação com o tempo de modo a otimizar-se o projeto do sistema de coleta e armazenamento.

Outro parâmetro necessário para projeto e dimensionamento de sistemas de captação da energia solar é conhecido como radiação solar ou irradiação. Este parâmetro indica a quantidade de energia que chega ao dispositivo de coleta durante um período de tempo, que pode ser hora, dia, semana, mês, etc. Na verdade, a medida de radiação solar é feita a partir da integração (ou soma) dos dados de insolação durante um intervalo de tempo. A unidade de medida para radiação solar é Joule por metro quadrado ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ ), ou usualmente, Watt-hora por metro quadrado ( $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Nos tópicos apresentados a seguir serão discutidos alguns aspectos relevantes da radiação solar necessários ao perfeito entendimento de como funcionam os sistemas que utilizam a energia solar para produção de eletricidade ou outras formas de energia.

### 3.1.1 As Características do Sol

Segundo a classificação dos astrônomos, o Sol é uma estrela de brilho e grandeza médios, de idade média ( $4,5 \times 10^9$  anos), com temperatura aparente de superfície da ordem de  $6.000^\circ\text{K}$ . No centro do Sol presume-se que haja núcleos de hidrogênio combinando-se para formação de núcleos de hélio em um processo de fusão termonuclear, no qual a energia associada é liberada para o corpo do Sol.

A maior parte da radiação eletromagnética que chega à Terra emana de uma concha externa esférica composta de gases densos e aquecidos chamada de Fotosfera; é a imagem da Fotosfera que é vista quando observa-se a imagem do Sol a partir da Terra. Esta região tem um diâmetro aproximado de  $1,39 \times 10^9$  m e aparenta ser um disco brilhante, com maior intensidade de brilho ao centro e menos brilho nas extremidades, visto que a radiação que chega à Terra vem das camadas mais externas (e portanto, menos quentes) do gás.

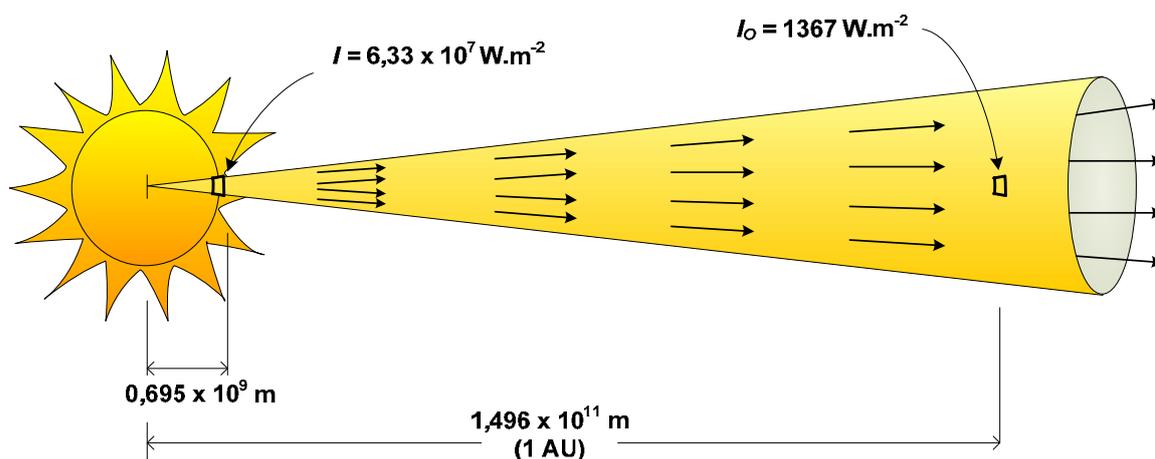
Observações do movimento das manchas solares indicam que o Sol não gira uniformemente. A região próxima ao seu equador rotaciona com um período aproximado de 27 dias, enquanto que as regiões polares rotacionam mais lentamente, com um período aproximado de 32 dias.

Além da Fotosfera estão a Cromosfera e a Corona. Estas regiões são caracterizadas por gases de baixa densidade, temperaturas mais elevadas, e variações temporais na energia e diâmetro. Devido à baixa densidade, e conseqüentemente, mínima emissão de energia a partir destas regiões, elas são de pouca importância quando se tratam das aplicações da energia solar na Terra. Elas produzem, entretanto, variações cíclicas e uniformes nas componentes de raio-X e ultravioleta do espectro solar, com períodos aproximados de onze anos, coincidentes com os ciclos das manchas solares.

### 3.1.2 A Constante Solar

A intensidade da radiação na superfície do Sol é aproximadamente  $6,33 \times 10^7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  e é liberada a uma taxa relativamente constante. Considerando-se que a radiação espalha-se com o quadrado da distância, ao percorrer a distância aproximada de  $1,496 \times 10^{11}$  m (ou 1 UA – Unidade Astronômica) que separam o Sol da Terra, a energia

radiante que chega a um metro quadrado da superfície terrestre é reduzida ao valor de  $1367 \text{ W}$  (IQBAL, 1983), conforme ilustra a Figura 1.



**Figura 1 – Diagrama ilustrativo da divergência de energia do Sol à Terra (adaptado de: Stine e Geyer, 2001)**

Este valor ( $1367 \text{ W.m}^{-2}$ ), aceito internacionalmente pela comunidade astronômica, é conhecido como Constante Solar e pode receber diferentes valores, dependendo da unidade de medida utilizada.

Outros valores para a Constante Solar são encontrados na literatura histórica, mas sempre com variações pequenas (da ordem de  $\pm 0,25\%$ ), geralmente atribuídas a diferenças de calibração dos equipamentos utilizados ou variações máximas da ordem de  $1\%$  considerando-se o intervalo cíclico de 11 anos para as manchas solares. Embora nenhuma destas variações represente algo significativo para os projetos de sistemas de energia solar, os estudos nesta área prosseguem com o objetivo de melhor explicar o impacto destas variações no clima do planeta Terra.

Alguns exemplos são apresentados na Tabela 1 – Valor da Constante Solar em Diferentes Unidades.

**Tabela 1 – Valor da Constante Solar em Diferentes Unidades (fonte: Stine e Geyer, 2001)**

<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
I <sub>SC</sub>	1367	W.m <sup>-2</sup>
I <sub>SC</sub>	136,7	mW.cm <sup>-2</sup>
I <sub>SC</sub>	0,1367	W.cm <sup>-2</sup>
I <sub>SC</sub>	1,367 x 10 <sup>6</sup>	erg.cm <sup>-2</sup> s
I <sub>SC</sub>	127,0	W.ft <sup>-2</sup>
I <sub>SC</sub>	0,03267	cal.cm <sup>-2</sup> s
I <sub>SC</sub>	433,4	Btu.ft <sup>-2</sup> h

Estima-se que uma queda de apenas 1% na radiação emitida pelo Sol diminuiria a temperatura média global da Terra em valor ligeiramente superior a 1°C, sendo que uma diminuição em 6% na radiação emitida seria suficiente para cobrir a superfície terrestre com gelo.

O tamanho angular aparente do disco solar pode ser calculado a partir do diâmetro da Fotosfera e da distância Terra-Sol, sendo que a 1 UA este ângulo corresponde a 9,3 mrad ou 0,553 graus. Considerando-se que a distância Terra-Sol varia ao longo do ano, o tamanho aparente do Sol varia por volta de 1,7% neste período.

### **3.1.3 O Espectro Solar Extraterrestre**

Analisando-se o espectro da radiação do Sol imediatamente antes deste atingir a atmosfera terrestre (Figura 2), observa-se que a distribuição espectral das componentes desta radiação é bastante parecida com aquela correspondente a um corpo negro a uma temperatura de 6.050°K e à distância de 1 UA.

Nesta análise espectral conclui-se que aproximadamente 45% da energia do Sol chega à Terra com comprimentos de onda dentro do espectro da luz visível, nominalmente entre 0,3µm e 0,7µm. Além disso, observa-se que apenas um pouco mais de 1%

da energia do Sol situa-se nos comprimentos de onda inferiores (radiação ultravioleta e raios-X), e o restante, aproximadamente 54%, situa-se na região da radiação infravermelha.

O espectro da radiação solar altera-se ligeiramente após atravessar a atmosfera terrestre; o conhecimento da quantidade relativa de energia contida na luz solar de diferentes comprimentos de onda permite que se avalie o impacto deste fenômeno ao desenvolverem-se dispositivos para a coleta da energia solar.

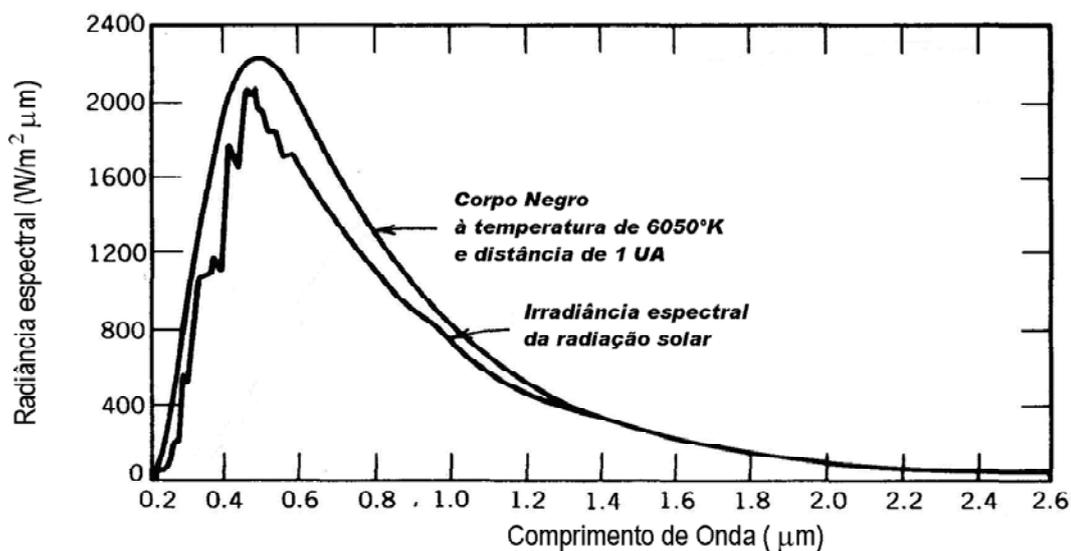
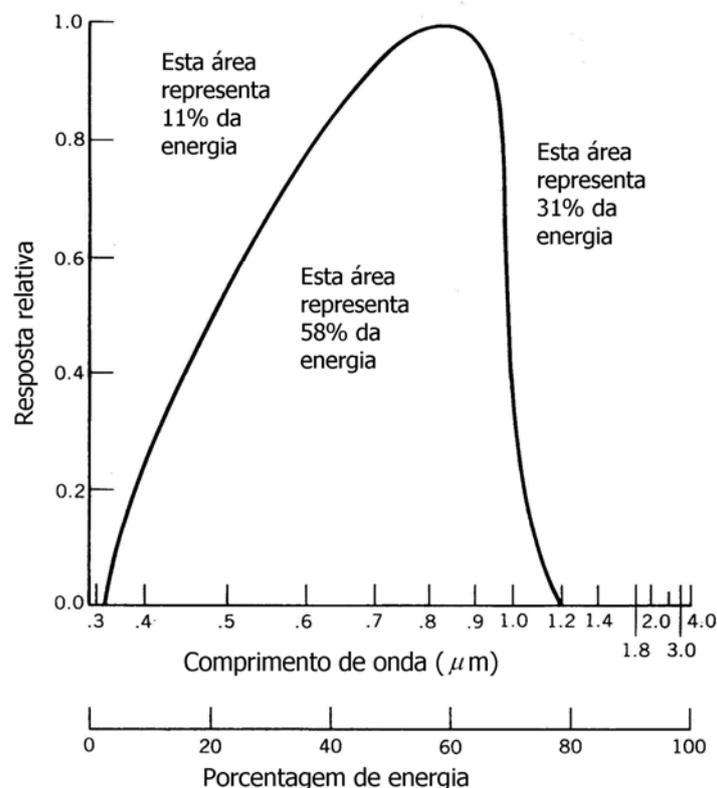


Figura 2 – Curva padrão da Irradiância Espectral Solar Extraterrestre (adaptado de: Stine e Geyer, 2001)

Para consideração dos parâmetros dependentes do comprimento de onda (por exemplo: transmitância do vidro, absorção da superfície, ou resposta da foto-célula) é visualmente útil traçarem-se estes parâmetros versus uma escala representando a porcentagem de energia contida na luz solar e também na energia contida nas ondas de comprimentos menores. A área sob a curva assim traçada representa a porcentagem total de energia integrada sobre todos os comprimentos de onda. Uma segunda escala horizontal, não-linear, pode ser incluída, na base da relação entre energia solar e comprimento de onda, conforme mostrado na Figura 3. Isto é feito para que os parâmetros dependentes do comprimento de onda possam ser apresentados de uma forma visualmente mais clara.



**Figura 3 – Exemplo de um gráfico com a escala de comprimento de onda distorcida (adaptado de: Stine e Geyer, 2001)**

No gráfico-exemplo da Figura 3 apresenta-se a resposta espectral relativa de uma célula fotovoltaica de silício. Pelos dados apresentados, verifica-se que a célula responde a somente 58% da energia solar incidente sobre sua superfície (tem capacidade de utilizar esta parcela da energia que recebe), sendo que uma parcela de 11% correspondente às ondas de comprimentos inferiores e outra parcela de 31% correspondente às ondas de comprimentos maiores são perdidas.

### 3.1.4 Irradiância Solar Extraterrestre

Devido à órbita da Terra ser ligeiramente elíptica, a intensidade da radiação solar recebida fora da atmosfera terrestre varia com o quadrado da distância Terra-Sol. A irradiância solar varia +/- 3,4%, sendo que a máxima irradiância ocorre no Periélio, ou seja, quanto a Terra está mais próxima do Sol (por volta dos dias 3 a 5 de janeiro) e a mínima

irradiância ocorre no Afélio (por volta do dia 5 de julho, quando a Terra está mais distante do Sol). Esta variação pode ser aproximada através da Equação (1):

$$I_o = I_{sc} \left[ 1 + 0,034 \cos \left( \frac{360N}{365,25} \right) \right] \quad (W.m^{-2}) \quad (1)$$

na qual,  $I_o$  é a Irradiância Solar Extraterrestre imediatamente acima da atmosfera da Terra e  $N$  é o número do dia no ano Juliano (iniciando em 1º de Janeiro).

Um conceito educativo largamente utilizado em modelos de Irradiância Solar é o da insolação (irradiância) que “cai sobre uma superfície horizontal”. Considera-se uma superfície plana imediatamente acima da atmosfera terrestre e paralela à superfície da Terra; quando esta superfície “vê”o Sol (coloca-se em posição normal a um raio central), a irradiância solar caindo sobre o mesmo será a máxima possível.

Se a superfície não estiver normal ao Sol, a insolação que “cai” sobre a mesma será reduzida pelo cosseno do ângulo entre a superfície normal e um raio central que parte do Sol. Este conceito está apresentado graficamente na Figura 4.

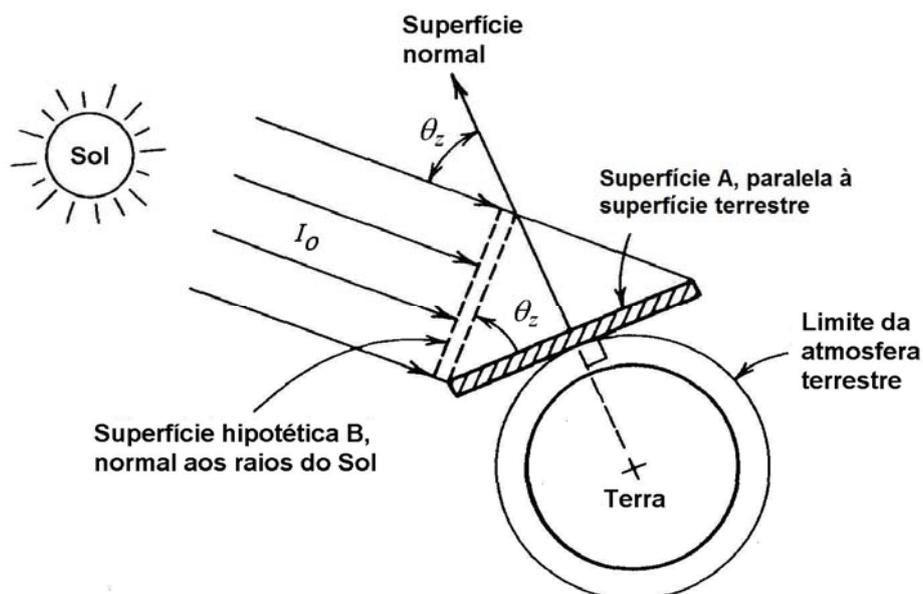


Figura 4 – Efeito Cosseno sobre o conceito de Irradiância Extraterrestre (fonte: Stine e Geyer, 2001)

Pode-se notar que a potência solar instantânea que atinge ambas as superfícies é a mesma. Entretanto, a área da superfície ‘A’ é maior do que a sua projeção (a superfície hipotética ‘B’), fazendo com que a quantidade de energia solar por unidade de área (ou seja, a Irradiância Solar) que atinge a superfície ‘A’ seja menor do que na superfície ‘B’.

Partindo-se então do conceito do efeito cosseno sobre a Irradiância Solar Extraterrestre, pode-se calcular a Irradiância Solar Extraterrestre que atinge uma superfície paralela ao solo utilizando-se a Equação (2):

$$I_{o,h} = I_o * \cos(\theta_z) \quad (W.m^{-2}) \quad (2)$$

onde  $I_{o,h}$  é a Irradiância Solar Extraterrestre em uma superfície horizontal (paralela ao solo) e  $\theta_z$  é o ângulo entre as duas superfícies (quando a superfície A estiver em posição normal aos raios solares,  $\theta_z = 0$  e  $I_{o,h} = I_o$ ). O ângulo  $\theta_z$  é conhecido como Ângulo de Zênite Solar.

A redução da radiação pelo cosseno do ângulo formado pelos raios solares e a reta normal à superfície da Terra é conhecida como “Efeito Cosseno” e tem fundamental importância para o perfeito posicionamento dos coletores solares.

Devido ao efeito cosseno, a Irradiância Solar Extraterrestre sobre um plano horizontal varia ciclicamente conforme a Terra rotaciona sobre seu eixo. A quantidade de radiação solar recebida sobre uma superfície horizontal fora da atmosfera determina um limite superior para a quantidade de radiação solar que chegará a uma superfície horizontal abaixo da atmosfera terrestre. Este comportamento também reflete o efeito cosseno, sem levar-se em consideração os efeitos da cobertura da massa de ar e de nuvens.

### 3.1.5 Radiação Solar Extraterrestre sobre uma Superfície

A quantidade total de energia depositada sobre uma superfície durante um período de tempo pode ser calculada integrando-se (ou somando-se) a Irradiância Solar durante este período. Esta soma é chamada de Radiação Solar e tem unidade de energia por unidade de área ( $J.m^{-2}$  ou  $Btu.ft^{-2}$ ).

O valor da radiação solar diária que atinge uma superfície horizontal ( $H_{o,h}$ ), acima da atmosfera terrestre, pode ser calculado a partir dos valores instantâneos da Irradiância Solar Extraterrestre, utilizando-se a Equação (3):

$$H_{o,h} = \int_{t_1}^{t_2} I_{o,h} dt \quad (3)$$

na qual os limites de integração  $t_1$  e  $t_2$  representam, respectivamente, os horários do nascer e do pôr do Sol.

Com o uso de valores conhecidos para os ângulos Terra-Sol, podem ser feitos os cálculos da Radiação Solar Extraterrestre incidente sobre uma superfície horizontal em localidades de diferentes latitudes durante um ano, e os resultados permitem aferir conclusões importantes sobre a entrega de energia pelo Sol à Terra neste período.

As maiores quantidades de energia incidente em um único dia ocorrem nas latitudes maiores (pontos mais distantes do Equador); estes elevados valores de radiação que atingem a Terra ocorrem durante o verão, quando o Sol nunca se põe.

Para latitude zero (sobre a linha do Equador), a maior radiação solar ocorre nos equinócios de outono e primavera, e não no verão, como seria de se esperar. Valores máximos durante o verão somente ocorrem em latitudes superiores a  $23,5^\circ$ .

Integrando-se os valores diários de radiação ao longo do ano, encontram-se resultados maiores para o Equador e menores para os pólos, os quais perdem boa parte da energia disponível devido ao efeito cosseno, anteriormente discutido.

Supondo-se uma superfície que não esteja em posição horizontal (paralela ao solo), mas em posição sempre perpendicular à direção dos raios solares incidentes, e ainda considerando-se que esteja acima da atmosfera terrestre, a radiação solar total que a atinge no período de um ano é essencialmente a mesma, independente da latitude.

Isto se deve ao fato que, em qualquer lugar da Terra ocorrem, anualmente, 4.380 horas de luz do Sol, o que resulta em uma duração média de 12h para um dia de luz solar. Assim, à exceção da ligeira diferença causada pela Irradiância Solar Extraterrestre de inverno ser aproximadamente 6% maior do que a Irradiância Solar

Extraterrestre de verão, a Irradiância Solar Extraterrestre normal totalizada em um ano é essencialmente a mesma para qualquer localidade sobre a Terra.

### 3.1.6 Características da Radiação Solar ao Nível do Solo

À medida que a radiação atravessa a atmosfera da Terra, ela é absorvida (esta é a razão para o aquecimento da atmosfera), refletida (esta é a razão pela qual os astronautas podem vê-la do espaço), dispersada (razão pela qual pode-se ler este texto sob a sombra de uma árvore) e transmitida diretamente (razão porque existem as sombras). Na superfície da Terra, o Sol apresenta menor intensidade, cor e forma diferentes daquelas verificadas acima da atmosfera.

A atmosfera provoca uma redução da entrada de energia solar extraterrestre da ordem de 30% em um dia bastante claro a aproximadamente 90% em um dia bastante nublado.

Sobre a superfície da Terra, percebe-se irradiância solar “direta” ou raios solares que vêm diretamente do disco solar, e uma irradiância solar “difusa” ou espalhada que parece vir do céu em todas as direções. Usa-se o subscrito ‘b’ para representar a componente direta da irradiância solar e o subscrito ‘d’ para indicar a componente difusa. A soma das irradiâncias solares direta e difusa resultam na chamada irradiância solar “global” ou total, a qual é tradicionalmente identificada pelo subscrito ‘t’.

Em um dia de céu claro, a irradiância solar direta representa por volta de 80% a 90% da quantidade total de energia solar atingindo a superfície da Terra. O bloqueio local da componente direta de irradiância solar produz sombras. Em um dia nublado ou com nevoeiro, no qual não se pode ver o Sol, a componente direta de irradiância solar é essencialmente zero e não existem sombras. A componente direta da irradiância solar é de grande interesse para os projetistas de sistemas de energia solar de altas temperaturas porque esta pode ser concentrada em pequenas áreas utilizando-se espelhos ou lentes, o que não é possível com a componente difusa.

A componente difusa da irradiância solar é a que permite às pessoas enxergarem na sombra. Se não houvesse esta componente, o céu apareceria negro como a noite e as estrelas seriam visíveis o dia todo. Os primeiros astronautas descreveram este

fenômeno quando o observaram a partir da Lua, onde não há atmosfera para espalhar a radiação solar.

A radiação difusa é o resultado do espalhamento da irradiância solar em direção ao solo pelo nitrogênio, oxigênio, moléculas e gotículas de água, além das partículas de poeira na atmosfera. A intensidade do espalhamento depende da quantidade de água e poeira na atmosfera e também da altitude do observador em relação ao nível do mar.

Uma vez que não é possível concentrar a irradiância solar difusa, apenas coletores solares planos (sem concentradores) e alguns tipos de concentradores de baixa temperatura (os quais têm grandes ângulos de aceitação) podem captá-la. São poucos os coletores solares usados em aplicações industriais que conseguem utilizar a componente difusa da radiação solar.

A variação destes fatores, especialmente das gotículas de água (ou seja, nuvens), por atenuarem a componente direta e modificar a componente difusa, é o principal parâmetro desconhecido no projeto de sistemas de captação de energia solar. Por este motivo, um enorme esforço foi e tem sido despendido com objetivo de medir, catalogar e desenvolver modelos analíticos de previsão destes parâmetros.

### **3.1.7 O Espectro Solar na Superfície da Terra**

O espectro da radiação solar extraterrestre foi descrito no item 3.1.3, mas além da redução em intensidade, o espectro da radiação solar que atinge a superfície da Terra é também modificado conforme a radiação passa através da atmosfera. O processo que ocorre inclui dispersão de Rayleigh e particulada (poeira e água), além de absorção por ozônio, vapor de água e dióxido de carbono. Todos estes processos dependem não apenas das condições temporais da atmosfera, mas também de “quanta atmosfera” a luz do Sol atravessa.

Este fator é medido em termos de “massa de ar”, a qual é simplesmente a razão entre a distância que a radiação solar viaja através da atmosfera terrestre e a distância que a radiação viajaria se o Sol estivesse exatamente sobre a cabeça do observador no solo.

Deste modo, diz-se que a radiação solar que chega diretamente sobre a cabeça do observador atravessou uma massa de ar de valor 1,0 ao nível do mar. A irradiância

solar chegando sob um ângulo de Zênite de  $60^\circ$  atravessaria uma distância de aproximadamente duas vezes o comprimento de caminho perpendicular, e portanto, uma massa de ar de 2,0.

A Equação (4), apresentada a seguir, permite o cálculo aproximado da massa de ar sob qualquer ângulo de Zênite ( $\theta_z$ ):

$$massa\ de\ ar = \frac{1}{\cos\theta_z + 0,50572(96,07995 - \theta_z)^{-1,6364}} \quad (4)$$

na qual o ângulo de Zênite ( $\theta_z$ ) é dado em graus. No pôr do Sol ( $\theta_z = 90^\circ$ ), esta expressão resulta em 37,92 indicando que muito pouca radiação solar atinge a superfície da Terra nesta condição.

Para altitudes diferentes do nível do mar, este cálculo da massa de ar deve ser reduzido pela razão entre a pressão atmosférica local e a pressão atmosférica padrão ao nível do mar.

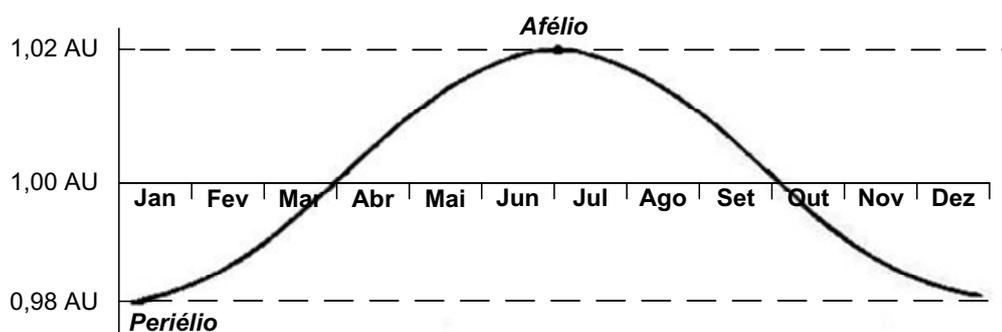
## 3.2 A Posição do Sol

Para que se possa coletar a energia do Sol de maneira eficiente, e em particular, para o desenvolvimento das etapas de posicionamento do painel fotovoltaico propostas na presente pesquisa, torna-se indispensável conhecer qual a posição da Terra em relação ao Sol para qualquer instante; tomando-se a Terra como referência, o que se busca é saber qual a posição aparente do Sol em relação à Terra em qualquer localidade na superfície terrestre, para todos os instantes de tempo nos quais se possa coletar a energia que chega à superfície. O equacionamento apresentado a seguir é um resumo dos resultados mais importantes e suficientes para o entendimento de como se localiza ‘o Sol no céu’.

### 3.2.1 Os movimentos da Terra

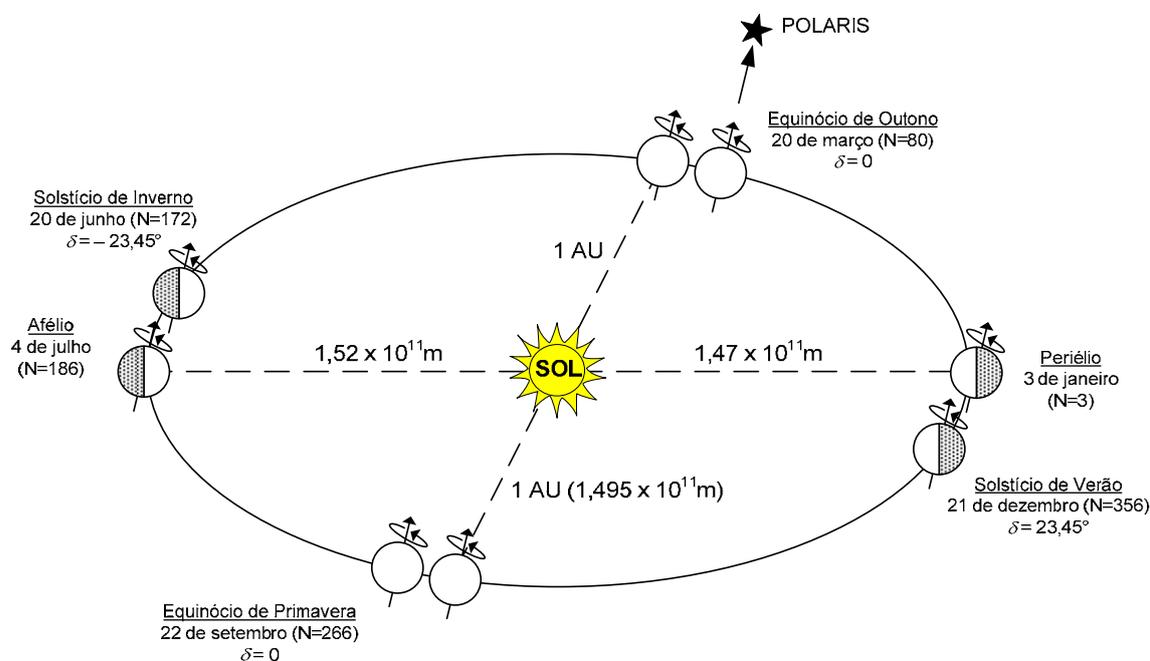
Segundo Stine e Geyer (2001), a Terra completa um giro em torno do Sol a cada 365,25 dias descrevendo uma órbita elíptica, com distância média Terra-Sol de

$1,496 \times 10^{11}$  m (ou 1 UA – Unidade Astronômica). O plano desta órbita é chamado de “Plano Elíptico”, sendo que a órbita da Terra atinge a distância máxima do Sol (no Afélio) de  $1,52 \times 10^{11}$  m e a distância mínima (no Periélio) de  $1,47 \times 10^{11}$  m, conforme ilustrado na Figura 5.



**Figura 5 – Variação da distância Terra-Sol ao longo do ano**  
(fonte: Stine e Geyer, 2001)

A Figura 6 ilustra o plano elíptico de órbita da Terra em torno do Sol, e apresenta as estações do ano para o hemisfério Sul.



**Figura 6 – Plano Elíptico de Órbita da Terra em torno do Sol** (adaptado de Iqbal, 1983)

Além da órbita que descreve em torno do Sol, a Terra também rotaciona sobre seu próprio eixo polar, inclinado  $23,45^\circ$ , em ciclos aproximados de 24 horas. A direção para a qual o eixo polar aponta é fixo no espaço e alinhado com a Estrela do Norte ('Polaris') – com desvio máximo de  $45'$  ( $\cong 13$  mrad).

A rotação da Terra sobre o seu próprio eixo produz os dias e as noites, e a inclinação deste eixo em relação ao plano elíptico produz as estações, à medida que a Terra gira em torno do Sol. As datas apresentadas na Figura 6 referem-se ao ano de 2008, e podem variar 1 ou 2 dias de acordo com o ano de interesse.

### 3.2.2 A medida do Tempo

A medida do tempo é realizada medindo-se a rotação da Terra sobre seu eixo polar. A referência de medida para o tempo (e também para a longitude) é o meridiano (linha imaginária) que passa sobre a cidade de Greenwich, na Inglaterra, e também em ambos os pólos da Terra. Este meridiano é conhecido como Meridiano Principal.

Atualmente, a principal escala de tempo mundial, chamada Hora Universal (antigamente chamava-se Hora de Greenwich), ainda é aquela medida no Meridiano Principal. Trata-se de um sistema de tempo com 24 horas, baseado no 'tempo médio', segundo o qual um dia tem 24 horas, e a metade da noite (meia-noite) corresponde à zero hora.

O tempo médio é baseado na duração de um dia médio. A duração de um segundo 'médio' é obtida dividindo-se o tempo médio de uma transição completa do Sol, ao longo de um ano, por 86.400. Na prática, a duração de qualquer dia específico, medido a partir da transição completa do Sol, pode variar até 30 segundos ao longo do ano.

Esta variação na duração dos dias é devido a quatro fatores, listados na ordem decrescente de importância, segundo classificação de Jespersen e Fitz-Randolph (1977):

- A órbita da Terra em torno do Sol não é circular, mas elíptica, de modo que a Terra viaja mais rapidamente quando está mais próxima do Sol e mais lentamente quando está mais distante;

- O eixo da Terra é inclinado em relação ao plano que contém sua órbita em torno do Sol.
- A Terra rotaciona em uma velocidade irregular sobre seu próprio eixo;
- A Terra ‘balança’ sobre seu eixo.

### 3.2.2.1 Os Fusos Horários

Considerando-se o costume de designar o horário de 12h00 como sendo a metade do dia (“meio-dia”), independente de qual seja a localidade considerada, desenvolveu-se um sistema de Zonas de Hora Padrão (Fusos Horários). Este sistema define regiões geográficas com larguras aproximadas de 15°, cada qual centrada em um meridiano cuja hora local padrão é igual à hora solar média.

Deste modo, o tempo é medido sobre os meridianos das Zonas de Hora Padrão, os quais estão localizados a cada 15° do Meridiano Principal, sendo que a hora local muda em incrementos de 1 hora a cada Zona. As localidades a leste de Greenwich têm horários adiantados em relação às localidades situadas a oeste de Greenwich.

### 3.2.2.2 O Horário de Verão

Decisões políticas dos governos ou imposições econômicas alteram os padrões para a medida do tempo em alguns países durante determinados períodos do ano, dificultando a correlação entre o horário do relógio com o movimento do Sol.

Um conceito conhecido e utilizado em alguns países é o chamado “horário de verão”, também conhecido como “horário de economia de energia” (*Daylight Savings Time – DST*), período no qual os relógios são adiantados em 1 hora durante alguns meses do ano com o objetivo de deslocar o horário de ponta, diminuindo a demanda neste horário, o que resulta em economia de energia e melhor utilização da luz do dia. Nestas situações, um projetista de sistemas de coleta de energia solar deve estar atento ao horário do relógio adotado na localidade sob estudo.

### 3.2.2.3 O Tempo Sideral

Os conceitos apresentados até este ponto do texto referem-se ao chamado Tempo Solar Médio, que define um dia (86.400 segundos) como sendo o intervalo médio de tempo decorrido até que um mesmo ponto na Terra seja atingido pelo Sol por duas vezes consecutivas (transição).

Entretanto, além do tempo solar médio, estudos de Astronomia ou de Mecânica Orbital descritos na publicação “Power from the Sun” (STINE & GEYER, 2001) utilizam o conceito do “Tempo Sideral”. Este sistema de medida do tempo baseia-se no dia sideral, o qual corresponde à duração de uma rotação completa da Terra sobre seu próprio eixo.

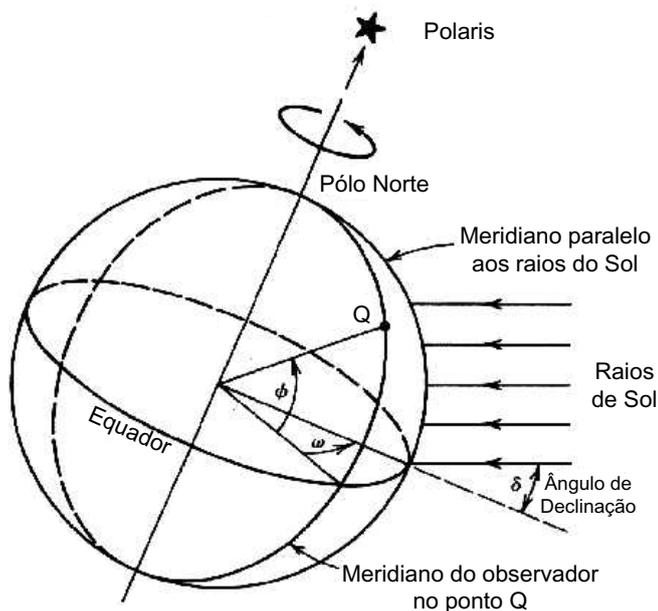
Um dia médio é aproximadamente 4 minutos mais longo que o dia sideral porque a Terra, durante o tempo que realiza uma rotação completa sobre seu eixo também está em movimento orbital em relação ao Sol. Deste modo, um dia sideral contém exatas 23 horas, 56 minutos e 4,09053 segundos de tempo médio.

Assim, por definição, existem 86.400 segundos siderais em um dia sideral, o que significa que 1 segundo sideral é ligeiramente mais curto que 1 segundo solar médio. Mais precisamente:  $1 \text{ segundo médio} = 1,002737909 \text{ segundo sideral}$ .

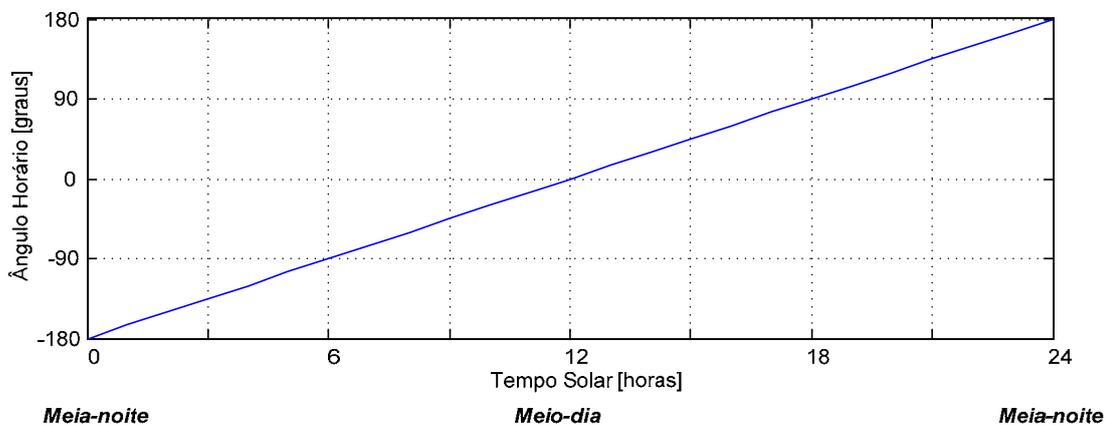
### 3.2.2.4 O Ângulo Horário

O ângulo formado entre o meridiano do observador e o meridiano cujo plano contém o Sol é chamado de Ângulo Horário ou Ângulo de Azimute ( $\omega$ ) e descreve a rotação da Terra sobre seu eixo polar, conforme ilustra a Figura 7.

O ângulo horário é zero ao meio-dia solar (quando o Sol atinge seu ponto mais alto no céu). Neste horário diz-se que o Sol está “direto ao Norte” (no hemisfério Sul), pois o plano do meridiano que contém o observador também contém o Sol. A cada hora o ângulo horário aumenta  $15^\circ$ , completando um ciclo de  $360^\circ$  a cada 24 horas, podendo variar de  $-180^\circ$  até  $+180^\circ$ , conforme ilustra a Figura 8.



**Figura 7 – Ângulo Horário**



**Figura 8 – Variação do Ângulo Horário durante um dia**

### 3.2.2.5 A Hora Solar

A hora solar é baseada no relógio de 24 horas, com 12h00 sendo o horário em que o Sol está exatamente na direção Norte. O conceito de hora solar é usado para prever a direção dos raios solares em um determinado ponto sobre a Terra. A hora solar

depende da localidade (longitude) e geralmente é diferente da hora local marcada pelos relógios, definida pelas Zonas de Hora Padrão (fuso horário) e outras aproximações.

Neste trabalho, a determinação exata da hora solar é um dos parâmetros mais importantes para o posicionamento do painel fotovoltaico. A expressão apresentada na Equação (5) permite calcular o ângulo horário a partir da hora solar.

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (\text{graus}) \quad (5)$$

onde  $t_s$  é a hora solar (medida em horas, numa escala de 0 a 24).

### 3.2.2.6 A Equação do Tempo

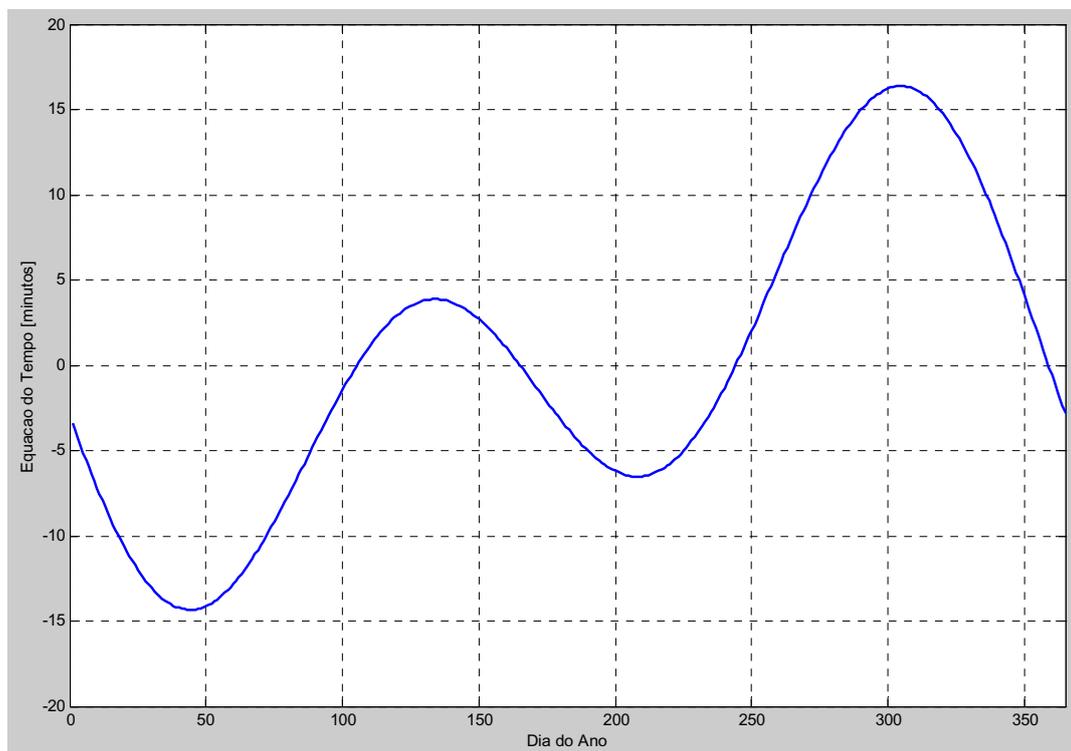
A diferença entre a hora solar média e a hora solar real para uma determinada data pode atingir  $\pm 17$  minutos, medidos dentro de um ciclo anual. Esta variação está ilustrada na Figura 9 e é descrita através da expressão apresentada na Equação (6), conhecida como “Equação do Tempo” (EOT, do inglês *Equation Of Time*).

$$EOT = 0,258 \cos(x) - 7,416 \sin(x) - 3,648 \cos(2x) - 9,228 \sin(2x) \quad (\text{min}) \quad (6)$$

na qual  $x$  é um ângulo definido como função do número do dia ( $N$ ) no ano Juliano, iniciando por  $N=1$  em primeiro de janeiro, e obedecendo à Equação (7):

$$x = \frac{360(N-1)}{365,242} \quad (\text{graus}) \quad (7)$$

Este equacionamento, desenvolvido por Woolf (1968) tem uma precisão de aproximadamente 30 segundos, considerando as horas de luz de um dia. Para um posicionamento mais preciso de coletores solares, um cálculo com menor margem de erro deve ser utilizado, como o desenvolvido por Lamm (1981), apresentado na Equação (8), a qual tem um erro médio de apenas 0,63s e um erro máximo absoluto de 2s.



**Figura 9 – Gráfico correspondente à Equação do Tempo**

O valor resultante em minutos é positivo quando a hora solar aparente está adiantada em relação à hora solar média e negativo quando a hora solar aparente está atrasada da hora solar média.

$$EOT = 60 \sum_{k=0}^5 \left[ A_k \cos\left(\frac{360kn}{365,25}\right) + B_k \sin\left(\frac{360kn}{365,25}\right) \right] \quad (min) \quad (8)$$

Neste caso,  $n$  é o número de dias em um ciclo de 4 anos, sendo que  $n=1$  é o primeiro dia de janeiro de cada ano bissexto, e  $n=1.461$  corresponde ao dia 31 de dezembro do quarto ano do ciclo.

Os coeficientes  $A_k$  e  $B_k$  são apresentados na Tabela 2 e os argumentos para as funções seno e cosseno são fornecidos em graus.

Tabela 2 – Coeficientes da Equação 8 (fonte: Stine e Geyer, 2001)

$K$	$A_k$ (hora)	$B_k$ (hora)
0	$2,0870 \times 10^{-4}$	0
1	$9,2869 \times 10^{-3}$	$-1,2229 \times 10^{-1}$
2	$-5,2258 \times 10^{-2}$	$-1,5698 \times 10^{-1}$
3	$-1,3077 \times 10^{-3}$	$-5,1602 \times 10^{-3}$
4	$-2,1867 \times 10^{-3}$	$-2,9823 \times 10^{-3}$
5	$-1,5100 \times 10^{-4}$	$-2,3463 \times 10^{-4}$

### 3.2.2.7 Conversão do Tempo

A conversão entre a hora solar e a hora do relógio requer conhecimento da localidade, do dia do ano, e dos padrões com os quais os relógios locais são ajustados. A Equação (9) permite que se faça esta conversão.

$$t_s = LCT + \frac{EOT}{60} - LC - D \quad (\text{horas}) \quad (9)$$

Nesta expressão obtém-se a hora do relógio local ( $LCT = Local\ Clock\ Time$ ) a partir do conhecimento de  $t_s$  (hora solar) e de  $EOT$  (Equação do Tempo); o resultado é fornecido em formato 24 horas.  $LC$  é a correção da longitude e pode ser calculada pela expressão a seguir:

$$LC = \frac{(longitude\ local) - \left( \frac{longitude\ do\ meridiano}{do\ fuso\ horário\ local} \right)}{15} \quad (\text{horas}) \quad (10)$$

e o parâmetro  $D$  na Equação (9) é igual a 1 se na localidade estiver sendo utilizado “horário de verão”, ou zero, caso não esteja.

### 3.2.3 O Ângulo de Declinação

O plano que inclui o Equador da Terra é chamado “Plano Equatorial”. Se uma linha é traçada entre o centro da Terra e o Sol, o ângulo entre esta linha e o Plano Equatorial é chamado de Ângulo de Declinação ( $\delta$ ), conforme ilustrado na Figura 10.

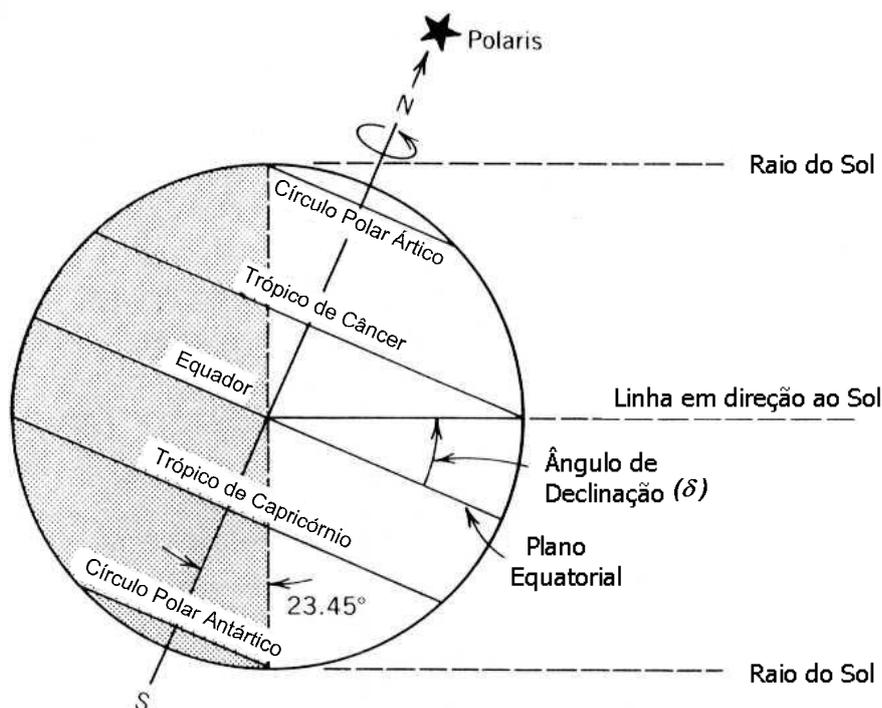


Figura 10 – Ilustração definindo o Ângulo de Declinação  
(fonte: Stine e Geyer, 2001)

Na época do ano em que a extremidade mais ao sul do eixo rotacional da Terra está inclinada em direção ao Sol, o Plano Equatorial da Terra está inclinado  $23,45^\circ$  em relação à linha Terra-Sol. Nesta situação, que ocorre por volta do dia 22 de dezembro, o Sol atingirá a sua posição mais elevada no céu ao meio-dia solar e o ângulo de declinação será  $\delta = +23,45^\circ$ . Esta condição é chamada de Solstício de Verão e indica o início do verão no Hemisfério Sul.

À medida que a Terra continua sua órbita anual em torno do Sol, aproximadamente três meses após o Solstício de Verão um novo ponto de interesse é alcançado; isto ocorre quando uma linha imaginária traçada do centro da Terra em direção ao

Sol está contida no Plano Equatorial da Terra. Neste ponto, um observador sobre o Equador observaria que o Sol está diretamente sobre a sua cabeça ao meio-dia.

Esta condição é chamada de ‘equinócio’ pois, em qualquer lugar sobre a Terra, o Sol é visível (dia) durante exatas 12 horas e o tempo durante o qual não é visível (noite) também são exatas 12 horas e é uma situação ocorre duas vezes durante um ano, o Equinócio de Outono (aproximadamente em 22 de março), marcando o início do outono, e o Equinócio de Primavera (aproximadamente em 23 de setembro), marcando o início da primavera no Hemisfério Sul. Nos equinócios, o ângulo de declinação ( $\delta$ ) vale zero.

O Solstício de Inverno ocorre por volta do dia 21 de junho e marca o ponto no qual a extremidade mais ao norte do eixo rotacional da Terra está inclinada em direção ao Sol, sendo que o Hemisfério Sul está em situação inversa, ou seja, em sua posição mais distante do Sol. Diz-se que nesta situação o sol do meio-dia está em sua posição ‘mais baixa’ no céu e o ângulo de declinação será  $\delta = -23,45^\circ$ . Por convenção, os ângulos de declinação de inverno são negativos.

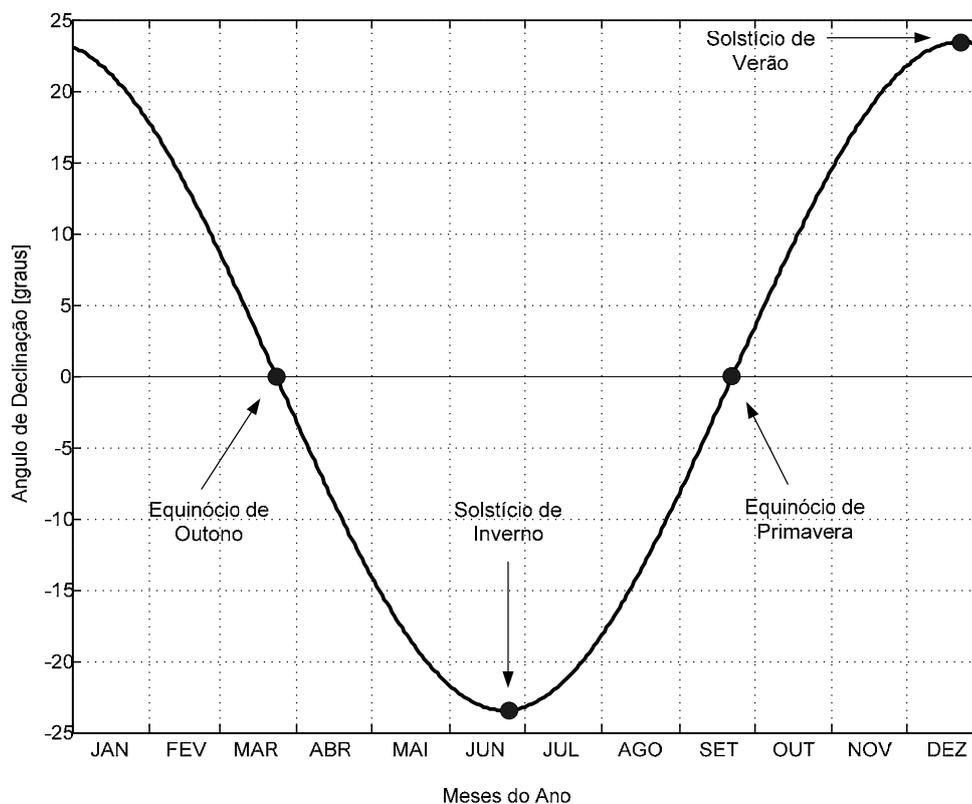
O conhecimento do valor exato do ângulo de declinação é fundamental para navegação e astronomia, sendo que para aplicações em projetos de energia solar uma aproximação de  $1^\circ$  é suficiente. Uma expressão para cálculo aproximado do ângulo de declinação é apresentada na Equação (11):

$$\text{sen } \delta = 0,39795 \cos[0,98563(N - 173)] \quad (11)$$

na qual o argumento do cosseno está em graus e  $N$  é o número do dia no ano, calculado de maneira idêntica àquela definida para a Equação (7). A Figura 11 ilustra a variação do ângulo de declinação durante 1 ano.

### 3.2.4 O Ângulo de Latitude

O Ângulo de Latitude ( $\phi$ ) é o ângulo entre uma linha traçada de um ponto na superfície da Terra em direção a seu centro, e o Plano Equatorial da Terra. A intersecção do Plano Equatorial com a superfície da Terra forma a linha do Equador e é designado como ângulo de latitude zero.



**Figura 11 – Variação Anual do Ângulo de Declinação**

O eixo de rotação da Terra intercepta a superfície da Terra na latitude  $90^\circ$  (Pólo Norte) e na latitude  $-90^\circ$  (Pólo Sul). Qualquer localidade na superfície da Terra pode ser então definida pela intersecção de um ângulo de longitude com um ângulo de latitude.

Outros ângulos de latitude de interesse particular são o Trópico de Câncer (latitude  $+23,45^\circ$ ) e o Trópico de Capricórnio (latitude  $-23,45^\circ$ ). Eles representam as máximas inclinações dos Pólos Norte e Sul em direção ao Sol. Além destes, são também de particular interesse o Círculo Polar Ártico (latitude  $+66,55^\circ$ ) e o Círculo Polar Antártico (latitude  $-66,55^\circ$ ), os quais representam a intersecção de uma perpendicular à linha Terra-Sol quando os Pólos Norte e Sul (respectivamente) estão com suas máximas inclinações em direção ao Sol.

### **3.3 Energia Solar Fotovoltaica**

A conversão direta da luz em eletricidade é possível através de um processo conhecido por Efeito Fotovoltaico, inicialmente relatado pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839. Trata-se do aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz.

A própria palavra descreve o que ocorre neste processo, pois trata-se da junção de ‘foto’, que em grego significa luz, com ‘volt’, derivada do nome de Alessandro Volta, pioneiro pesquisador da eletricidade. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão.

#### **3.3.1 Histórico**

Segundo Perlin (1999), em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico construído a partir de estruturas de estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial, com o advento da microeletrônica. Inicialmente, o alto custo de produção e a baixa eficiência dos painéis solares tornavam esta tecnologia inacessível à população em geral, sendo que até as décadas de 50 e 60 sua utilização restringiu-se a aplicações militares, como os satélites artificiais russos e norte-americanos.

As primeiras aplicações comerciais da energia solar fotovoltaica como opção de fornecimento de energia elétrica de baixa potência em locais isolados são relatadas nos Estados Unidos, quando a Southern Railway instalou, em 1974, módulos solares para alimentar as lâmpadas de sinalização nos cruzamentos ferroviários no estado da Geórgia. Diversas outras empresas ferroviárias adotaram o mesmo sistema para levar eletricidade a localidades remotas, provendo energia a sistemas de sinalização e também a repetidores de microondas utilizados na comunicação, diminuindo significativamente as despesas com manutenção e extensão da rede convencional para atendimento de pequenas cargas (PERLIN, 1999).

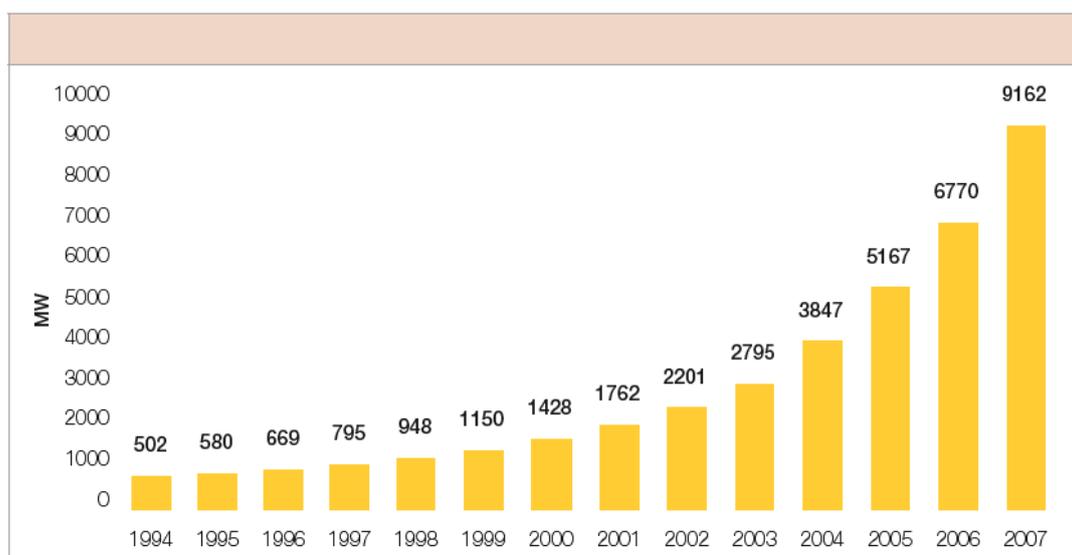
Ainda segundo Perlin (1999), outra experiência bem-sucedida ocorreu na Austrália, onde o governo, através da empresa Telecom Australia instalou, em 1978, um enlace de microondas composto por setenta repetidores, cobrindo uma extensão de 2.400 km,

totalmente alimentado por energia fotovoltaica, o que acabou por tornar esta tecnologia como um padrão para sistemas de comunicação, os quais geralmente demandam baixa potência e se situam em localidades distantes das redes de distribuição convencional, de difícil acesso para manutenção.

Nas últimas três décadas, avanços significativos no desenvolvimento de materiais permitiram o aumento da eficiência dos painéis fotovoltaicos, com a diminuição de custos, tornando a tecnologia acessível a uma maior parcela da população.

A crise do petróleo em 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em relação ao daquelas células usadas em explorações espaciais. Modificou-se, também, o perfil das empresas envolvidas no setor (CRESESB, 2003).

Dados da Associação Européia da Indústria Fotovoltaica (EPIA, 2008) informam que a capacidade mundial instalada de sistemas fotovoltaicos atingiu a marca de 9.162 MW ao final do ano de 2007. Comparando-se este dado com os 1.200 MW instalados no final do ano 2000, observa-se que o crescimento ocorreu a uma taxa média anual superior a 35% desde 1998, conforme ilustra a Figura 12.



**Figura 12 – Capacidade Mundial Instalada de Sistemas Fotovoltaicos (fonte: EPIA, 2008)**

O custo das células solares é, ainda hoje, um grande desafio para a indústria e o principal empecilho para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. No entanto, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, tanto porque seus custos estão decrescendo, quanto porque a avaliação dos custos das outras formas de geração está se tornando mais real, levando em conta fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais.

### 3.3.2 Tecnologia e Eficiência

Normalmente conhecidas como células solares, as células fotovoltaicas individuais são dispositivos construídos a partir de materiais semicondutores e que produzem eletricidade. As células fotovoltaicas são encontradas em diferentes tamanhos e formatos; são comumente conectadas para formar os módulos fotovoltaicos, os quais, por sua vez, podem ser combinados e conectados para formarem arranjos fotovoltaicos (*PV arrays*), que podem ter diferentes tamanhos e potências (EPIA, 2008).

A tecnologia fotovoltaica utiliza células com camadas de material semicondutor tetravalente (em geral, o silício), justapostas, uma com dopagem de átomos trivalentes (em geral, o boro) – dita camada tipo p, outra com dopagem de átomos pentavalentes (em geral, o fósforo) – dita camada tipo n, formando uma junção *pn*, onde o movimento de cargas forma um campo elétrico (Figura 13).

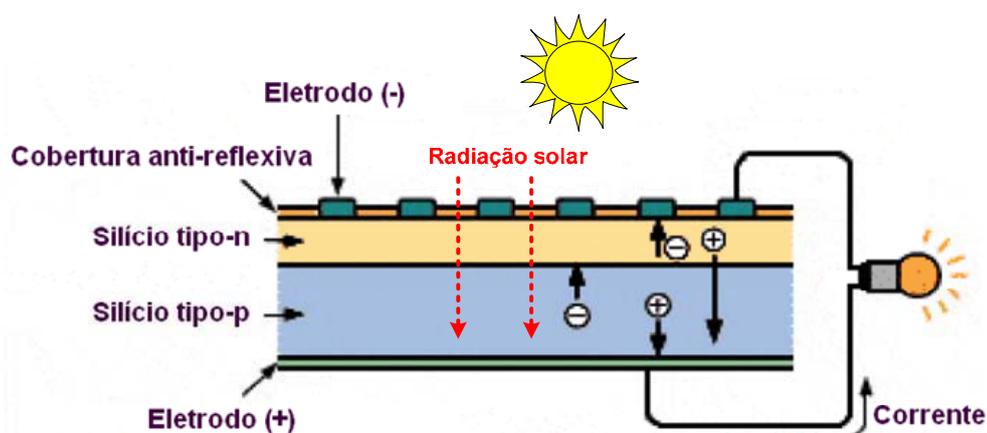


Figura 13 – Estrutura da célula solar de silício em corte (fonte: EPIA, 2008, adaptado)

Quando a luz do Sol incide sobre uma célula semicondutora  $pn$ , os fótons da luz absorvida desalojam elétrons dos átomos da célula. Estes elétrons livres movem-se através da estrutura cristalina do material, criando pares elétron-lacuna. Este movimento de elétrons e lacunas formam a corrente elétrica, no processo físico chamado efeito fotovoltaico, com intensidade proporcional à intensidade de luz incidente (CRESESB, 1999).

O silício, segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, impera quase que absoluto no ranking dos materiais utilizados. O silício tem sido explorado sob diversas formas: monocristalino (mono-Si), policristalino (poly-Si) e amorfo (a-Si). Relatório da Associação Européia da Indústria Fotovoltaica (EPIA, 2008) informa que 90% das células fotovoltaicas produzidas em 2007 foram feitas de silício cristalino. No entanto, a busca de materiais alternativos é intensa e concentra-se na área de filmes finos, onde o silício amorfo se enquadra. Células de filmes finos, além de utilizarem menor quantidade de material do que as que apresentam estruturas cristalinas, requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação, características que, por si só, justificam o esforço em seu aperfeiçoamento (EPIA, 2008).

As principais diferenças entre os materiais citados são a eficiência na absorção da luz, a eficiência na conversão da energia luminosa em eletricidade, a tecnologia de fabricação e o custo de produção, tendo cada um suas vantagens e desvantagens, além de limitações.

### **3.3.2.1 Silício Cristalino**

Segundo Mah (1998), as células monocristalinas são as mais comuns na indústria fotovoltaica e possuem uma estrutura molecular uniforme, obtida de cristais de silício altamente purificados; esta alta uniformidade, se comparada a materiais não-cristalinos, resulta em alta eficiência na conversão luz-eletricidade. Em outras palavras, para uma dada área de silício, os módulos fotovoltaicos construídos com células monocristalinas convertem mais luz em eletricidade do que outros tipos de materiais.

Eficiências superiores a 20% têm sido obtidas com células de silício produzidas em larga escala; isto significa que, atualmente, já se pode aproveitar 20% da insolação incidente para produção de eletricidade. Tão importante quanto a eficiência, a

espessura das células solares é um fator que tem apresentado evolução, visto que menor quantidade de material resulta em menores custos; entre 2003 e 2008 a espessura média de *waffers* (estrutura de silício após o corte e antes do encapsulamento) reduziu-se de 0,32 mm para 0,17 mm (EPIA, 2008).

Dados atualizados em Abril de 2008 apontam para um preço mínimo no mercado norte-americano de US\$ 4,35/Wp (dólar por watt-pico) para os painéis construídos com esta tecnologia, sem impostos (SOLARBUZZ, 2001).

Devido às interconexões das células em arranjos série/paralelo para a construção dos módulos, a eficiência da célula individual sob Condições Padrão de Teste (CPT ou *Standard Test Conditions*: 25°C, irradiância de 1000 W.m<sup>-2</sup>, massa de ar = 1,5) é geralmente maior do que a eficiência de um módulo comercial.

Durante o processo de produção, uma considerável quantidade de silício acaba se perdendo como resíduo do processo de corte dos *waffers*. O aproveitamento dos pequenos cristais através da fusão e depósito destes sobre um substrato resultam em um material conhecido como silício policristalino ou multicristalino, o qual tem a mesma capacidade de absorver luz e transformá-la em eletricidade, com menor eficiência no processo, devido à descontinuidade causada pelos grãos de silício. Esta descontinuidade dificulta o fluxo de elétrons e diminui a potência de saída da célula.

O custo de produção deste tipo de célula é ligeiramente menor, da ordem de US\$ 4,29/Wp (dólar por watt-pico), vantagem essa que acaba por ser absorvida pela menor eficiência de conversão (SOLARBUZZ, 2001).

### 3.3.2.2 Filmes finos

Novos materiais e novas tecnologias de fabricação têm sido objeto de pesquisas com o intuito de melhorar a eficiência e diminuir os custos de produção, e conseqüentemente, o custo da geração de energia elétrica por processo fotovoltaico. Dentre estas, destaca-se a tecnologia dos filmes finos.

Módulos de filmes finos são construídos pela deposição de camadas extremamente finas (espessura de alguns microns) de materiais foto-sensíveis sobre um substrato de baixo custo, como vidro, aço inoxidável ou plástico. Isto resulta em custo de

produção menor quando comparado à produção utilizando tecnologia de silício cristalino (EPIA, 2008).

Segundo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CRESESB, 1999), dentre os materiais comercialmente produzidos e mais utilizados atualmente estão o Silício amorfo (a-Si), o disseleneto de cobre e índio ou gálio (CIS, CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe). Segundo a EPIA (2008), estes, juntos, ocuparam em 2007 uma fatia de mercado da ordem de 10,4% do total de módulos comercializados. Até 2010, a expectativa de crescimento no mercado de filmes finos é atingir-se um percentual de 20% da produção total.

Filme fino policristalino sobre vidro (CSG) é uma promissora tecnologia de filme fino começando a entrar em produção industrial. Tecnologia microcristalina, em particular a combinação de silício amorfo e silício microcristalino (a-Si /  $\mu\text{c-Si}$ ) é também uma nova técnica com resultados bastante encorajadores.

A Tabela 3 resume as eficiências dos módulos e das células produzidos com as principais tecnologias conhecidas.

**Tabela 3 – Eficiências de Módulos e Células Fotovoltaicas (fonte: EPIA, 2008)**

<b>Tecnologia</b>	<b>Filme Fino</b>			<b>Silício Cristalino</b>		
	Silício amorfo (a-Si)	Telureto de Cádmio (CdTe)	CI(G)S	a-Si / $\mu\text{c Si}$	Mono cristalino	Poli cristalino
Eficiência da célula nas CPT	5% – 7%	8% – 11%	7% – 11%	8%	16% – 19%	14% – 15%
Eficiência do módulo					13% – 15%	12% – 14%
Área de módulos por kW	15 m <sup>2</sup>	11 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>	12 m <sup>2</sup>	~ 7 m <sup>2</sup>	~ 8 m <sup>2</sup>

Outra opção tecnológica conhecida, mas ainda pouco disponível no mercado para produção de células fotovoltaicas é a utilização de um semicondutor composto

de Gálio (Ga) e Arsênio (As), química e comercialmente conhecido como Arseneto de Gálio (GaAs). Este material tem estrutura similar à do Silício, porém apresenta como principal vantagem seu alto nível de absorção da luz, podendo atingir eficiência de conversão de energia da ordem de 25-30%. As aplicações mais comuns deste material são nos sistemas espaciais, devido sua alta resistência a danos causados pela radiação e pelo excesso de calor, possuindo como ponto negativo o alto custo (MAH, 1998).

### 3.3.3 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos são conjuntos de células fotovoltaicas incorporadas em uma única unidade, geralmente soldadas juntas sob uma proteção de vidro. Eles podem ser adaptados em tamanho adequado ao local onde deverão ser instalados; são robustos, confiáveis e à prova d'água. Normalmente os fabricantes garantem uma potência de saída de 80% da potência nominal mesmo após 20 ou 25 anos de utilização.

Uma instalação fotovoltaica descrita como tendo uma capacidade instalada de 3 kW geralmente refere-se à potência medida nas Condições Padrão de Teste (CPT), permitindo comparações entre diferentes tipos de módulos (EPIA, 2008).

De acordo com o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (CRESESB, 1999), devido às baixas tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, estas são agrupadas nos módulos através de conexões em série ou em paralelo.

Quando se conectam as células em paralelo, somam-se as correntes e a tensão do módulo é exatamente a tensão de cada célula. Pelas características típicas das células (corrente máxima por volta de 3A e tensão muito baixa, em torno de 0,7V) este arranjo não é utilizado salvo em condições muito especiais.

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série; neste, a tensão total do módulo é a soma das tensões individuais das células. Considerando-se que se deseja carregar baterias de 12V, os módulos fotovoltaicos devem produzir aproximadamente 16V, resultando em uma conexão entre 28 e 40 células de silício cristalino. Os dispositivos de filme fino produzem tensões maiores que a forma cristalina, podendo os módulos possuir menos que 28 células.

### 3.3.3.1 Diodo de Passagem

Pelo fato de estarem conectadas em série, o mau-funcionamento de uma célula comprometerá a potência de saída de todo o módulo fotovoltaico. Este problema pode ocorrer por defeito, ou simplesmente por efeito de sombra sobre determinada área do painel. Para evitar que toda a corrente do módulo seja limitada, usa-se um diodo *by-pass* ou diodo de passagem, conforme ilustra a Figura 14. Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o diodo *by-pass* é conectado a grupos de células, o que torna muito mais barata esta solução quando comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula.

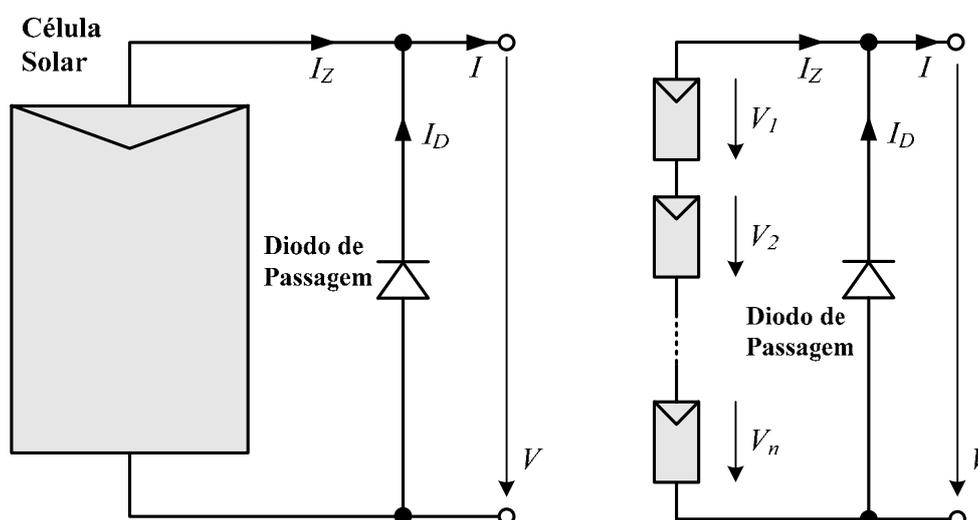


Figura 14 – Esquema de ligação do diodo de passagem para célula solar ou grupo de células (fonte: CRESESB, 1999)

### 3.3.3.2 Diodo de Bloqueio

Em situações nas quais o sistema fotovoltaico utiliza armazenamento de energia (bateria) e a tensão gerada pelo módulo é menor do que a tensão do acumulador, pode ocorrer corrente negativa fluindo pelas células; para que, nestas situações, não ocorram danos ao módulo fotovoltaico, utiliza-se um diodo de bloqueio que impede que correntes reversas circulem pelas células. Esta ligação está ilustrada na Figura 15.

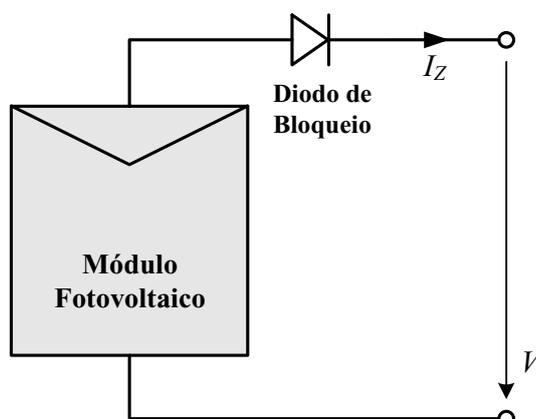


Figura 15 – Esquema de ligação do diodo de bloqueio (fonte: CRESESB, 1999)

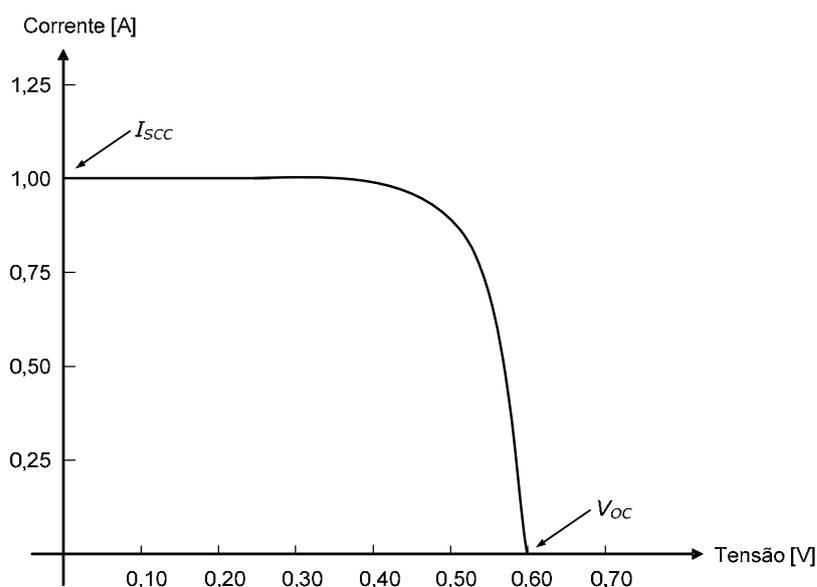
### 3.3.3.3 Características Elétricas

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico, expressa em Wp (Watt pico), medida nas Condições Padrão de Teste (CPT ou *Standard Test Conditions*: 25°C, irradiância de 1000 W.m<sup>-2</sup>, massa de ar = 1,5). Tão importante quanto este parâmetro, existem outras características elétricas que também caracterizam a funcionabilidade e aplicação do módulo fotovoltaico. Outras duas importantes características elétricas dos módulos fotovoltaicos são:

- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{OC}$  – *Open Circuit Voltage*) é a tensão que pode ser medida nos terminais do módulo fotovoltaico quando o mesmo encontra-se sob as CPT e sem carga conectada.
- Corrente de Curto-Circuito ( $I_{SCC}$  – *Short Circuit Current*) é a corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico nas CPT caso os terminais positivo e negativo sejam conectados um ao outro (neste caso, a tensão é zero).

A Figura 16 apresenta a curva característica I x V típica de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino, normalizada pela corrente de curto-circuito. Esta curva é obtida conectando-se uma carga entre os terminais da célula, e variando-se o valor desta

carga desde seu valor mínimo (zero = curto-circuito) até seu valor máximo (circuito aberto), sob condições padrão de teste (CPT); nesta, é possível ainda observar-se  $I_{SCC}$  para tensão zero nos terminais da célula e  $V_{OC}$  para circuito aberto.



**Figura 16 – Curva característica I x V típica de uma célula fotovoltaica de silício (adaptado de: CRESESB, 1999)**

A Figura 17 apresenta as curvas características I x V típicas de um painel fotovoltaico de silício, obtidas para diversas condições de irradiância, evidenciando as diferentes correntes obtidas, e por conseqüência, as diferentes potências nas variadas condições de operação (a potência é obtida fazendo-se o produto tensão x corrente para cada ponto em cada curva).

Para cada ponto da curva I x V, o produto corrente-tensão representa a potência gerada nesta condição de operação. A Figura 18 mostra que, para uma célula fotovoltaica e, conseqüentemente para o módulo, existe somente uma tensão (e correspondente corrente) para a qual a potência máxima ( $P_M$ ), pode ser obtida. É importante ressaltar que não existe geração de potência elétrica nas condições de circuito aberto e curto-circuito, haja vista que corrente ou tensão são zero, respectivamente.

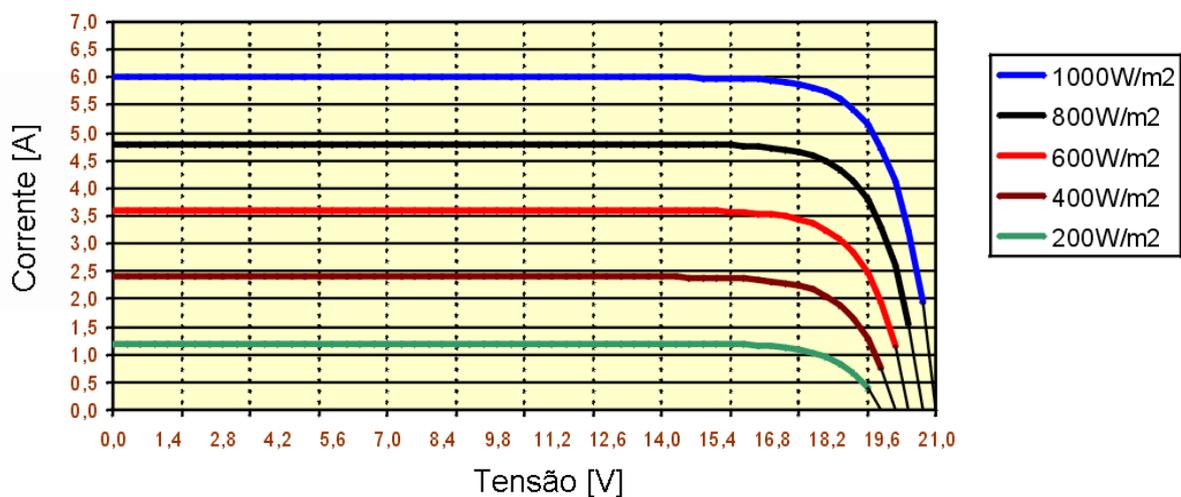


Figura 17 – Curvas I x V de um painel fotovoltaico de silício (adaptado de: LENARDIC, 2008)

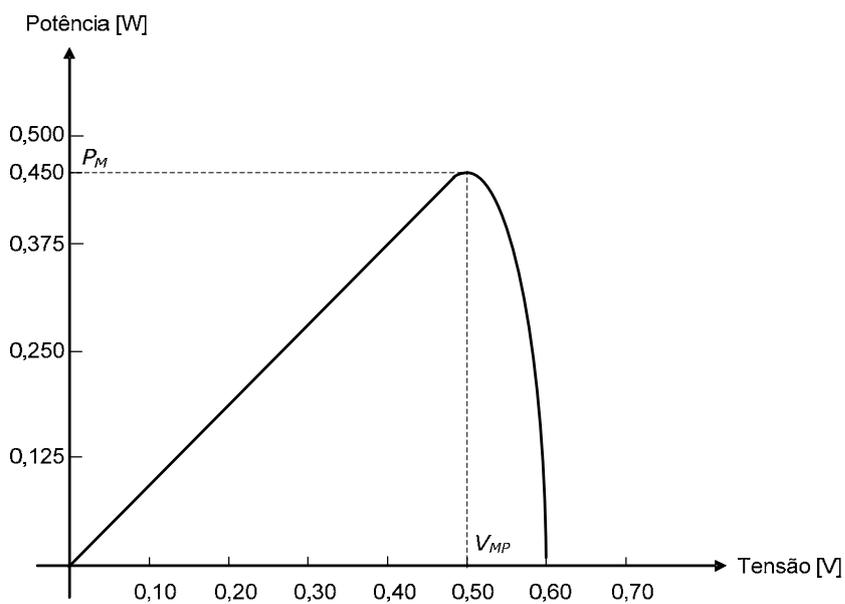
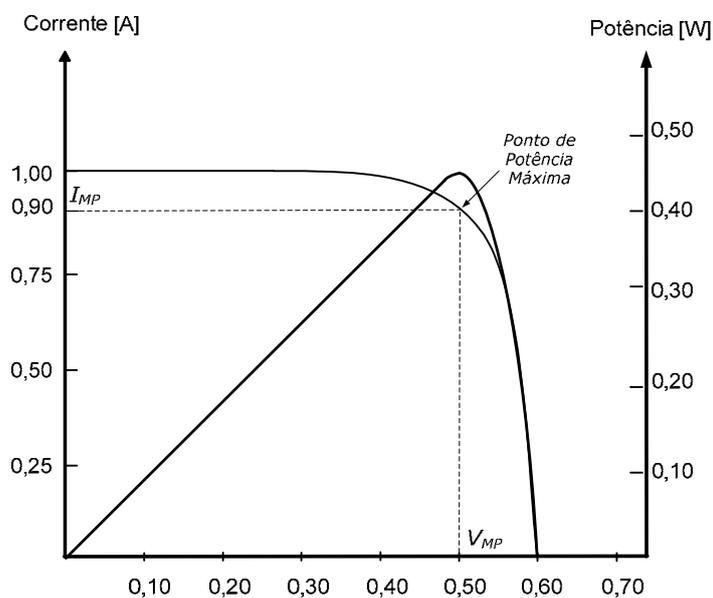


Figura 18 – Curva típica Potência X Tensão para uma célula de silício monocristalino (adaptado de: CRESESB, 1999)

A Figura 19 mostra a curva característica I x V superposta à curva de potência para análise dos parâmetros.



**Figura 19 – Parâmetros de potência máxima (adaptado de: CRESESB, 1999)**

Na situação de potência máxima, definem-se então Tensão de Potência Máxima ( $V_{MP}$ ) e Corrente de Potência Máxima ( $I_{MP}$ ), completando-se o conjunto das principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos (CRESESB, 1999):

- Tensão de Circuito Aberto
- Corrente de Curto-Circuito
- Tensão de Potência Máxima
- Corrente de Potência Máxima
- Potência Máxima

### 3.3.4 Componentes de um Sistema Solar Fotovoltaico

Segundo o Grupo de Trabalho de Energia Solar do CRESESB/RJ, em sua publicação “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos” (CRESESB, 1999), os componentes necessários em um sistema completo podem variar dependendo da aplicação e das características das cargas a serem alimentadas; entretanto, na maioria dos sistemas, os componentes necessários são os seguintes:

- Módulo Fotovoltaico é a unidade básica do sistema. O módulo é composto de células solares conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia. O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser série e/ou paralelo, depende da tensão e da corrente elétrica requeridas pelas cargas.
- Bateria é um dispositivo conveniente e eficiente para o armazenamento da energia elétrica gerada a partir dos módulos fotovoltaicos, haja vista que o sistema não gera energia durante a noite e, neste período, há a necessidade de consumir-se energia que tenha sido gerada durante o período de insolação.
- Controlador de Carga é um componente eletrônico incluído na maioria dos Sistemas Fotovoltaicos com os objetivos básicos de facilitar a máxima transferência de energia do arranjo fotovoltaico para a bateria ou banco de baterias e protegê-las contra cargas e descargas excessivas, aumentando, conseqüentemente, a sua vida útil.
- Inversor é o dispositivo necessário para alimentação de cargas em corrente alternada. A geração do sistema fotovoltaico, assim como a energia fornecida pelas baterias, é em corrente contínua, mas alguns tipos de carga necessitam da corrente alternada para operarem. Nestes casos, o inversor converte a energia contínua em alternada.
- Equipamentos Complementares são todos os sistemas de conexão elétrica (fiação) e outros dispositivos utilizados no aprimoramento do funcionamento geral, como por exemplo, os mecanismos de *tracking* (rastreamento solar).

### 3.3.5 Sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais: isolados, híbridos ou conectados à rede. A utilização de cada uma dessas opções dependerá da aplicação e/ou da disponibilidade de recursos energéticos. A complexidade de cada um deles também dependerá da aplicação e das restrições específicas de cada projeto.

Sistemas autônomos, não conectados à rede elétrica, podem ou não apresentar fontes de energia complementares à geração fotovoltaica. Quando a configuração não se restringe à geração fotovoltaica, temos os sistemas híbridos; se o sistema é puramente fotovoltaico, então ele é chamado de sistema isolado. Normalmente, estes sistemas necessitam de algum tipo de armazenamento, utilizando baterias para o fornecimento de energia quando não há geração fotovoltaica ou outras formas de energia sendo gerada.

Sua configuração básica compreende, além do painel fotovoltaico, a unidade de controle e a unidade de armazenamento de energia, conforme esquematizado na Figura 20. A ordem de grandeza da potência fotovoltaica instalada neste tipo de sistema varia tipicamente de centenas de Wp a unidades de kWp.

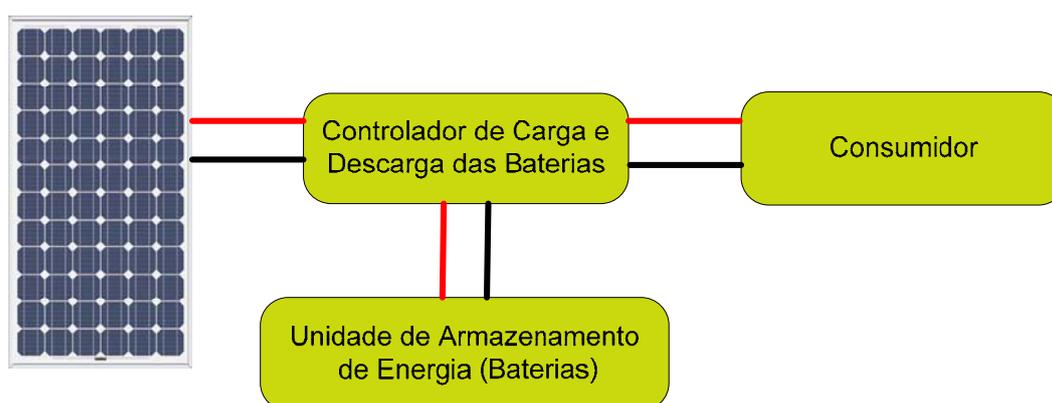
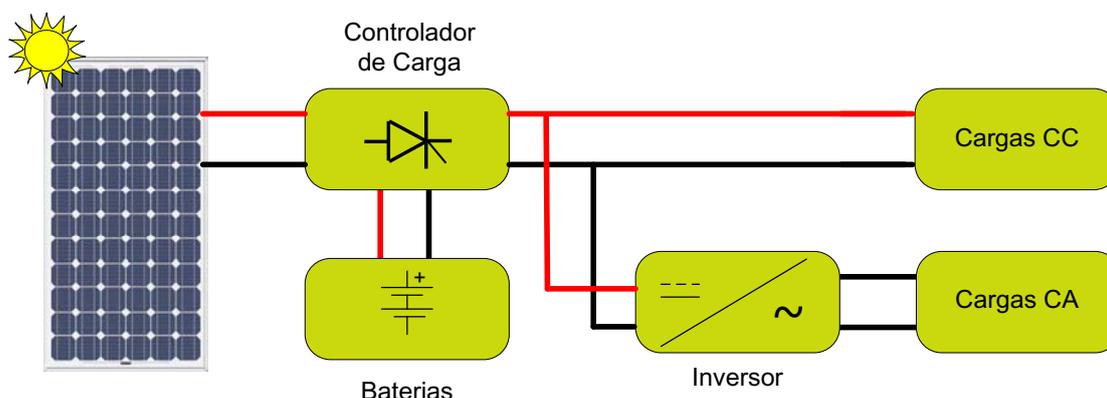


Figura 20 – Configuração Básica de um Sistema Fotovoltaico Isolado

A aplicação deste tipo de sistema é alimentar cargas em corrente contínua, independente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea. Exemplos de cargas comuns são iluminação, rádio, televisão, sistemas de comunicação, etc.

Diversas variações da configuração básica podem ser encontradas, dependendo do tipo de carga a ser alimentada e/ou da necessidade de armazenamento de energia.

Na Figura 21 apresenta-se uma variação da configuração básica, na qual cargas em CA e em CC são alimentadas, com armazenamento de energia utilizando banco de baterias e controlador de carga.



**Figura 21 – Sistema Fotovoltaico de Geração de Energia Elétrica**

Sistemas interligados à rede são aqueles onde a geração fotovoltaica representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado. São sistemas que normalmente não utilizam armazenamento de energia, pois a energia gerada é toda entregue à rede conforme vai sendo gerada, necessitando portanto, de sistema inversor eletrônico. Instalações deste tipo vêm se tornando cada vez mais populares em diversos países europeus, no Japão, Estados Unidos e mais recentemente no Brasil.

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (MME, 2007), em países industrializados os sistemas fotovoltaicos interligados à rede são, principalmente, instalados em edifícios. A integração destes sistemas com o ambiente construído oferece um grande potencial para a redução de custos, pois instalados próximos ao ponto de consumo aliviam as

perdas por transmissão e distribuição decorrentes da geração convencional, além de auxiliarem na redução da curva de carga.

Do ponto de vista da construção, não ocupam espaço adicional já que podem revestir fachadas ou serem instalados em telhados. Outra opção bastante prática é integrar os módulos, feitos em filme fino, aos vidros da fachada, ou mesmo a paredes externas.

Conforme relatório da EPIA (2008), especificamente na Europa, Japão, EUA e Alemanha, encontra-se em rápido crescimento a potência instalada de sistemas fotovoltaicos em residências; através de um programa de incentivo na Alemanha (*Roofs Programme*), por exemplo, foram instalados 100.000 sistemas fotovoltaicos, no período de 1999 a 2004, com potência total de 300 MW (FRAIDENRAICH, 2003). A Alemanha foi o país onde as edificações fotovoltaicas conectadas à rede elétrica tiveram maior crescimento, tendo sua capacidade total instalada multiplicada por 20 nos últimos sete anos.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, através do Plano Nacional de Energia 2030 (MME, 2007), a energia fotovoltaica é uma grande promessa para a geração distribuída. Um dos aspectos importantes ressaltados é que o seu emprego tem contribuído para normalizar questões essenciais da geração distribuída, nos aspectos de qualidade, segurança e proteção.

Os sistemas ligados à rede já operam com grande praticidade, com a energia em corrente contínua, gerada nos módulos, levada a um inversor que a converte em corrente alternada na frequência e tensão da rede. Toda a energia produzida nas células é aproveitada para suprir as cargas da instalação, e quando não é suficiente a rede supre o restante; quando é mais que o necessário, o excedente vai à rede. Os problemas de medição já foram solucionados e o mais comum hoje é um medidor bidirecional, com a mesma tarifa em ambos os sentidos, pagando o consumidor apenas a energia líquida recebida – caso negativa, ele ganha um bônus para os próximos períodos.

### **3.3.6 Sistemas de Armazenamento de Energia – Baterias**

As baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos têm como função fornecer energia para a carga nos momentos em que não há radiação suficiente para gerar a potência instantânea que a carga solicita, como por exemplo, durante a noite ou em dias com

chuvas e forte nebulosidade. Para um sistema fotovoltaico satisfatório, vários fatores devem ser considerados para determinar a capacidade e quantidade de baterias. Dentre estes, podem ser citados:

- Reserva de carga da bateria: o tempo em que a bateria, isoladamente, deve suportar a exigência de carga é estabelecido pelas necessidades de projeto do sistema.
- Determinação da carga: as exigências da aplicação determinam a quantidade de corrente a ser fornecida pela bateria num intervalo de tempo. A corrente de pico e a janela de tensão operacional são determinadas pela característica da carga.
- Capacidade da bateria e determinação da taxa funcional-hora: a capacidade da bateria e sua taxa funcional-hora de descarga são determinadas pela aplicação específica da carga, dias de reserva da bateria e as características da bateria.
- Determinação do número de células ligadas em série da bateria: os limites de tensão do sistema (janela de tensão) determinam o número de células em série.
- Determinação da capacidade da célula e do tamanho da bateria: uma vez encontrada a capacidade e números de células, a seleção final da célula pode ser feita e o tamanho da bateria pode ser calculado.
- Características da bateria: o desempenho do sistema, vida útil, manutenção e custo são influenciados pelo tipo de bateria selecionada para aplicações fotovoltaicas.

### 3.4 Sistemas de Posicionamento

Uma das razões que limitam a utilização da geração fotovoltaica de energia nos sistemas convencionais de geração é baixa eficiência dos módulos solares. Segundo Chun-Sheng et al. (2008, p. 2586), “nas atuais condições de desenvolvimento da tecnologia, a utilização de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar é uma ótima solução para aumento na eficiência e redução nos custos”.

Os sistemas conhecidos como *Solar Tracking* desempenham a tarefa de colocar os painéis solares com a sua superfície sempre em posição perpendicular aos raios de Sol incidentes. Desta maneira, as mudanças na posição do Sol em relação à Terra durante o dia e com respeito às estações do ano são compensadas com o re-posicionamento do módulo, permitindo que mais energia seja coletada e transformada em eletricidade dentro de um determinado intervalo de tempo (MARINESCU, 2006).

Ainda de acordo com Chun-Sheng, as pesquisas demonstram que sistemas que rastreiam o movimento do Sol e trabalham em um único eixo (*single axis*) podem aumentar em mais de 20% a produção de eletricidade, enquanto que sistemas de rastreamento em dois eixos (*double axis*) podem aumentar em mais de 40% a produção de eletricidade.

Uma das premissas básicas para se atingir tais resultados é a tecnologia envolvida no desenvolvimento destes sistemas: os motores utilizados, o tipo de sistema de controle, os princípios de movimento. A tecnologia de controle dos sistemas de rastreamento solar está hoje bastante amadurecida e tem sido largamente utilizada em todo o mundo.

Plantas de geração de energia elétrica com tecnologia fotovoltaica instaladas em desertos, conhecidas como “Sistemas Fotovoltaicos de Larga Escala (VLS-PV)” foram objetos de estudos e os resultados relatados comprovam sua viabilidade técnica e econômica (ITO et al., 2003).

No estudo realizado, Ito et al. (2003, 2004) apresentam os custos ao longo do ciclo de vida para sistemas de larga escala montados sobre estruturas fixas, estruturas móveis em 1 eixo e estruturas móveis de rastreamento em 2 eixos. Em suas conclusões, relatam a viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico, com rastreamento, para uma usina geradora de 100MW instalada no deserto de Gobi, na China, sob a avaliação de três

diferentes índices: custo ao longo do ciclo de vida, tempo de retorno do investimento pela geração de energia e as emissões de carbono ao longo do ciclo de vida.

Os resultados demonstram que “a energia total consumida durante todo o ciclo de vida do sistema fotovoltaico, considerando-se a produção e o transporte dos componentes, a construção, operação e manutenção do sistema pode ser recuperada em um curto período de tempo, bastante inferior ao seu tempo de vida útil” (ITO et al., 2003, p. 2814).

A maioria dos sistemas de rastreamento comercialmente disponível utiliza sensores para determinar a posição aparente do Sol. Esta, na verdade, é a justificativa mais adequada para o nome ‘rastreamento’, já que os sistemas de *tracking* conhecidos literalmente ‘perseguem’ o Sol na sua trajetória desde o alvorecer até o entardecer.

O uso de sensores é a solução mais simples e com melhor resultado em se tratando de sistemas concentradores. Nestes sistemas, utilizam-se conjuntos de lentes ou espelhos com o objetivo de concentrar os raios solares sobre uma pequena área de material semicondutor, obtendo como resultado uma maior potência elétrica por unidade de área.

A precisão de posicionamento, nestes casos, é fundamental para alcançar-se o objetivo proposto. Luque-Heredia et al. (2003) apresentam um sistema de posicionamento para painéis com concentração de 1000X no qual utilizam sensores e conseguem uma precisão de frações de grau (*subdegree*) durante o posicionamento. Descrevem ainda nesta publicação os cuidados com a influência da velocidade do vento durante os ajustes de posição do conjunto fotovoltaico.

Em sistemas onde não há a necessidade de posicionamento com tamanha precisão, nos quais são utilizados coletores fotovoltaicos planos, sem concentração, resultados significativos no aumento da eficiência também podem ser obtidos com o uso de técnicas de controle mais simples.

Marinescu (2006) apresenta uma avaliação bastante detalhada de sistemas de posicionamento utilizando as mais diversas tecnologias. Um método bastante simplificado de posicionar os módulos utiliza apenas um conjunto ‘corrente-catraca’ e movimenta o painel ao longo do dia, sem uso de programas de controle ou sensores de posicionamento.

Um método alternativo de posicionamento utiliza a expansão e a contração de fluidos vaporizáveis: geralmente, um reservatório está preenchido com um fluido que vaporiza-se e expande-se consideravelmente quando exposto ao Sol, e condensa-se e contrai-se quando está na sombra. Os reservatórios são integrados às laterais da estrutura do arranjo fotovoltaico. A diferença de pressão, trazida até o cilindro por uma tubulação, move o pistão e um eixo, conectado ao pistão, move o arranjo fotovoltaico (MARINESCU, 2006, p. 54).

Sistemas que utilizam sensores, em geral, necessitam de um dispositivo eletrônico que possa avaliar a melhor posição e comandar o movimento do(s) módulo(s). Estes sistemas apresentam em comum a limitação de funcionamento sob condições ‘parasitas’ ou ‘não previstas’, como por exemplo, a ocorrência parcial de nuvens no céu ou sombras que encubram parcialmente um ou mais sensores, causando erros no rastreamento.

O uso de algoritmos de controle sendo executados por controladores digitais pode superar estas limitações, sem a utilização de sensores para detectar a posição do Sol. Rotinas executando cálculos a partir de conhecimentos astronômicos, podem prever a localização exata do Sol em relação à Terra, conhecidos a localização do arranjo fotovoltaico sobre a superfície terrestre (coordenadas geográficas) e em qual ciclo de seu movimento o Sol se encontra (horário do relógio local, dia, mês e ano) (MARINESCU, 2006).

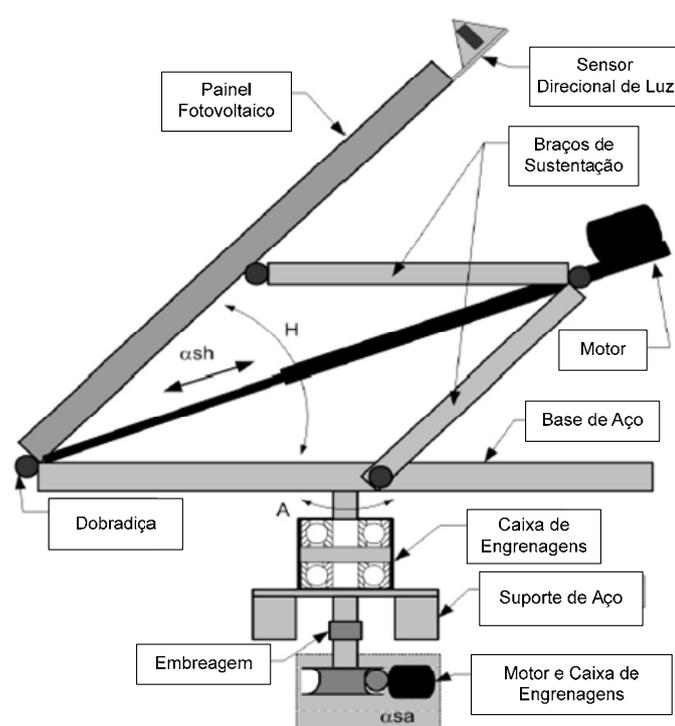
Vorobiev et al. (2004) apresentam uma análise teórica e experimental sobre as condições de coleta e conversão de energia solar em eletricidade através da comparação de um sistema de rastreamento sem concentração, e um sistema sem rastreamento, com painel solar bifacial e padrão.

Em seu desenvolvimento, os autores destacam que o rastreador solar construído para a avaliação experimental dos efeitos de posicionamento automático do painel possui movimento em dois eixos, com dois pares de fototransistores em cada eixo atuando como sensores, e servomotores com redução mecânica. O programa de controle dos motores é executado em um microcontrolador dedicado (PIC16F877).

Em suas conclusões, observam que o aumento na geração de eletricidade foi considerado pequeno (por volta de 30%) e que este tipo de sistema somente teria aplicações práticas no caso de sistemas de rastreamento muito econômicos. Efeitos melhores foram obtidos com o uso de painéis fotovoltaicos bifaciais, “os quais possuem custo

de produção não muito superior aos módulos padrão de mesma área, e um aumento na produção de energia causado pelo uso efetivo de uma face posterior com um sistema simplificado de espelhos planos poderia chegar a 50 – 60%” (VOROBIEV et al., 2004, p. 313).

Um estudo sobre diferentes tipos de algoritmos utilizados para sistemas de controle de rastreamento foi desenvolvido por Chojnacki e Teneta (2004). Neste, os autores utilizam um sistema mecânico padrão, cujo esquema cinemático é apresentado na Figura 22.



**Figura 22 – Diagrama cinemático do Sistema de Rastreamento (fonte: Chojnacki e Teneta, 2004)**

A análise da eficiência de cada algoritmo proposto foi feita sobre o mesmo sistema mecânico considerando-se a quantidade de energia elétrica gerada para cada diferente situação de controle.

Comparando um sistema fixo e um sistema móvel com as mesmas características elétricas, foi observado um aumento de aproximadamente 22% na geração de

energia elétrica utilizando-se um algoritmo com elevado grau de complexidade, que combina cálculos baseados no tempo com indicações do sensor direcional de radiação e um discriminador do nível de insolação. Os intervalos de tempo de reposicionamento do painel são definidos a partir do máximo erro de posicionamento permitido para o painel fotovoltaico (CHOJNACKI e TENETA, 2004).

### **3.5 Motores de Passo**

#### **3.5.1 Princípios de Operação**

Segundo Avolio (2004), a operação de um motor de passo baseia-se no princípio da atração e repulsão magnética. É um tipo de motor com controle digital, que converte pulsos digitais em movimento rotativo. O movimento de rotação de seu eixo é feito em passos, com um deslocamento angular pré-determinado, chamado de ângulo de passo.

O seu deslocamento é diretamente proporcional ao número de pulsos, e a velocidade de rotação está relacionada com a frequência destes pulsos. Estes pulsos são sinais elétricos de tensão que são enviados por um controlador ao conversor (*driver*) que alimenta o motor, e são definidos como uma seqüência de chaveamento, ligando e desligando (*ON* e *OFF*) uma fonte de alimentação.

Os motores de passo são compactos, mas tem capacidade para produzir alto conjugado, proporcionando excelente aceleração e movimentos rápidos. A diferença básica entre um motor CC e um motor de passo é que ao aplicar-se uma tensão em um motor CC, este desenvolve conjugado e rotação. Já em um motor de passo, este desenvolve apenas conjugado, sendo que para o motor girar, a tensão aplicada deve ser comutada ou chaveada.

A comutação ou chaveamento é o princípio pelo qual a corrente que flui pelos enrolamentos do motor pode ser alterada, tanto em amplitude como em sentido; a aplicação das correntes nos enrolamentos de um motor de passo permite que este desenvolva um movimento contínuo ou um posicionamento ponto a ponto.

Basicamente existem três tipos de motores de passo: de relutância chaveado, de imã permanente e híbrido. A diferença entre eles está na forma construtiva do rotor, que pode utilizar imã permanente e/ou material ferromagnético. Normalmente, os enrolamentos do motor estão no estator, sendo que todo processo de comutação é feito

externamente ao motor, através do conjunto controlador-conversor. Isto proporciona baixo desgaste e por conseqüência, baixa manutenção, por não haver contatos de comutação internos ao motor.

Para muitas aplicações, existe a possibilidade de escolher-se entre um servo-motor e um motor de passo. Ambos os tipos de motores oferecem oportunidades similares para um posicionamento preciso, mas eles diferem em vários aspectos.

Os servo-motores requerem um sistema de controle com algum tipo de realimentação analógica. Normalmente, isto envolve a utilização de um dispositivo de realimentação para estabelecer a posição do rotor, e fornecer um sinal ao motor, mostrando a diferença entre a posição desejada e a posição atual. Estes motores são indicados para aplicações que requerem alto conjugado em altas velocidades e operam em regime contínuo.

Por outro lado, os motores de passo têm a grande vantagem do custo reduzido, sendo os mais indicados para aplicações que requerem alto conjugado em baixas velocidades, e principalmente, onde as exigências dinâmicas não são tão severas, como num sistema de simples posicionamento.

Por se tratar de sinais digitais, fica fácil compreender a versatilidade dos motores de passo. São motores que apresentam uma gama de rotação muito ampla que pode variar de zero até 7200 rpm; apresentam boa relação peso/potência; permitem a inversão de rotação em pleno funcionamento; alguns motores possuem precisão de 97%; possuem ótima frenagem do rotor e podem mover-se passo-a-passo.

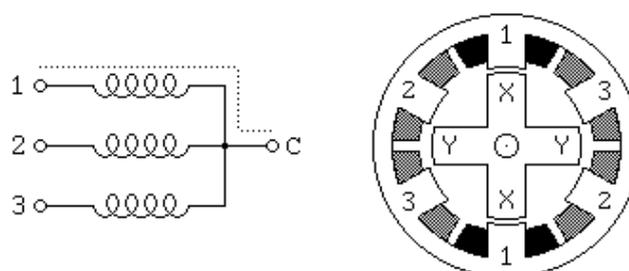
### **3.5.2 Tipos de motores de passo**

#### **3.5.2.1 Motor de passo de relutância chaveado (SRM)**

O motor de passo de relutância chaveado não utiliza imã permanente em seu rotor. Como resultado o motor pode girar livremente, pois não tem conjugado de retenção. Um motor de relutância chaveado tem geralmente três enrolamentos, conectados como no diagrama da Figura 23 com um terminal comum (C) para todos os enrolamentos, normalmente ligado ao terminal positivo da fonte de alimentação, sendo que os enrolamentos são energizados em seqüência.

Com o enrolamento “1” energizado, os dentes do rotor marcados com “X” serão atraídos aos pólos deste enrolamento. Se a corrente que flui pelo enrolamento “1” é retirada e o enrolamento “2” é energizado, o rotor girará  $30^\circ$  no sentido horário, de modo tal que os pólos marcados com “Y” se alinharem com os pólos do enrolamento “2”.

Para este motor girar continuamente é necessário energizar os 3 enrolamentos em seqüência.



**Figura 23 – Esquema de Ligação e Corte Transversal – Motor de Relutância Chaveado**

Existem também motores de relutância chaveados com 4 e 5 enrolamentos; o princípio para alimentar estes motores é o mesmo que para o de 3 enrolamentos, mas torna-se importante desenvolver uma seqüência correta para energizar os enrolamentos, de modo que o motor gire adequadamente.

A geometria do motor ilustrado na Figura 23 produz um deslocamento de  $30^\circ$  por passo; utilizando-se um número maior de dentes no rotor e de pólos no estator, é possível a obtenção de ângulos de passos menores.

### **3.5.2.2 Motor de passo de imã permanente**

O motor de passo de imã permanente tem o rotor formado por ímãs permanentes, com magnetização perpendicular à rotação do eixo.

Neste tipo de motor o deslocamento ocorre através da energização dos enrolamentos em seqüência, com o rotor seguindo as mudanças do campo magnético criado pelas correntes nos enrolamentos.

### 3.5.2.3 Motor de passo híbrido

O motor de passo híbrido combina as vantagens dos motores de passo de relutância chaveado e de imã permanente. O motor de passo híbrido tem tanto os pólos do estator como os pólos do rotor dentados, como mostrado na Figura 24.

Este tipo de motor tem um alto conjugado de retenção, com características dinâmicas e conjugado estático excelentes, podendo operar com altas frequências de chaveamento.

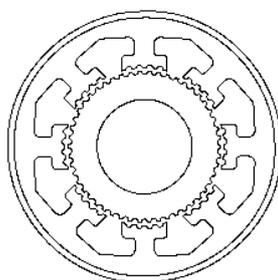


Figura 24 – Seção transversal de um motor de passo híbrido

### 3.5.3 Tipos de enrolamentos para motores de passo

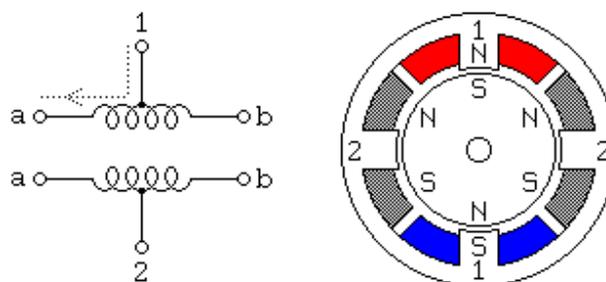
Os motores de passo podem ser tanto bipolares, necessitando duas fontes de alimentação (ou uma única fonte com polaridade reversível), ou unipolares, necessitando apenas uma fonte de alimentação simples. São alimentados por fonte de corrente contínua e requerem controlador digital para produzir as seqüências de pulsos necessárias para sua rotação. A realimentação nem sempre é necessária para o seu controle, embora o uso de um *encoder* ou outro sensor de posição possa melhorar a precisão no posicionamento quando isto for essencial.

#### 3.5.3.1 Motor de passo unipolar

O enrolamento de um motor de passo unipolar, de imã permanente ou híbrido, tem normalmente 5 ou 6 condutores como mostrado na Figura 25. Em cada enrolamento existe um *tap-central*. Estes *taps* são normalmente conectados ao terminal

positivo da fonte de alimentação, sendo que os outros terminais dos enrolamentos são conectados alternadamente ao “terra”, para inverter o sentido do campo magnético criado por cada enrolamento.

Ainda na Figura 25 apresenta-se a Seção Transversal de um motor de passo de ímã permanente com um deslocamento de  $30^\circ$  por passo. O enrolamento “1” do motor é distribuído entre as partes superior e inferior dos pólos do estator, enquanto que o enrolamento “2” é distribuído entre parte esquerda e direita dos pólos do estator. O rotor é de ímã permanente, com 6 pólos, sendo 3 pólos “S” e 3 pólos “N”, arranjados ao redor de sua circunferência.



**Figura 25 – Diagrama de ligação e Seção Transversal de um Motor de Passo Unipolar**

Para melhorar a resolução angular (precisão no posicionamento), o rotor deve ser construído com um número maior de pólos. O motor mostrado na figura tem um passo de  $30^\circ$ , sendo um dos projetos de motores de passo mais comuns. Entretanto, também são muito comuns motores com passos de  $15^\circ$  e  $7,5^\circ$ . Os motores de passo de ímã permanente com boa resolução têm um deslocamento de  $1,8^\circ$  por passo, enquanto que os híbridos são normalmente construídos para um deslocamento de  $3,6^\circ$  e  $1,8^\circ$  por passo, com a possibilidade de uma resolução de até  $0,72^\circ$  por passo.

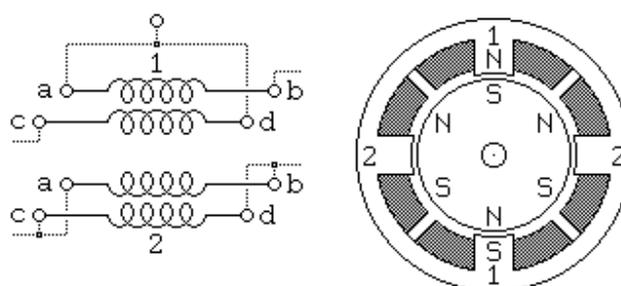
Como mostrado na Figura 25, a corrente fluindo do *tap* central do enrolamento “1” para o terminal “a”, faz com que o pólo superior do estator se torne um pólo “N”, enquanto que o pólo inferior do estator se torne um pólo “S”. Com isto, o rotor é atraído para a posição mostrada. Se a corrente do enrolamento “1” é retirada e o enrolamento “2”



### 3.5.3.3 Motor de passo bifilar

Enrolamentos bifilares em um motor de passo são aplicados à mesma geometria de estator e rotor dos motores de passo bipolares, mas ao invés de se utilizar apenas um fio para cada enrolamento, cada uma das bobinas do estator é enrolada com 2 fios em paralelo, resultando em motores com 8 terminais, em lugar dos 4 terminais normalmente utilizados.

Na prática, os motores com enrolamento bifilar são sempre alimentados da mesma maneira que os motores unipolares ou bipolares. A Figura 27 mostra as ligações alternativas para os enrolamentos deste tipo de motor.



**Figura 27 – Diagrama de ligação e Seção Transversal de um Motor de Passo Bifilar**

Para usar um motor bifilar como unipolar, os 2 terminais de cada bobina são ligados em série e o ponto de conexão é usado como tap central. O enrolamento “1” mostrado na Figura 27 é ligado desta forma.

Para usar um motor bifilar como bipolar, os 2 terminais de cada enrolamento podem ser ligados em paralelo ou em série. O enrolamento “2”, na Figura 27, é mostrado com a ligação em paralelo; isto permite uma operação com tensão menor e corrente maior. O enrolamento “1” é mostrado com a ligação em série e se o tap-central for ignorado pode-se operar com tensão duas vezes maior e com uma corrente igual à metade daquela com os enrolamentos em paralelo.

### 3.5.4 Características de um motor de passo

Para especificar-se um motor de passo para uma dada aplicação é necessário verificar se suas características atendem aos requisitos exigidos pela aplicação. As características principais de um motor de passo são as suas características dinâmicas, que definem a relação entre o conjugado e velocidade na partida e em movimento, e as características estáticas, que definem a relação entre o conjugado e o deslocamento angular do rotor, quando o motor está parado ou quando está com o rotor bloqueado.

#### 3.5.4.1 Características dinâmicas

A curva característica do conjugado em função da velocidade é a característica mais comum para expressar o desempenho de um motor de passo. Nesta curva, o eixo horizontal expressa a velocidade do motor em pulsos por segundo, enquanto que o eixo vertical expressa o conjugado desenvolvido.

A velocidade é definida pela taxa de pulsos (frequência de pulsos) enviada ao motor por segundo. Em um motor de passo, a velocidade em rotações por minuto é proporcional à velocidade em pulsos por segundo e depende da característica construtiva do motor (ângulo de passo).

A curva característica do conjugado em função da velocidade é, normalmente, obtida para o conjunto motor-conversor e, portanto pode ter uma grande variação em função do conversor utilizado. Existem duas curvas para representar a relação entre o conjugado desenvolvido e a velocidade, como mostrado na Figura 28: a curva característica de partida (*pull-in torque*) e a curva característica de operação em movimento (*pull-out torque*).

A característica de partida mostra a faixa de valores de conjugado de carga na qual o motor pode partir ou parar, com uma frequência fixa, sem perder o sincronismo dos passos, enquanto a característica de operação em movimento é a curva característica de conjugado que o motor pode desenvolver durante a aceleração, até o ponto de operação em regime permanente.

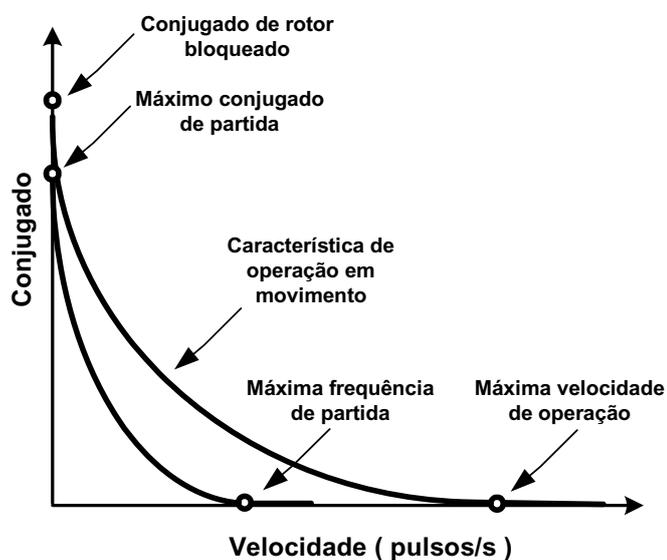


Figura 28 – Curvas características do conjugado em função da velocidade

A diferença entre estas curvas mostradas na Figura 28 é o conjugado de perdas devido à aceleração da inércia do rotor. Na curva característica mostrada na Figura 28 existem ainda mais 2 pontos importantes: um que mostra a máxima velocidade de operação ( $f_r$ ), quando o conjugado de carga (atrito e inércia) é desprezível e, o ponto da máxima frequência de partida ( $f_s$ ), na qual o motor pode partir ou parar instantaneamente (sem tempos de aceleração ou desaceleração), quando o conjugado de carga (atrito e inércia) é desprezível.

Um dos pontos mais importantes na curva característica é o que representa o conjugado disponível na condição de rotor bloqueado (*holding torque*); este valor é o conjugado máximo que o motor pode desenvolver na condição de rotor bloqueado, quando está alimentado com corrente nominal.

Outra característica também utilizada na especificação de motores, é a curva que mostra a relação entre a frequência de partida e a inércia da carga. A Figura 29 apresenta uma curva típica de frequência de partida por inércia de carga, com valores particulares do exemplo apresentado.

Devido à inércia de carga podem ocorrer atrasos ou avanços na posição do eixo do motor durante as partidas ou paradas instantâneas. Esta curva característica mostra os valores de inércia permissíveis em função da frequência de pulsos, para que não

aconteça a perda de sincronismo do ângulo de passo. O valor da frequência imediatamente antes de acontecer a perda de sincronismo é chamada de máxima frequência de partida.

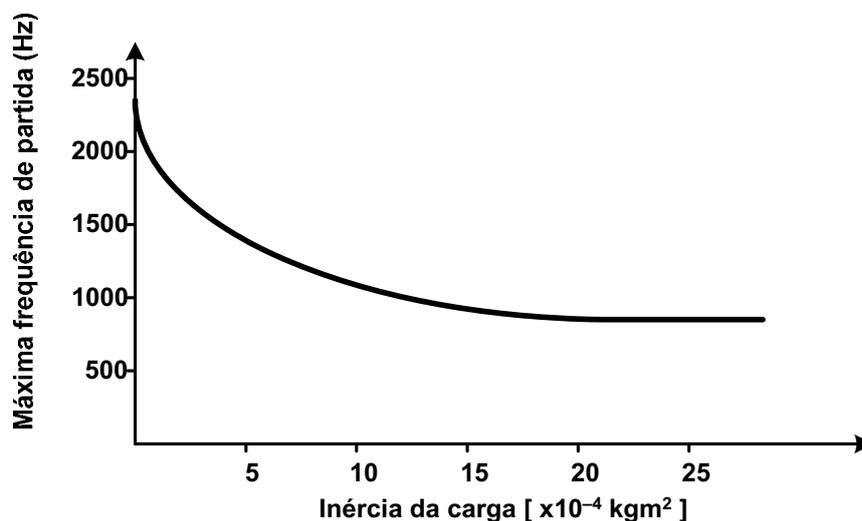


Figura 29 – Frequência de partida em função da inércia da carga

### 3.5.4.2 Características estáticas

A curva característica do conjugado em função do deslocamento angular mostra a relação entre o deslocamento angular do rotor e o conjugado que é aplicado ao eixo do motor, quando o motor é energizado com tensão nominal. Esta curva característica tem um comportamento aproximadamente senoidal, cujo formato depende da geometria do estator e do rotor. Esta curva é mostrada na Figura 30.

Com o motor mantido na posição de equilíbrio estável do ponto “1” aplicado um torque externo no eixo, o motor desenvolverá um conjugado  $T(+)$  fazendo o rotor se deslocar para a esquerda, tentando fazer o eixo retornar ao ponto de equilíbrio estável “1”, com o eixo parando quando o torque externo se igualar ao conjugado desenvolvido.

Se um torque externo adicional for aplicado ao eixo do motor, o conjugado desenvolvido aumentará (ponto “2”), até atingir um valor máximo (ponto “3”) que representa o valor do conjugado de rotor bloqueado  $T_h$  ( *Holding Torque*). Quando o torque externo exceder este valor de conjugado, o rotor se moverá para um ponto de equilíbrio

instável (ponto “5”) e pontos posteriores, produzindo um conjugado no mesmo sentido do torque externo  $T(-)$ ; neste caso, o motor se moverá para o próximo ponto de equilíbrio estável (ponto “1”) e parará.

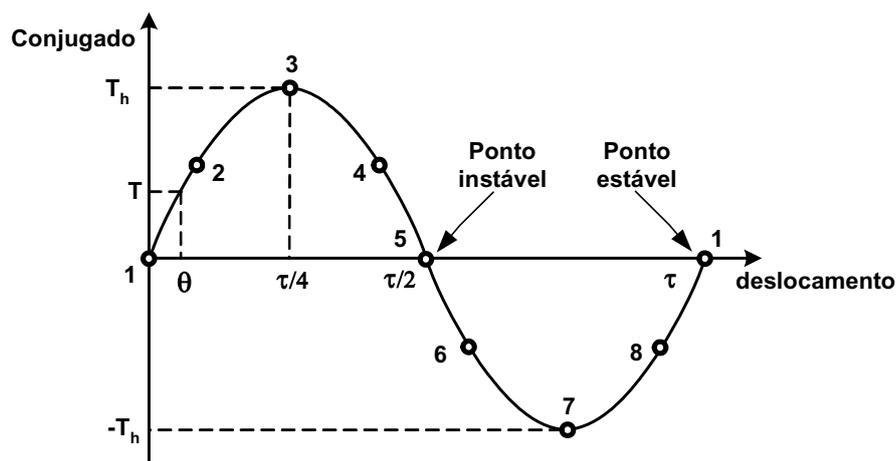


Figura 30 – Característica do conjugado em função do deslocamento angular do rotor

Os pontos de equilíbrio estável estão localizados, na característica estática, nos pontos onde o motor pára, com os dentes do estator e do rotor exatamente alinhados. Estes pontos são extremamente estáveis e o rotor parará nestes pontos sempre que não existir torque externo aplicada ao seu eixo.

Os pontos de equilíbrio instável estão localizados, na característica estática, nos pontos onde o alinhamento entre os dentes do estator e do rotor for menor que a distância correspondente a meio passo de deslocamento. Estes pontos são extremamente instáveis, tal que se o rotor estiver num destes pontos, ele se moverá para a direita ou para a esquerda, sempre que um pequeno torque for aplicado.

Sem alimentação em qualquer enrolamento, o conjugado nem sempre será nulo. No caso dos motores de relutância chaveados, o magnetismo residual no circuito magnético do motor pode produzir um pequeno conjugado residual, e nos motores de ímã permanente e híbrido, a combinação da geometria dos pólos e o rotor permanentemente magnetizado pode produzir um conjugado residual significativo, mesmo sem alimentação.

O conjugado residual em um motor de imã permanente ou híbrido é freqüentemente referido como o conjugado de retenção do motor. Os projetos mais comuns de motor proporcionam um conjugado de retenção que varia senoidalmente com o ângulo do rotor, com uma posição de equilíbrio em todos os passos e uma amplitude em média de aproximadamente 10% do conjugado máximo do motor, podendo atingir valores de até 23% para motores pequenos e de 26% para motores de médio porte.

### **3.5.5 Precisão do ângulo de passo**

Os motores de passo, quando operam em vazio, trabalham com erros de posicionamento muito pequenos, podendo manter ângulo de passo com uma precisão de  $\pm 0,05^\circ$ . Este discreto erro surge da diferença entre a precisão mecânica nos dentes do estator e do rotor e variações na precisão elétrica da resistência DC do enrolamento do estator.

A precisão de parada é definida como sendo a diferença entre o ângulo de parada teórico e o ângulo de parada real. Seu valor é obtido pela diferença entre os valores máximo e mínimo de erro em um deslocamento de um passo pleno.

### **3.5.6 Modos de operação**

O modo de operação de um motor de passo depende do tipo de sinal que o conversor recebe do controlador para converter em potência. Os controladores para acionamento de motores de passo podem gerar 3 tipos de resoluções que definirão os modos de operação do motor: operação em passo pleno, meio-passo e micro-passo.

#### **3.5.6.1 Operação a Passo pleno**

O motor de passo opera no modo de passo pleno quando os posicionamentos ocorrem nos pontos de equilíbrio estável. Se ao atingir uma posição de equilíbrio, os sinais do controlador forem removidos, o motor não se moverá desta posição devido seu conjugado de rotor bloqueado. Os motores de passo convencionais têm, normalmente, um rotor com 200 dentes, o que proporciona uma característica de deslocamento de 200 passos plenos por rotação de seu eixo. Com isso o deslocamento referente a um passo

pleno será igual a  $1,8^\circ$ . Normalmente, a operação com passo pleno é feita com a energização dos 2 enrolamentos do motor ao mesmo tempo, invertendo-se o sentido da corrente em cada um deles alternadamente.

### **3.5.6.2 Operação a Meio-passo**

O motor de passo opera no modo de meio-passo quando os posicionamentos ocorrerem nos pontos intermediários dos pontos de equilíbrio estável. Este tipo de operação proporciona uma alta resolução, com um deslocamento suave na faixa de velocidade de operação do motor. Neste caso, se os sinais do controlador forem removidos, o motor se moverá desta posição de meio-passo para uma posição de equilíbrio estável. Os motores de passo convencionais com 200 dentes no rotor, operando no modo de meio-passo, têm uma característica de deslocamento de 400 passos por rotação de seu eixo. Com isso o deslocamento correspondente a cada passo será igual a  $0,9^\circ$ . Este modo de operação é uma solução prática para aplicações industriais, quando é necessário melhorar a resolução do deslocamento, porém o motor tem sua capacidade de conjugado desenvolvido reduzida, em relação à operação com passo pleno.

### **3.5.6.3 Operação a Micro-passo**

O motor de passo opera no modo de micro-passo quando os posicionamentos ocorrem numa fração daquele referente à operação com passo pleno. Neste caso, se os sinais do controlador forem removidos, o motor se moverá desta posição de micro-passo para uma posição de equilíbrio estável. Este tipo de deslocamento somente pode ser obtido se a característica do controlador permitir que ele gere sinais de pulsos com frequências muito altas. Neste tipo de operação a fração de deslocamento pode estar entre 1/100 até 1/50.000 de um passo pleno, sendo que a utilização deste modo é feita somente quando a aplicação requer uma resolução de posicionamento muito precisa, dentro da faixa de velocidade de operação do motor.

### 3.6 Controlador Lógico Programável

Com o objetivo de utilizar uma única unidade computacional para controlar o sistema de movimento e realizar a aquisição dos dados necessários para análise do funcionamento do sistema completo, optou-se pelo uso de um Controlador Lógico Programável (CLP), equipamento que reúne as características desejáveis para tais aplicações, por ser compacto, de simples programação e operação, além de apresentar custo acessível.

Para uma completa familiarização com este tipo de equipamento e a perfeita utilização dos recursos que o mesmo oferece, um aprofundamento no estudo de sua estrutura de *hardware* e *software* fez-se necessário, e os resultados deste estudo são apresentados neste tópico, com especial destaque às informações obtidas de Pereira (2007a), WIKIPEDIA, e Dakol (2007).

#### 3.6.1 Características Gerais

Na década de 60, o aumento da competitividade fez com que a indústria automotiva buscasse a melhoria no desempenho de suas linhas de produção, aumentando tanto a qualidade quanto a produtividade.

Uma saída possível, imaginada pela General Motors, seria um sistema baseado no computador. Assim, em 1968, a Divisão Hydramatic da GM determinou os critérios para projeto do CLP, sendo que o primeiro dispositivo a atender às especificações foi desenvolvido pela empresa Gould Modicon em 1969.

Os CLPs, inicialmente concebidos a partir de microcontroladores, evoluíram de uma simples unidade capaz de fornecer sinais de saída lógicos a partir da aplicação de funções lógicas sobre os sinais lógicos de suas entradas, para sistemas mais complexos, capazes de fornecer saídas analógicas em função da aplicação de algoritmos sofisticados sobre suas entradas analógicas e digitais.

Inicialmente estes dispositivos foram utilizados para substituir os complexos quadros de controle, constituídos na maioria das vezes de uma grande quantidade de botoeiras e contadores interligados por uma teia de fios, a fim de proporcionar maior versatilidade nas mudanças de configuração bem como facilitar as atividades de manutenção.

As principais características desejadas nos novos equipamentos de estado sólido, com a flexibilidade dos computadores, eram:

- Preço competitivo com os sistemas a relés;
- Dispositivos de entrada e de saída facilmente substituíveis;
- Funcionamento em ambiente industrial (vibração, calor, poeira, ruídos);
- Facilidade de programação e manutenção por técnicos e engenheiros;
- Repetibilidade de operação e uso.

Inicialmente, os CLP's foram chamados de PC's – *Programmable Controllers*, mas com o advento dos Computadores Pessoais (PC's – *Personal Computers*), convencionou-se PLC's para evitar conflitos de nomenclatura. Traduzida para a língua portuguesa, a abreviatura CLP tornou-se padrão.

Originalmente os CLP's realizavam as mesmas funções de controle discreto (*on/off* – liga/desliga), que os sistemas a relés, com a vantagem de serem facilmente instalados, economizando espaço e energia, além de possuírem indicadores de diagnósticos que facilitavam a manutenção. Uma eventual necessidade de alteração na lógica de controle da máquina era realizada em pouco tempo, apenas com mudanças no programa, sem necessidade de alteração nas ligações elétricas.

A década de 70 marcou uma fase de grande aprimoramento dos CLP's. Com as inovações tecnológicas dos microprocessadores, maior flexibilidade e um grau também maior de inteligência, os Controladores Lógicos Programáveis passaram a incorporar:

- 1972 – Funções de temporização e contagem;
- 1973 – Operações aritméticas, manipulação de dados e comunicação com computadores;
- 1974 – Comunicação com Interfaces Homem-Máquina;

- 1975 – Maior capacidade de memória, controles analógicos e controle PID;
- 1979/80 – Módulos de entrada/saída (I/O) remotos, módulos inteligentes e controle de posicionamento.

Nos anos 80, novos aperfeiçoamentos foram agregados, fazendo do CLP um dos equipamentos mais atraentes na Automação Industrial. A possibilidade de comunicação através de redes digitais integradas (1981), através protocolos desenvolvidos especificamente para uso em sistemas de controle de processos, é hoje uma característica indispensável na indústria. Além dessa evolução tecnológica, foi atingido um alto grau de integração, tanto no número de pontos quanto no tamanho físico, que possibilitou o fornecimento de minis e micros CLP's (a partir de 1982).

Os CLP's atuais, dentre outras, apresentam as seguintes características:

- Módulos de I/O de alta densidade (grande número de Pontos de I/O por módulo);
- Módulos remotos controlados por uma mesma Unidade Central de Processamento (CPU);
- Módulos inteligentes (co-processadores que permitem realização de tarefas complexas como controle PID, posicionamento de eixos, transmissão via rádio ou modem, leitura de código de barras);
- *Softwares* de programação em ambiente *Windows* (facilidade de programação);
- Integração com Aplicativos *Windows* (Access, Excel, Visual Basic) para comunicação com outros CLP's;
- Recursos de monitoramento da execução do programa, diagnósticos e detecção de falhas;
- Instruções avançadas que permitem operações complexas (ponto flutuante, funções trigonométricas);

- Tempos de Varredura (*Scan Time*) reduzidos (maior velocidade de processamento) devido à utilização de processadores dedicados;
- Processamento paralelo (sistema de redundância), proporcionando confiabilidade na utilização em áreas de segurança;
- Pequenos e micros CLP's que oferecem recursos de *hardware* e de *software* dos CLP's maiores;
- Conexão de CLP's em rede (conexão de diferentes CLP's na mesma rede, comunicação por meio de Rede Ethernet).

O mercado recebe constantemente novos e melhores produtos que agregam valores, ao mesmo tempo em que reduzem o custo das soluções baseadas em CLP's.

### 3.6.2 Características de Hardware e Software

O Controlador Lógico Programável pode ser definido como um dispositivo de estado sólido – um Computador Industrial, capaz de armazenar instruções para implementação de funções de controle (seqüência lógica, temporização e contagem, por exemplo), além de realizar operações lógicas e aritméticas, manipulação de dados e comunicação em rede. Sua estrutura funcional é composta de uma parte física (*hardware*) e uma parte lógica (*software*), sendo que a parte física pode ser subdividida em duas seções principais: a CPU (do inglês, *Central Processing Unit*) e o sistema de interface para as entradas e saídas (I/O).

A CPU é o principal bloco construtivo do sistema e tem por função controlar toda a atividade do CLP; pode ser subdividida em dois outros blocos, o processador (que pode ser microprocessador, microcontrolador ou processador dedicado), e o sistema de memória. No sistema de memória são armazenados o programa de controle e os dados que necessitem ser utilizados pelo programa de controle, ou eventualmente dados que o usuário deseja armazenar para futura utilização.

O sistema de entradas e saídas é fisicamente conectado aos dispositivos de campo, que podem ser sensores (de umidade, de temperatura, de corrente, de tensão, de estado lógico, etc.) ou atuadores (por exemplo, chaves, dispositivos de potência, etc.), e tem como função receber e enviar os sinais que chegam e saem da CPU, informando a esta os estados dos dispositivos sob controle (entradas) e atuando sobre os dispositivos a serem controlados (saídas).

Os circuitos de entrada e de saída podem ser internos à CPU, compostos por circuitos integrados especialmente incorporados para esta finalidade, ou externos, conhecidos como expansões modulares. Estes módulos de I/O podem ser escolhidos conforme a aplicação e podem operar com sinais analógicos ou digitais.

Para operar, a CPU lê os dados de entrada através dos sensores conectados à sua interface de entrada, para então executar as tarefas definidas pelo programa de controle (aplicativo) armazenado em sua memória. Após o processamento das informações de entrada, a CPU envia os dados de controle à interface de saída, para que os atuadores interfiram nas tarefas do processo sob controle.

Além dos blocos anteriormente descritos, podem ainda compor o sistema CLP uma fonte de alimentação, normalmente comum à CPU e às expansões, além de um rack ou uma base que proporcione a conexão mecânica e elétrica entre os diversos componentes, contendo o barramento de comunicação entre eles, no qual os sinais de dados, endereço, controle e tensão de alimentação estão presentes.

### **3.6.3 Linguagem de Programação**

A programação do CLP é geralmente realizada utilizando-se da lógica Ladder, e é bastante similar a um esquema de conexões utilizado originalmente nos circuitos de controle com relés (QUINTAS, 2006; DAKOL, 2007; PEREIRA, 2007b).

Mesmo tendo sido a primeira linguagem destinada especificamente à programação de CLP's, a lógica Ladder mantém-se ainda como a mais utilizada, estando presente praticamente em todos os CLP's disponíveis no mercado. Por ser uma linguagem gráfica, baseada em símbolos semelhantes aos encontrados nos esquemas elétricos (contatos e bobinas), as possíveis diferenças existentes entre os fabricantes de CLP's, quanto à

representação das instruções, são facilmente assimiladas pelos usuários, como exemplificado na Figura 31.

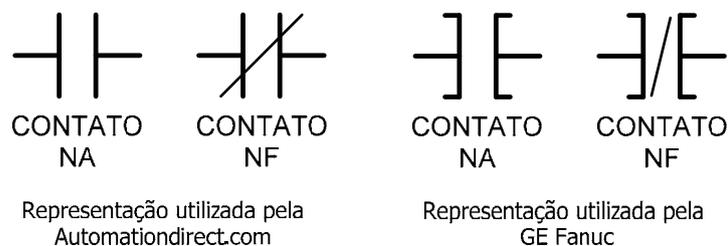


Figura 31 – Exemplos de representação de instruções no Ladder

Na Figura 32 é apresentado o esquema conceitual de um sistema CLP, no qual as entradas físicas reais estão fixadas a um módulo de entrada (esquerda), enquanto as saídas estão fixadas a um módulo de saída (direita). No centro, vê-se a representação lógica que a CPU deve processar, na linguagem Ladder. Neste caso, se a Entrada 1 (interruptor normalmente aberto) for fechada, a Saída 1 (alarme) é ligada.

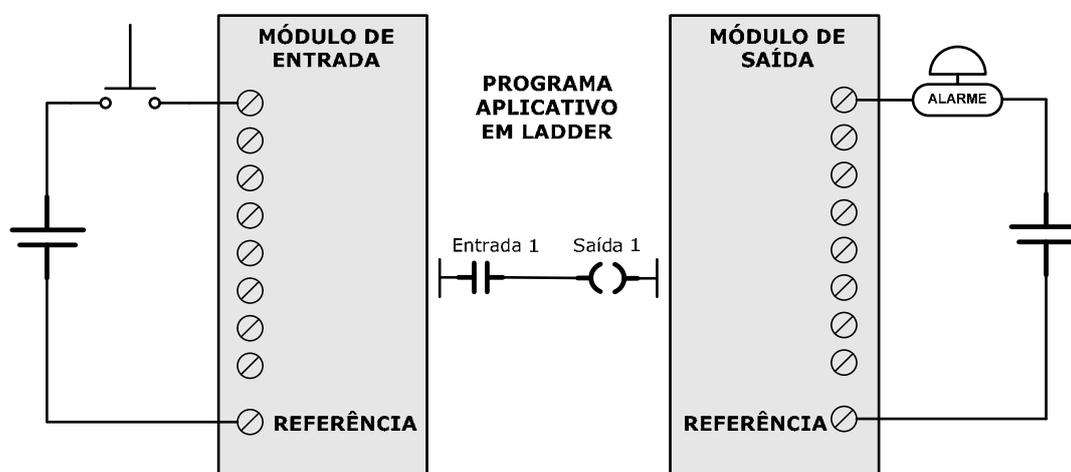


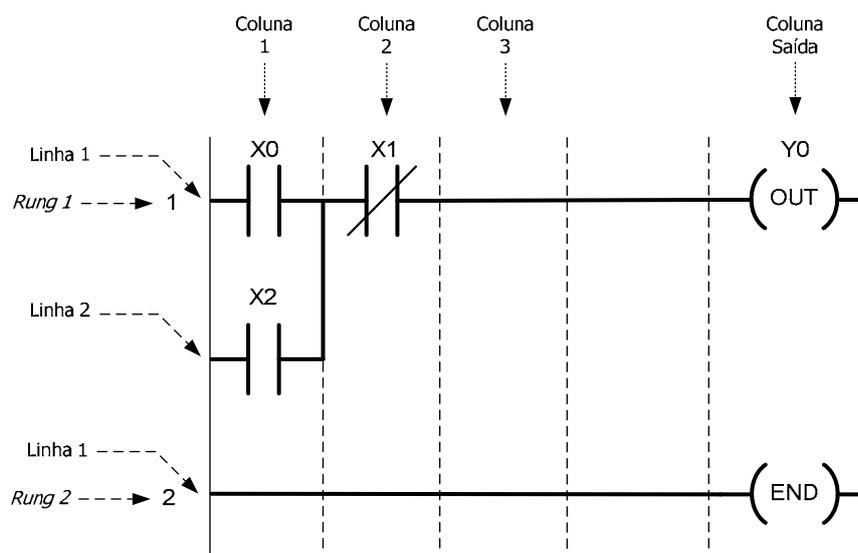
Figura 32 – Esquema conceitual de um sistema CLP

O nome Ladder se deve à representação da linguagem ‘lembrar’ uma escada (do inglês: *ladder*), na qual duas barras verticais paralelas são interligadas pela Lógica de Controle, formando os degraus (*rungs*) da escada. Portanto, a cada Lógica de Controle

existente no Programa de Aplicação dá-se o nome de *rung*, a qual é composta por Colunas e Linhas, conforme apresentado na Figura 33.

A quantidade de Colunas e Linhas, ou Elementos e Associações, que cada *rung* pode conter é determinada pelo fabricante do CLP, podendo variar conforme a CPU utilizada. Em geral, este limite não representa um problema ao usuário durante o desenvolvimento do Programa de Aplicação, pois os *Softwares* de Programação indicam se tal quantidade foi ultrapassada, por meio de erro durante a compilação do Programa de Aplicação.

Cada elemento (contato ou bobina, por exemplo) da Lógica de Controle representa uma Instrução da Linguagem Ladder, sendo alocada em um endereço específico e consumindo uma quantidade determinada de memória (*word*) disponível para armazenamento do Programa de Aplicação, conforme a CPU utilizada.



**Figura 33 – Colunas e Linhas utilizadas na programação em Ladder**

### 3.6.4 Conceitos Básicos da Programação em Ladder

Neste tópico serão apresentados os principais conceitos necessários para o desenvolvimento de Programas de Aplicação em Linguagem Ladder. Estes conceitos são aplicáveis a todos os CLP's, independente do fabricante e de recursos disponíveis na CPU utilizada.

#### 3.6.4.1 Instrução END

Todo programa em Linguagem Ladder deve ter uma Instrução END, indicando o seu final. Trata-se de uma bobina e é classificada como Instrução de Controle do Programa (vide Figura 34). É uma Instrução incondicional, não admitindo qualquer tipo de Elemento em sua Lógica de Controle. Toda Instrução localizada após a Instrução END não será executada pelo Programa de Aplicação, com exceção das instruções de Interrupção, Sub-Rotinas e Controles Específicos (Mensagens, por exemplo). A não-existência da Instrução END no Programa de Aplicação gera um 'Erro Fatal', fazendo com que a CPU não permaneça em Modo de Execução (RUN).

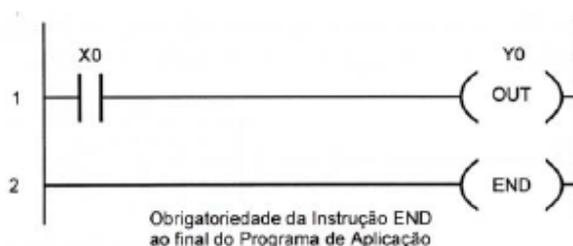
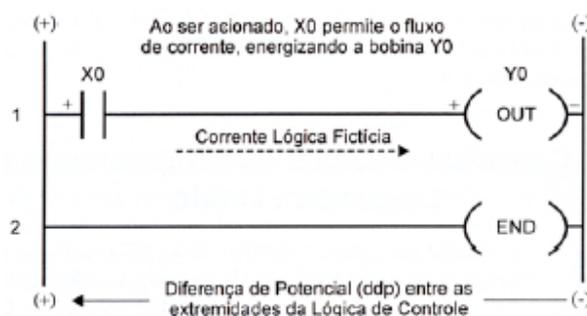


Figura 34 – Escada com a instrução END ao final do ciclo de execução

#### 3.6.4.2 Corrente Lógica Fictícia

Para que uma bobina (ou outro Elemento de Saída – temporizador, contador ou bloco de função, por exemplo) seja acionada (instrução executada), faz-se necessário “energizá-la logicamente”. Assim, utiliza-se o conceito de Corrente Lógica Fictícia, ou seja, supondo que entre as barras verticais que 'sustentam' toda a Lógica de Controle haja uma diferença de potencial (a barra da esquerda com potencial positivo e a barra da direita

com potencial negativo, por exemplo), haverá a circulação de corrente da esquerda para a direita se a Lógica de Controle der condições para tal. A este conceito dá-se o nome de Corrente Lógica Fictícia (vide Figura 35).

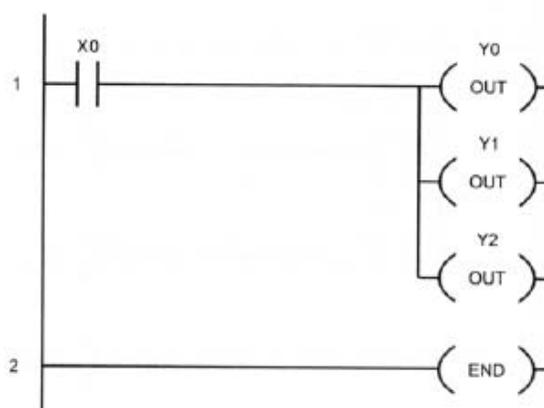


**Figura 35 – Escada com a ilustração da Corrente Lógica Fictícia**

No diagrama Ladder da Figura 35 é possível observar que, se o Contato de X0 (Normalmente Aberto) estiver acionado – condição para que haja o fluxo de corrente entre as extremidades da Lógica de Controle – a bobina de Y0 será energizada, acionando esta saída (por meio da instrução OUT). Caso contrário, a bobina de Y0 não será energizada (não sendo submetida a uma 'ddp lógica'), mantendo a saída desligada.

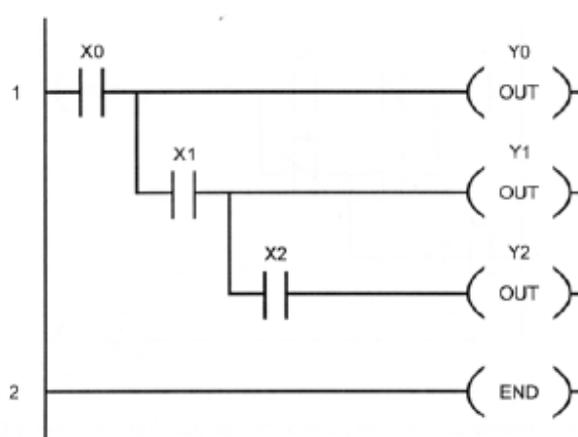
### 3.6.4.3 Implementação da Lógica de Controle

A lógica Ladder permite o acionamento de vários elementos de saída (bobinas, temporizadores, contadores, etc.) simultaneamente, por meio da mesma Lógica de Controle, sem necessidade de construção de *rungs* similares. O diagrama lógico implementado na Figura 36 determina que, ao ser atuada a Entrada X0, as Saídas Y0, Y1 e Y2 serão acionadas simultaneamente.



**Figura 36 – Acionamento de múltiplas saídas a partir da mesma entrada**

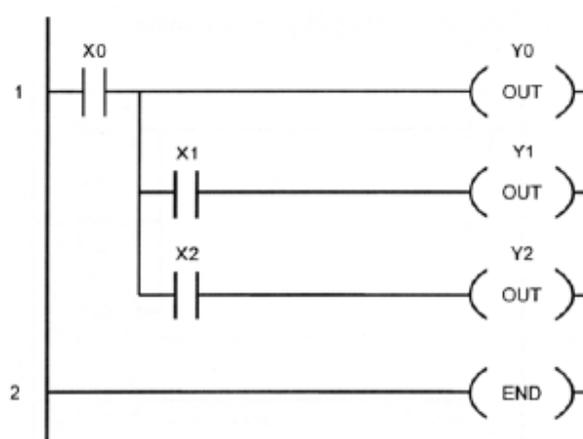
É possível, também, implementar a Lógica de Controle utilizando derivações nas linhas de um determinado *rung*. A Lógica de Controle apresentada na Figura 37 exemplifica esta situação.



**Figura 37 – Acionamento de múltiplas saídas a partir de derivações da entrada**

Esta Lógica determina que a saída Y0 é acionada dependendo apenas da condição da entrada X0 ( $Y0=X0$ ); a saída Y1 é acionada a partir da condição das entradas X0 e X1 ( $Y1=X0.X1$ ) e a saída Y2 é acionada a partir da condição das entradas X0, X1 e X2 ( $Y2=X0.X1.X2$ ). Com este recurso, evita-se a implementação de três Lógicas de Controle, em três *rungs* distintos.

Algumas CPU's podem apresentar restrições quanto à utilização desta forma de implementação da Lógica de Controle. Por exemplo, as CPU's da [Automationdirec.com](http://Automationdirec.com) não permitem que após a derivação, em qualquer linha da Lógica de Controle, haja outro elemento além da(s) saída(s) controlada(s). Se isto ocorrer, haverá indicação de “Erro” após a compilação do Programa de Aplicação. A Figura 38 ilustra esta situação.



**Figura 38 – Lógica de Controle com 2 elementos após a derivação**

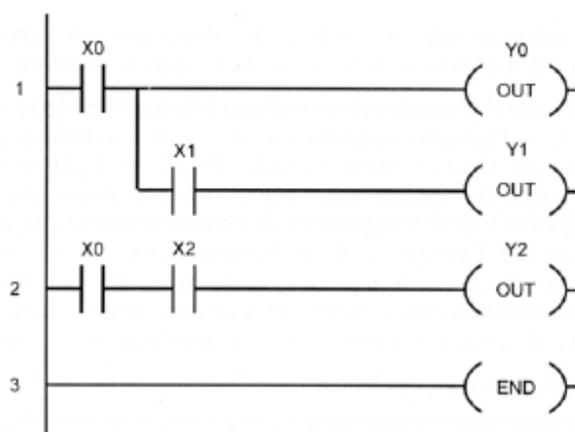
Neste caso, a saída Y0 é acionada apenas a partir da condição da entrada X0 ( $Y0=X0$ ), a saída Y1 é acionada a partir da condição das entradas X0 e X1 ( $Y1=X0.X1$ ) e a saída Y2 é acionada a partir da condição das entradas X0 e X2 ( $Y2=X0.X2$ ).

Uma maneira alternativa de implementar a mesma Lógica de Controle nas CPU's que apresentem tal restrição, é ilustrada na Figura 39.

Uma consideração importante que deve ressaltada aos usuários iniciantes na Lógica Ladder e que pode causar dúvidas aos programadores menos experientes, diz respeito à relação entre a condição do dispositivo de entrada (acionado ou não) e o elemento utilizado na Lógica de Controle (contato normalmente aberto – NA – ou normalmente – NF).

Normalmente, faz-se a associação direta entre o elemento utilizado na Lógica de Controle e a condição do dispositivo de entrada, o que gera tal confusão. Ao se deparar com um programa que tenha Lógica de Controle semelhante àquela apresentada na

Figura 34, acredita-se inicialmente que a saída Y0 estará acionada quando a entrada X0 estiver aberta, tal qual indicado no diagrama lógico. A realidade é exatamente oposta a esta idéia, ou seja, a saída Y0 só estará acionada quando a entrada X0 estiver fechada.



**Figura 39 – Lógica de Controle alternativa a 2 elementos após a derivação**

A relação existente entre a condição dos dispositivos de entrada e o elemento utilizado na Lógica de Controle pode ser definida da seguinte maneira:

“Se o dispositivo de entrada estiver fechado (Ponto de Entrada / Tabela de Imagem das Entradas = 1), o elemento utilizado na Lógica de Controle é atuado, ou seja o Contato NA torna-se fechado (dando condição ao fluxo da Corrente Lógica Fictícia) e o Contato NF torna-se aberto (impedindo o fluxo da Corrente Lógica Fictícia). Caso contrário, se o dispositivo de entrada estiver aberto (Ponto de Entrada / Tabela de Imagem das Entradas = 0), o Elemento utilizado na Lógica de Controle mantém seu estado natural (ou de repouso), sendo que o Contato NA permanece aberto (impedindo o fluxo da Corrente Lógica Fictícia) e o Contato NF permanece fechado (dando condição ao fluxo da Corrente Lógica Fictícia).” Esta definição é resumida na Tabela 4.

Tabela 4 – Relação entre Nível Lógico de Entrada e condição do Elemento de Controle

<i>Dispositivo de entrada</i>	<i>Tabela de Imagem das Entradas</i>	<i>Elemento da Lógica de Controle</i>	<i>Atuação do Contato Lógico</i>	<i>Fluxo de Corrente Lógica</i>
	0		Não	Não
	1		Sim	Sim
	0		Não	Sim
	1		Sim	Não

Conforme visto, independente das características do dispositivo conectado ao Módulo de Entrada (Contato NA ou NF), a Lógica de Controle pode ser implementada com estes contatos referenciados ao mesmo Ponto de Entrada. A Figura 40 apresentada a seguir exemplifica esta situação.

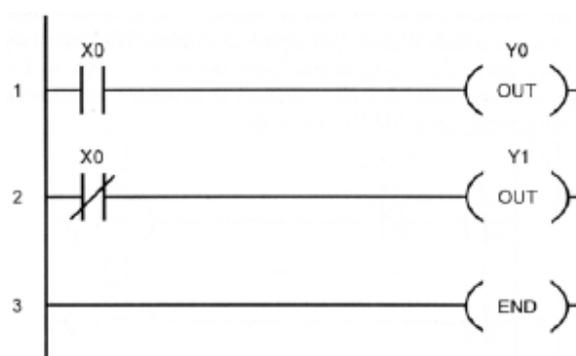


Figura 40 – Contatos NA ou NF referenciados ao mesmo ponto de entrada

A Lógica de Controle implementada na Figura 40 determina que se  $X0=1$  (entrada atuada), será acionada a saída  $Y0$ . Caso contrário, se  $X0 = 0$  (entrada não atuada), será acionada a saída  $Y1$ . Embora a cada ponto de entrada (no caso,  $X0$ ) possa ser conectado apenas um tipo de contato do dispositivo de entrada (NA ou NF), a Lógica de

Controle pode ser implementada de tal forma que realize operações distintas, conforme a atuação ou não do dispositivo de entrada, no caso acionando Y0 ou Y1.

Cada ponto de entrada tem apenas um único endereço a ele relacionado (X0, X1, etc.), porém ele pode ser utilizado tantas vezes quantas forem necessárias para a implementação da Lógica de Controle, ora como Contato NA, ora como Contato NF, tendo como único limite a quantidade de memória disponível ao armazenamento do Programa de Aplicação.

#### **3.6.4.4 Tipos de Dados**

Além dos Pontos de Entrada e Saída Discretos, há outros elementos (ou Tipos de Dados) utilizados na implementação da Lógica de Controle. Embora cada CLP utilize nomenclatura, representação gráfica (Linguagem Ladder) e forma de endereçamento próprias, a equivalência entre os Tipos de Dados disponíveis em CPU's distintas proporciona rápida adaptação ao usuário. Relacionam-se a seguir os principais tipos de dados:

- Entradas Discretas – Tipo de Dado: X
- Saídas Discretas - Tipo de Dado: Y
- Relés de Controle – Tipo de Dado: C
- Temporizadores (*Timers*) e Bits de Status – Tipo de Dado: T
- Valor Atual dos Temporizadores – Tipo de Dado: V (TA)
- Contadores (*Counters*) e Bits de Status – Tipo de Dado: CT
- Valor Atual dos Contadores – Tipo de Dado: V (CTA)
- Variáveis (*Words*) – Tipo de Dado: V
- Relés Especiais (*Special Relays*) – Tipo de Dado: SP

#### **3.6.4.5 Características Gerais do Visilogic**

A partir dos conceitos gerais da lógica Ladder apresentados, resumem-se neste tópico características específicas do pacote Visilogic, que é o nome comercial do programa Ladder oferecido pelo fabricante Unitronics juntamente com os seus CLP's; trabalha

em ambiente Windows e utiliza interface gráfica com recursos específicos para comunicação com os elementos de *hardware* fabricados pela Unitronics.

Para realização das tarefas de programação basta arrastar os elementos e/ou os blocos de funções, a partir da barra de ferramentas, e posicioná-los na posição desejada da net.

Na Figura 41 apresenta-se uma tela do editor de Ladder do Visilogic.

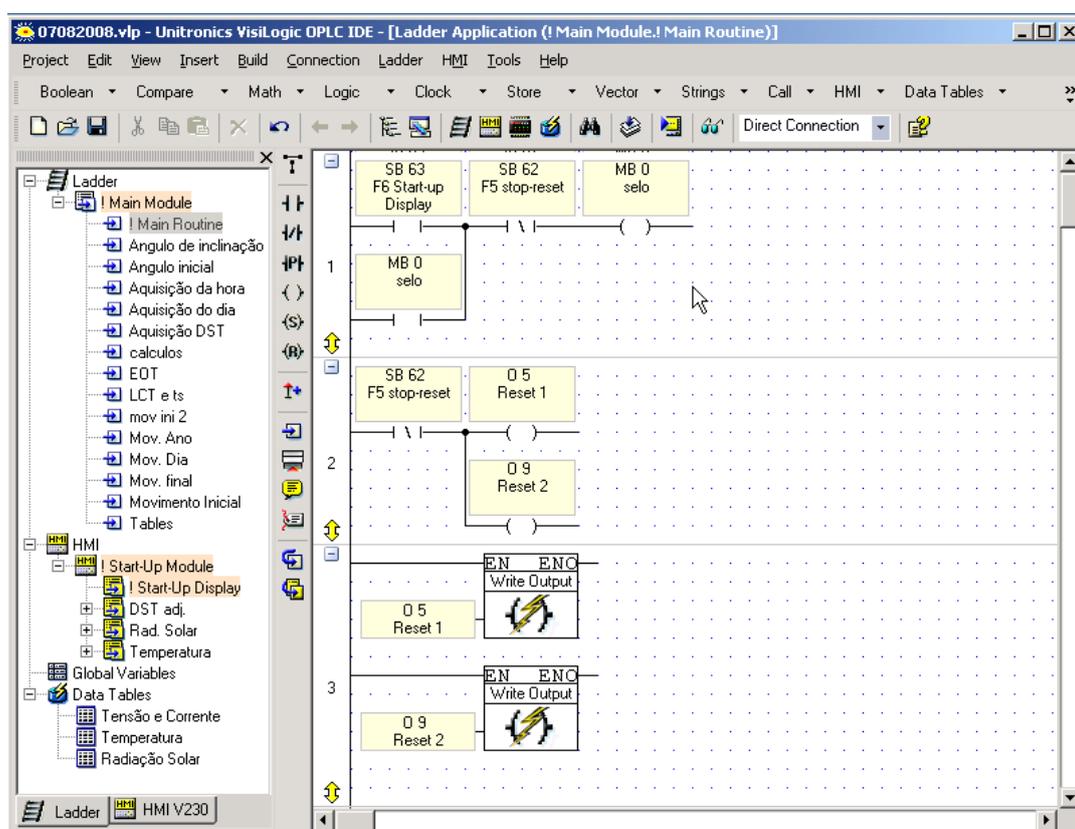


Figura 41 – Exemplo de tela do Editor Ladder do Visilogic

### 3.6.4.6 Estrutura do Aplicativo em Visilogic

Uma vez definida a estrutura de chamada de sub-rotinas, definem-se as tarefas a serem realizadas e como elas serão divididas em rotinas. Este módulo principal contém os comandos de chamada de sub-rotina e também os de retorno ao programa principal.

Em um sistema CLP, o programa completo do controlador é executado continuamente, em um ciclo que normalmente não se interrompe, chamado de *Scan*. A Figura 42 apresenta um diagrama em blocos de um ciclo de *Scan* no qual aparecem diversas sub-rotinas, com suas respectivas chamadas e retornos aos pontos onde foram chamadas.

Os demais recursos disponíveis para programação em Ladder no Visilogic podem ser encontrados na literatura específica do fabricante (Manual de Utilização).

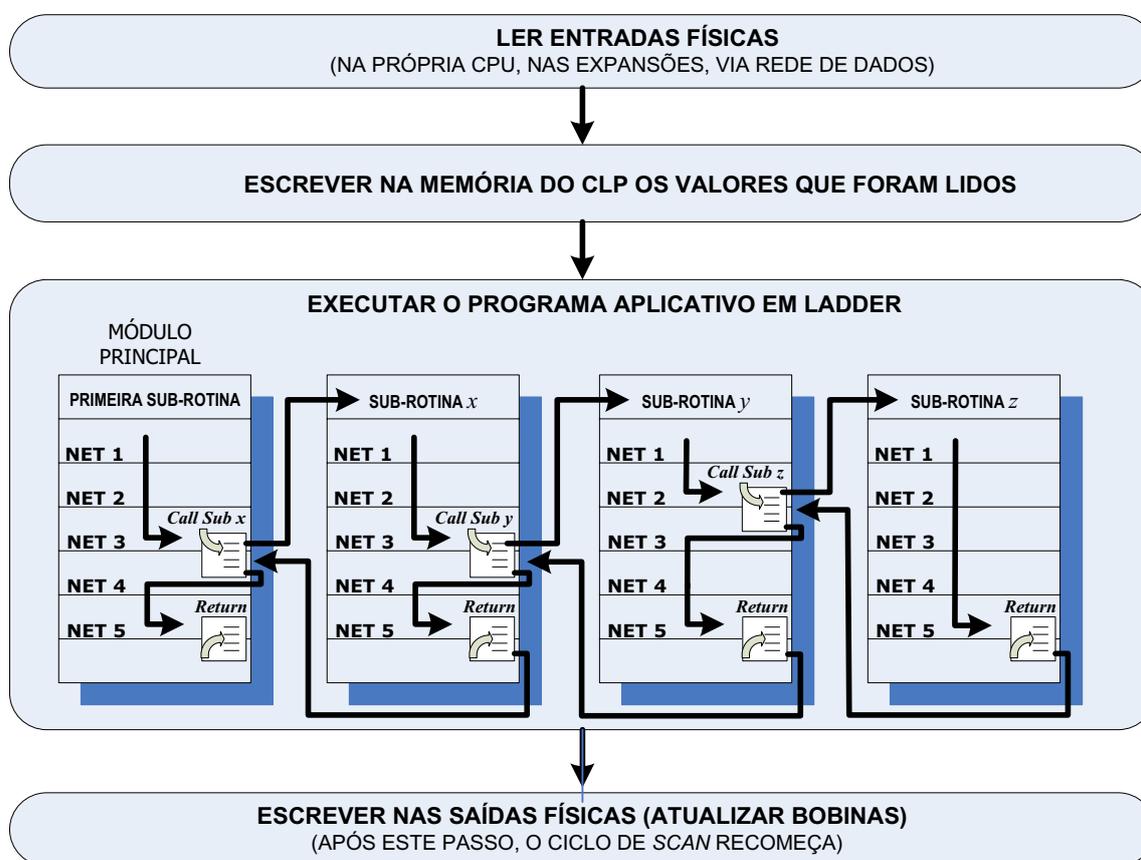


Figura 42 – Diagrama explicativo de um ciclo completo de *Scan* no Ladder

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia adotada para avaliação da proposta baseia-se na comparação entre o funcionamento de um sistema fixo e um sistema móvel, procurando demonstrar que o sistema móvel é viável, apesar de sua maior complexidade técnica de implantação e manutenção. Para atingir este objetivo, a correta escolha dos materiais, da técnica de controle e outros detalhes construtivos são de fundamental importância.

### **4.1 Laboratório de Campo**

O espaço físico utilizado para instalação e desenvolvimento do sistema experimental, denominado Laboratório de Campo, localiza-se na cidade de Bauru, estado de São Paulo, nas dependências do Campus da UNESP, na área da Faculdade de Engenharia, com localização geográfica definida pelas coordenadas 22°21' Latitude Sul (S) e 49°01' Longitude Oeste (W), com altitude de 613 metros acima do nível do mar.

Este Laboratório será constituído de uma base plana, retangular, construída em concreto e cercada com alambrado, de dimensões aproximadas de 12m por 5m, sobre a qual serão instalados dois armários de aço para abrigar internamente equipamentos

como controladores, baterias, CLP, inversores, cargas de teste, placas de aquisição de dados, etc. e sobre estes armários, os dois painéis fotovoltaicos, um fixo e outro móvel.

Além destes, há a previsão de uma estação meteorológica portátil automática, um ponto de entrega de energia elétrica e um ponto para ligação de rede de comunicação de dados. A Figura 43 ilustra uma vista superior deste Laboratório.

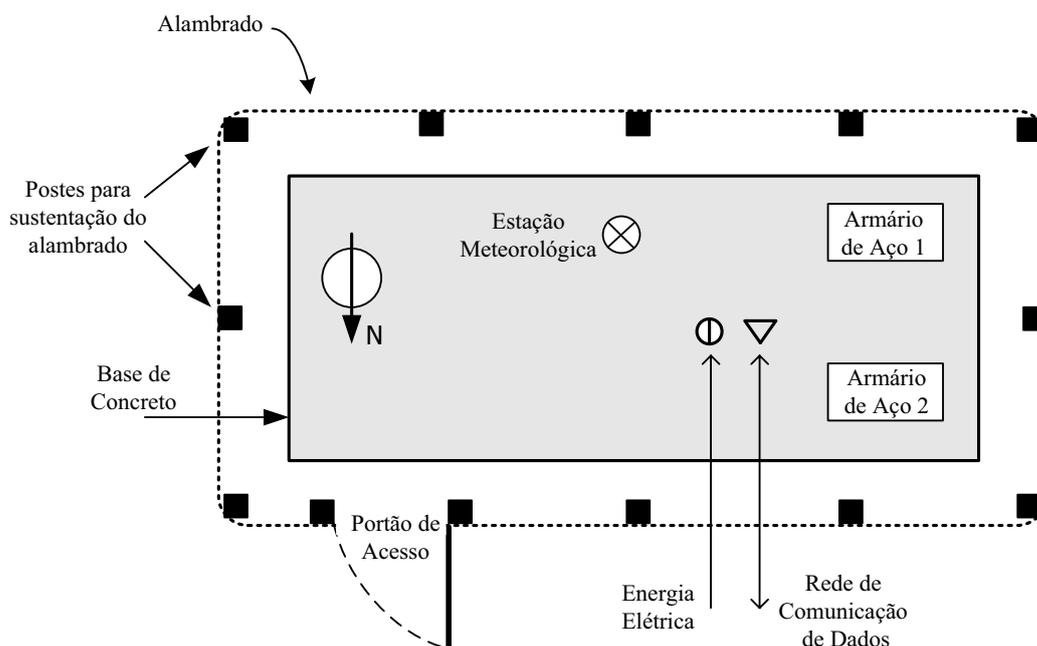


Figura 43 – Desenho do Laboratório Experimental (vista superior)

## 4.2 Descrição do Sistema Experimental

O sistema completo utilizado para a parte experimental da pesquisa está descrito no diagrama de blocos da Figura 44.

Neste diagrama podem ser vistos os dois painéis fotovoltaicos, colocados sobre os seus suportes (fixo e móvel), os sensores de radiação e temperatura para cada um dos painéis, os motores de movimentação do sistema móvel, e as cargas resistivas de cada um dos dois sistemas.

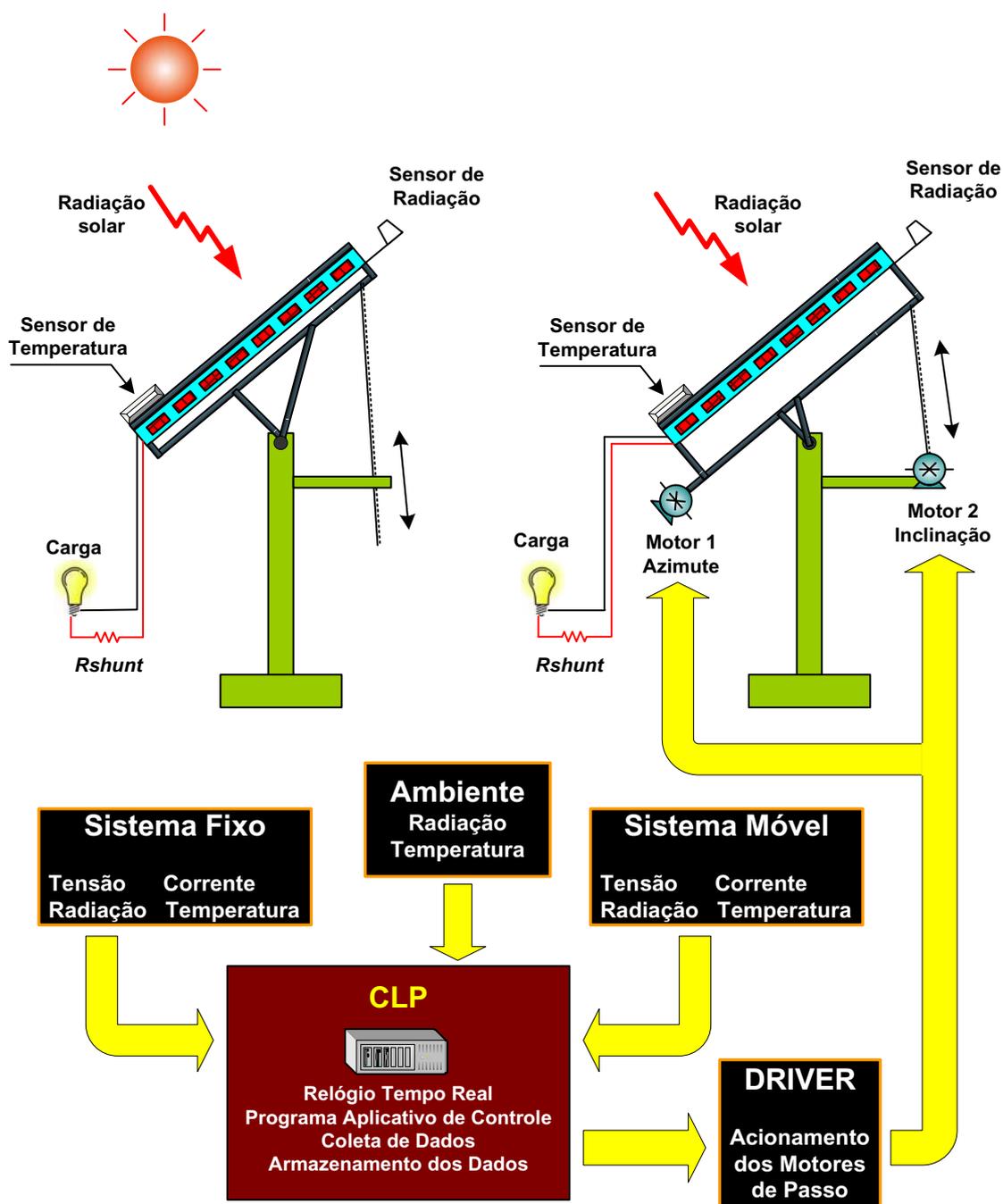


Figura 44 – Diagrama completo do sistema experimental desenvolvido

Ao centro do experimento está o Controlador Lógico Programável, que é o elemento de controle do sistema móvel e também de coleta e armazenamento dos dados dos diversos sensores.

Além dos sensores de temperatura e radiação instalados diretamente no plano dos dois painéis, também existem sensores de temperatura ambiente e de radiação medida no plano horizontal.

#### 4.2.1 Características do Sistema Fotovoltaico

No Laboratório de Campo foram instalados dois módulos fotovoltaicos idênticos, de silício monocristalino, modelo SE 50 do fabricante Shell Solar com as seguintes características nominais (tolerâncias de  $\pm 10\%$ ):

- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{OC}$ ) = 21,3 V
- Corrente de Curto-Circuito ( $I_{SCC}$ ) = 3,4 A
- Tensão de Potência Máxima ( $V_{MP}$ ) = 16,7 V
- Corrente de Potência Máxima ( $I_{MP}$ ) = 3,0 A
- Potência Máxima ( $P_M$ ) = 50 Wp

Um dos módulos está montado sobre um suporte mecânico padrão, direcionado para o Norte Solar, com possibilidade de ajuste manual da inclinação ao longo do ano (Sistema Fixo).

O outro módulo está montado sobre um suporte especialmente desenvolvido para este fim, ao qual estão adaptados os motores de movimentação que permitem ajustes automáticos de ângulo horário (Azimute) e inclinação.

Para avaliação da geração de energia não há a necessidade de um sistema de acumulação (baterias); portanto, em ambos os sistemas serão conectadas cargas resistivas. Como o principal objetivo é a comparação na geração de energia de ambos os painéis, estabeleceu-se como padrão uma carga fixa, resistiva, com potência superior à capacidade de geração de potência máxima pelo módulo fotovoltaico.

Desta maneira, ambos os painéis ficam submetidos às mesmas condições de carga, alimentando uma carga que solicita mais potência do que ele consegue gerar, em qualquer condição de insolação. Assim garante-se que o painel está sempre fornecendo a maior potência possível para qualquer instante. As cargas utilizadas são lâmpadas incandescentes de 12 V / 55 W, idênticas para ambos os painéis.

#### **4.2.2 Características do Sistema de Posicionamento**

O sistema de posicionamento é composto pelo CLP, placa de acionamento dos motores de passo, motores, e redutores.

O Controlador Lógico Programável executa o programa de controle que, a partir das equações de posicionamento do Sol e de dados previamente informados, como as coordenadas geográficas do Laboratório de Campo e o horário da localidade, calcula a posição aparente do Sol no céu e gera os sinais de controle para os motores de passo.

Estes sinais de controle são transformados nos pulsos responsáveis pelo acionamento dos motores, determinando a velocidade e a direção do movimento, assim como os ângulos de posicionamento, de modo a colocar o painel fotovoltaico na posição desejada.

Os dispositivos atuadores são motores de passo de baixa potência acoplados a redutores mecânicos, com os objetivos de consumir o mínimo possível da energia gerada, trabalhar com velocidades reduzidas e com boa precisão no posicionamento. Para esta finalidade foram escolhidos os motores modelo 23LM-K005-20, do fabricante Astrosyn Inc., que se mostrou mais adequado aos requisitos propostos. Trata-se de um motor de passo bipolar, com tensão nominal de alimentação de 7 V, corrente máxima de 0,34 A (com o eixo bloqueado), resistência de cada bobina de 21  $\Omega$ , torque máximo de 5kgf e precisão de 1,8°.

#### **4.2.3 Descrição dos sensores**

Os parâmetros coletados para análise são: tensão e corrente em cada módulo (para posterior cálculo da potência e da energia geradas), temperatura e radiação solar.

#### 4.2.3.1 Medida de Tensão Elétrica

A medida de tensão do módulo é feita de maneira direta, amostrando-se a tensão nos terminais do painel fotovoltaico em intervalos de 1 minuto.

#### 4.2.3.2 Medida de Corrente Elétrica

A medida da corrente fornecida pelo módulo fotovoltaico é feita de maneira indireta, através da amostragem da tensão sobre um resistor conectado em série com cada uma das cargas resistivas (*shunt*), também em intervalos de 1 minuto.

O resistor *shunt* escolhido é do fabricante Renz Instrumentos Elétricos, e é composto de um suporte de latão sobre o qual são apoiados dois fios de manganina (ou manganin), uma liga composta por 86% de Cobre, 12% de Manganês e 2% de Níquel. Esta composição confere à resistência boa estabilidade térmica e boa linearidade, na faixa de 0 a 10A. Seu valor nominal é 0,015  $\Omega$ , resultando em 150 mV para corrente nominal de 10A.

#### 4.2.3.3 Medida de Temperatura

Sensores resistivos de temperatura, com alta estabilidade térmica e mecânica, excelente linearidade e resistente a intempéries, estão instalados na superfície de ambos os painéis e também dentro do ambiente onde se encontram os equipamentos (armário de aço), para medida da temperatura nestes locais.

O sensor utilizado foi o PT-100, sensor de platina a 3 fios para medida de temperaturas na faixa de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $650^{\circ}\text{C}$ , que opera baseado no princípio da variação da resistência elétrica de um metal em função da temperatura; este sensor fornece sinal de resistência diretamente aplicável a uma entrada do CLP específica para esta finalidade.

#### 4.2.3.4 Medida de Radiação Solar

A medida de radiação solar é obtida a partir de dois sensores de radiação global colocados nos planos dos painéis e um terceiro sensor em posição horizontal em relação ao solo, para medida da radiação solar global incidente no ambiente.

O sensor escolhido para esta tarefa é o modelo *6450 Solar Radiation Sensor*, do fabricante Davis Instruments. Trata-se de um piranômetro solar com a capacidade de detectar a radiação de comprimentos de onda entre 0,3  $\mu\text{m}$  a 1100  $\mu\text{m}$ , que utiliza como

detector um fotodiodo de silício com resposta espectral de ampla faixa. Este dispositivo mede radiação global (soma das componentes direta e difusa da irradiância solar) no ponto de interesse.

#### **4.2.4 Descrição do dispositivo de coleta de dados**

Os dados coletados são apresentados ao mesmo CLP que controla o movimento, o qual será responsável por armazená-los até que sejam transferidos a um computador externo. Dos dados gerados pelos sensores, alguns são diretamente lidos pelas entradas do CLP ou pelas suas expansões; outros necessitam ser convertidos e ajustados aos níveis de entrada do CLP através de uma placa de aquisição e condicionamento de sinais, especialmente desenvolvida para este fim.

##### **4.2.4.1 Configuração do *Hardware* do CLP**

Após consulta a diversos fabricantes e a diferentes modelos de CLP, optou-se pelo modelo *Vision 230*, do fabricante *Unitronics*, que possui as características desejadas para a aplicação proposta, com a flexibilidade de instalação de diversos módulos de entradas e saídas que atendessem às necessidades do experimento (vide Figura 45).

Sua HMI possui display gráfico de 128 x 164 pixels que possibilita a exibição de imagens, textos e gráficos correspondentes a parâmetros de tempo real, além de gráficos baseados em dados históricos que reflitam a tendência de dados armazenados. Suporta até 255 telas programadas pelo projetista e até 24 variáveis HMI por tela e possui também um teclado de membrana configurável pelo usuário.

Apresenta a opção de conexão de módulos de expansão externos e do tipo *Snap-in* (encaixado diretamente à CPU). Com a conexão dos módulos de expansão, permite a operação de até 171 entradas e saídas. Possui ainda facilidades de comunicação em diversos protocolos e blocos funcionais em *Ladder* configuráveis para possibilitar a comunicação com equipamentos de outros fabricantes, acesso remoto e importação/exportação de dados através de redes.

**Características da CPU**  
Até 171 I/O's → expansão via Snap-in ou Expansões externas)  
Tipos de I/O Digital (inclui entrada de encoder óptico e saída PWM)  
Analógica  
Entradas especiais para sensores de temperatura  
Memória → 1000k (para uso pelo Aplicativo em Ladder)  
Tempo de Execução → 0,5  $\mu$ s (para cada operação com bit)  
Tabelas de Dados → 120K (RAM) & 192K (Flash) para registro de dados dinâmicos

**Capacidade de Comunicação**  
Porta RS232  
Porta RS232/RS485  
Porta Ethernet (protocolo TCP/IP)  
Suporte à GSM/SMS  
Acesso Remoto via rede GPRS, GSM, CDMA, modem telefônico  
Possibilidade de ligação em rede MODBUS ou CANbus  
Servidor OPC/DDE  
Protocolos de comunicação adicionais

**Figura 45 – Características do CLP utilizado**

A Figura 46 apresenta uma vista frontal do CLP, na qual se observa a sua Interface Gráfica Homem-Máquina (HMI *Graphic Display*) e o teclado frontal.



**Figura 46 – Aspecto externo da CPU Vision 230 da Unitronics**

Considerando-se a necessidade de controlar os dois motores de passo para movimentar o painel fotovoltaico, e ainda possibilitar a aquisição dos dados a serem utilizados para avaliação do ganho em eficiência, foram conectados os seguintes módulos de expansão para conexão ao *Vision 230*:

- 01 módulo de I/O V200-18-E4B *Snap-in* – consta de 18 entradas digitais, 4 entradas analógicas isoladas para termopares PT100, 15 saídas digitais isoladas pnp, 2 saídas digitais isoladas pnp/npn e 4 saídas analógicas isoladas pnp/npn;
- 01 módulo ethernet V200-19-ET1, para operação e monitoramento remoto, via rede de dados;
- 01 módulo de expansão IO-AI4-AO2 – consta de 4 entradas analógicas e 2 saídas analógicas;
- 01 módulo expansão IO-ATC8 – consta de 8 entradas analógicas para termopares, para medição de temperatura.

A Figura 47 apresenta o conjunto de módulos de expansão utilizados.



Figura 47 – Conjunto de módulos de expansão do CLP

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos tópicos subseqüentes deste texto detalham-se as etapas do experimento, as quais se subdividem em:

- a) Construção e implantação do laboratório de campo;
- b) Definição dos componentes mecânicos – escolha dos motores, projeto e construção dos suportes para os painéis, seleção dos sistemas de transmissão de movimento (tipos de eixos e engrenagens de redução);
- c) Projeto, construção e testes da placa com o circuito eletrônico de acionamento para os motores;
- d) Desenvolvimento do programa de controle;
- e) Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados;
- f) Ajustes, calibração, revisão de projeto;
- g) Coleta de dados em campo.

## 5.1 Laboratório de Campo

Conforme projetado, construiu-se o Laboratório de Campo em local próximo aos laboratórios didáticos e de pesquisa do Departamento de Engenharia Elétrica, com a finalidade de facilitar a coleta de dados e o transporte de equipamentos para dentro e para fora do laboratório de pesquisa.

Além disso, este Laboratório foi construído em local que oferece segurança, para evitar furto dos equipamentos, além, logicamente, de receber insolação direta durante a maior parte do dia e do ano.

A Figura 48 é uma foto panorâmica que permite visualizar a área do Laboratório de Campo.



**Figura 48 – Vista externa do Laboratório de Campo**

Na Figura 49 é possível observar em detalhe os armários de aço com os painéis fotovoltaicos instalados sobre eles, com seus respectivos suportes mecânicos.



**Figura 49 – Armários de aço e Painéis Fotovoltaicos instalados em campo**

## **5.2 Projeto e Construção dos Suportes Mecânicos**

Foram construídos dois suportes para sustentação mecânica dos módulos fotovoltaicos. No caso do painel fixo, optou-se por um modelo tradicional, que permite apenas o ajuste manual da inclinação, dependendo da época do ano; este suporte é apresentado na Figura 50.

Com relação ao painel móvel, optou-se por uma configuração inovadora, na qual não se movimentam os dois motores simultaneamente. Nos trabalhos publicados e consultados, a chamada movimentação em ‘dois eixos’ ou com ‘dois graus de liberdade’ sempre pressupõe que a cada reposicionamento do painel fotovoltaico são ajustadas as posições referentes à inclinação do painel e ao movimento aparente do Sol ao longo do dia.

Na configuração proposta, o eixo de movimentação de azimute (ajuste de ângulo horário) foi instalado junto ao painel solar e paralelo ao lado maior do retângulo, unindo os pontos médios dos dois lados menores do painel retangular; deste modo, permite uma rotação sobre si de modo a manter a superfície do painel sempre em posição

perpendicular à incidência dos raios solares, conforme varia o valor do Ângulo Horário ao longo do dia (vide item 3.2.2.4 e Figura 7).



**Figura 50 – Detalhe do suporte mecânico de sustentação do Painel Fixo**

O ângulo de declinação, que determina a inclinação do painel fotovoltaico, conforme detalhado na Equação (11), varia em função do dia do ano, sendo possível reajustá-lo apenas uma vez ao dia, sem perda de precisão.

Construiu-se, então, o suporte mecânico para sustentação do painel móvel para que atendesse a estes princípios de movimentação: inclinação constante durante o dia, reajustada apenas uma vez no início do dia, e variação do Ângulo Horário ao longo do dia, com reajuste em intervalos de tempo a serem definidos pelo programa aplicativo no CLP.

A Figura 51 apresenta uma vista traseira do suporte do painel móvel, já instalado no Laboratório de Campo, com detalhamento dos componentes e indicação de sua localização e finalidade.

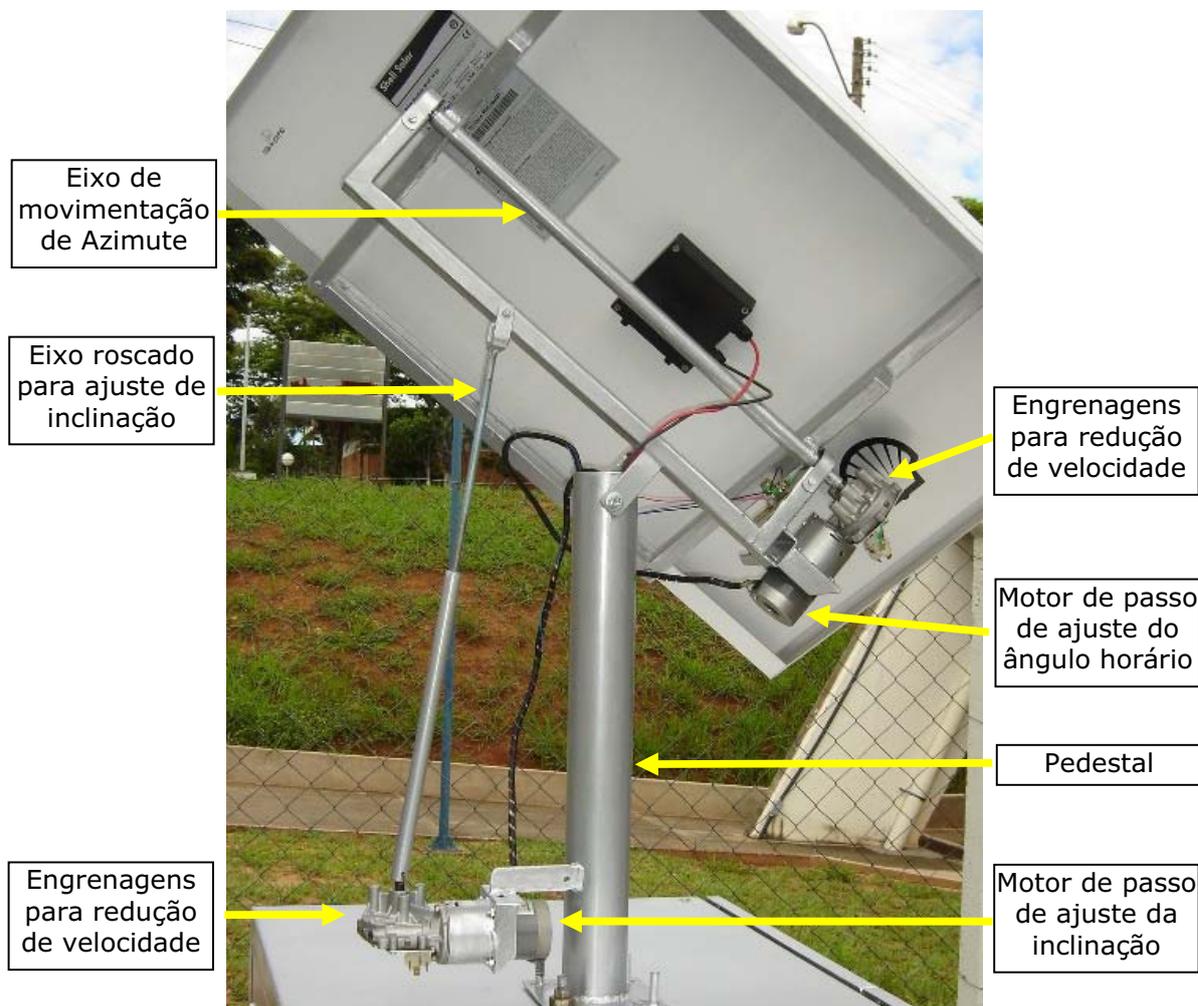


Figura 51 – Detalhe do suporte mecânico de sustentação do Painel Móvel

### 5.3 Testes Funcionais e Escolha dos Motores de Passo

A escolha pelos motores de passo para o sistema de posicionamento deu-se em função das suas características técnicas, como facilidade de utilização pela não necessidade de realimentação para o posicionamento, pela sua excelente precisão, baixo custo e pouca manutenção.

Considerando-se o tipo de aplicação, no qual se necessita baixa velocidade, torque médio, boa precisão de posicionamento e baixo consumo de energia, além da busca por simplicidade, ratificou-se a correta opção por motores de passo para a

movimentação do sistema mecânico. Os motores de passo apresentam também a vantagem de funcionarem em malha aberta, o que facilita o controle de posicionamento.

Após consulta de preços junto a fornecedores e pesquisa em catálogos de fabricantes, observou-se que motores fora de uso, que poderiam ser obtidos dentre materiais de informática obsoletos, como antigas impressoras matriciais, atenderiam perfeitamente aos objetivos do projeto.

Partindo-se disso, retiraram-se diversos motores desses equipamentos e os mesmos foram levados a testes para verificar sua aplicabilidade, assim como também foi realizado o levantamento de suas características elétricas. Uma característica importante é o torque necessário para movimentar o painel e a estrutura mecânica de sustentação, que juntos pesam aproximadamente 10 kg. Outras duas são tensão e corrente, as quais devem adequar-se às capacidades nominais do sistema fotovoltaico, além de baixo consumo de energia, tendo em vista a geração de energia pelo próprio sistema para alimentação do conjunto posicionador.

A partir desses testes, foi escolhido o motor de passo modelo 23LM-K005-20, do fabricante Astrosyn Inc., com alimentação de 7 V, corrente de eixo bloqueado de 0,34 A e resistência de bobina de 21  $\Omega$ .

Para aumentar o conjugado e diminuir as correntes de trabalho dos motores foram utilizados redutores de velocidade, partindo-se do princípio de que o sistema não necessita de altas velocidades de movimentação e nem alta precisão, permitindo, deste modo, que os motores trabalhassem com folga. Os redutores escolhidos são do fabricante Bosch, modelo AX11-566, utilizados em motores de limpador de pára-brisa de automóveis e caminhões, de fabricação nacional e baixo custo.

Devido à necessidade de movimentação do painel fotovoltaico em dois eixos, foram montados dois conjuntos iguais compostos por motor de passo e redutor.

Na Figura 52 apresenta-se uma foto do conjunto responsável pelo movimento ao longo do ano (inclinação); este conjunto foi acoplado a um eixo roscado fixado a um ponto próximo à extremidade superior do suporte mecânico.

O conjunto responsável pelo movimento ao longo do dia (azimute) foi instalado diretamente no eixo central do suporte mecânico de sustentação do painel, conforme pode ser verificado na Figura 53.

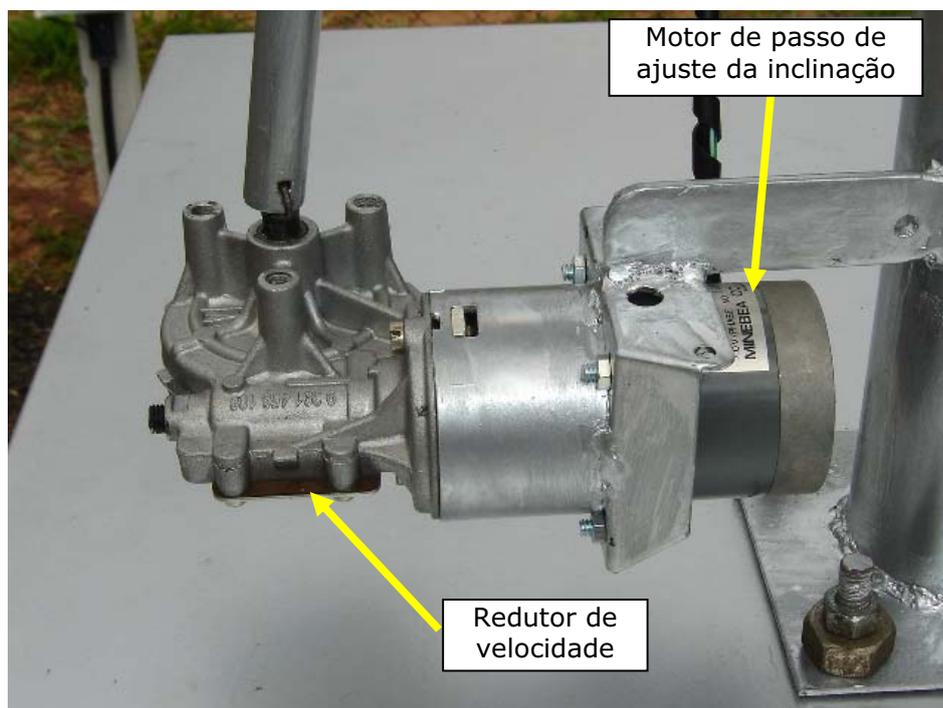


Figura 52 – Foto do conjunto motor de passo + redutor – eixo inclinação

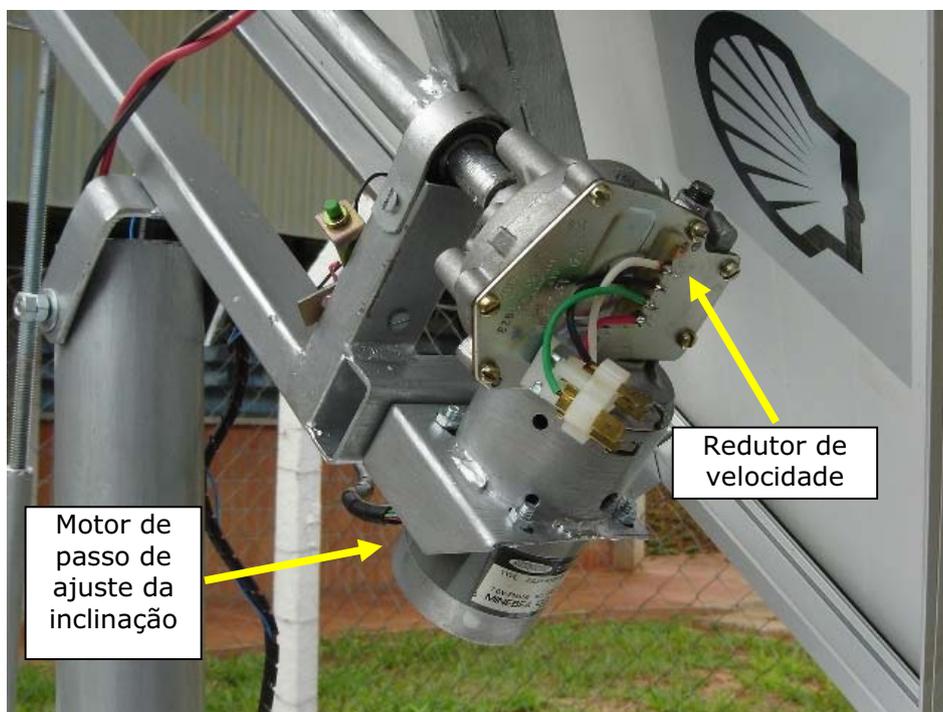


Figura 53 – Foto do conjunto motor de passo + redutor – eixo azimute

#### 5.4 Projeto e Teste do Circuito de Acionamento dos Motores

Tendo em vista novamente a busca por simplicidade de implementação, baixo custo e facilidade de manutenção, optou-se por um circuito simplificado para servir de *driver* para controle dos motores, sendo o mesmo responsável por gerar e enviar os pulsos aos motores, a partir dos sinais de controle recebidos do CLP.

Durante a fase inicial de pesquisa, encontrou-se um *driver* completo em um único Circuito Integrado com características adequadas à utilização no projeto. O CI escolhido foi então o modelo A3982 – *DMOS Stepper Motor Driver with Translator*, do fabricante Allegro Microsystems, Inc.

Foram obtidas amostras gratuitas do CI através da solicitação diretamente ao fabricante. A principal vantagem do uso deste CI se baseia em que numa única pastilha tem-se circuitos de controle e de potência, sendo necessários apenas poucos componentes externos, como resistores de ajuste (definindo a corrente máxima no *driver*, para fins de proteção contra sobre-corrente) e capacitores para filtros, por exemplo.

Neste *driver*, apenas uma única entrada recebe os pulsos de onda quadrada, correspondentes ao passo completo a ser enviado ao motor, já separados pelos seus enrolamentos, sendo que o circuito integrado permite também o envio de meio passo. Possui ainda controle da direção, permitindo que, a partir de um único nível DC de controle seja possível inverter o sentido de rotação do eixo; *chip enable*, que é o controle de liga/desliga do CI, e *reset*, que quando acionado restaura as condições iniciais. Tem capacidade para acionar motores de até 35 V e 2 A, tendo ainda proteção contra super-aquecimento e sobre-corrente, em níveis que podem ser definidos pelo usuário.

Foi necessária a construção de uma pequena placa de circuito impresso para que se pudessem realizar testes em *proto-board*, tendo em vista que os componentes recebidos como amostras são fabricados com encapsulamento SMD, que é um encapsulamento em tamanho bastante reduzido, tendo assim seus terminais muito pequenos, impossibilitando o uso direto em *proto-board*.

De posse dos *drivers* e dos motores, realizou-se a montagem provisória do sistema para a realização dos testes. Nesta montagem havia, além da placa de circuito

impresso com o circuito integrado, alguns capacitores e resistores que servem para a polarização do circuito integrado. Este sistema está apresentado na Figura 54.

Inicialmente utilizou-se um gerador de onda quadrada com um diodo para a geração dos pulsos de entrada. Foram realizados testes com os motores acoplados ao sistema mecânico e o sistema mostrou-se adequado para funcionamento nos dois eixos, sendo que no eixo ao longo do painel (azimute) a velocidade obtida foi maior devido ao tipo de redução empregado, e no eixo vertical (inclinação) a velocidade foi mais baixa, devido à redução ter sido acrescentado o eixo roscado.

Após exaustivas medições e observações das formas de onda no osciloscópio digital, constatou-se que o *driver* escolhido danificava-se sem motivo aparente, após alguns ou após vários ciclos de funcionamento. Considerando-se que estes componentes eram amostras grátis, fornecidas com o objetivo de testes, os problemas funcionais foram relatados ao fabricante e a utilização deste sistema foi descartada.

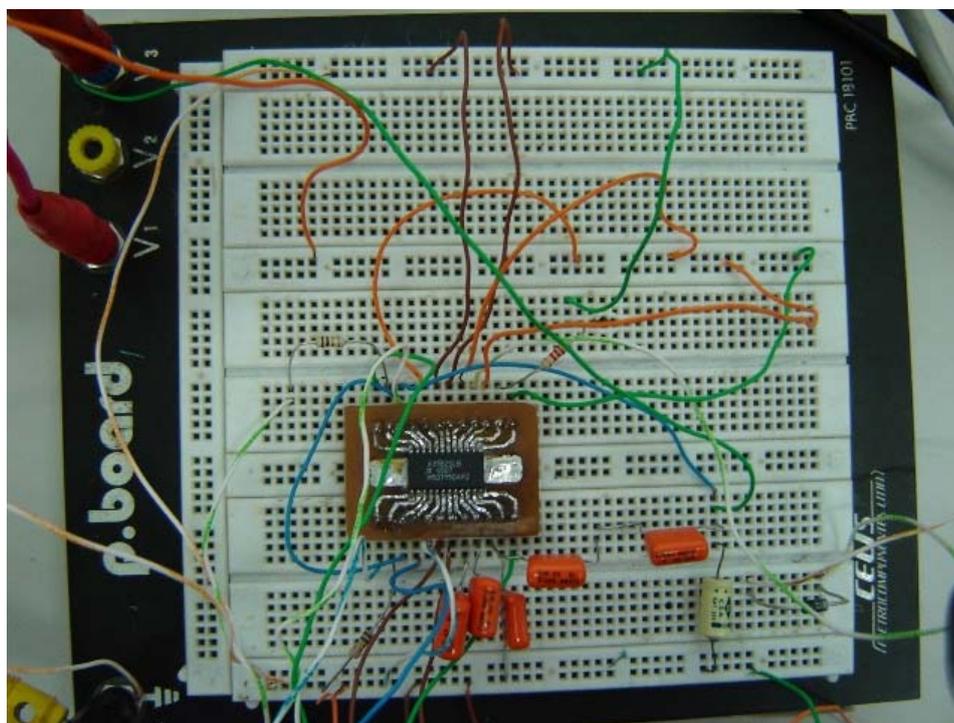


Figura 54 – Montagem para testes do Circuito *Driver* usando o CI A3982

Necessitou-se, então, de um novo *driver* para os motores; optou-se por um sistema mais robusto, com maior capacidade de corrente, maior capacidade de absorver surtos, e, principalmente, mais tempo de mercado e, portanto, com tecnologia consolidada.

O *driver* encontrado através desta pesquisa foi um conjunto de dois Circuitos Integrados, que são o CI L297 *Stepper Motor Controller* e o CI L298N *Dual Full Bridge Driver*, sendo ambos do fabricante ST Microelectronics. Este conjunto é largamente conhecido dos projetistas por ser utilizado em diversos equipamentos que utilizam motores de passo, inclusive impressoras matriciais e máquinas de escrever eletrônicas.

A Figura 55 apresenta o esquema elétrico completo da placa desenvolvida para o circuito de acionamento e controle dos motores de passo, que contém também uma etapa de ajuste das tensões de alimentação para os circuitos integrados e um conjunto de divisores resistivos responsável por adequar os níveis de tensão fornecidos pelos sinais provenientes do CLP aos níveis utilizados pelos circuitos integrados.

O CI L297 funciona como controlador, tendo as entradas de pulsos, direção, *chip enable* e *reset*, da mesma forma que o CI A3982. Suas saídas são ligadas ao CI L298, que funciona como “ponte H”, que é um circuito composto por transistores de potência, cuja configuração permite o fluxo de corrente em ambos os sentidos à carga ligada (motores, geralmente), e fornece assim a corrente necessária às bobinas dos motores de passo. Por ser um CI dedicado a circuitos de maior potência (46 V – 4 A), é muito mais robusto que o CI A3982, além de possuir alta imunidade a ruído.

Um conjunto de 8 diodos protege as saídas do circuito integrado contra pulsos de tensão excessivamente elevados. Utilizou-se a mesma placa para polarização das chaves de fim de curso no sistema móvel, as quais indicam o início e o final do movimento diário (Resistores R14 e R15).

Novamente realizaram-se testes à exaustão com o circuito montado em *proto-board* acionando os motores já instalados no sistema mecânico, com carga total, obtendo-se resultados satisfatórios, superiores aos obtidos com o circuito anterior e sem observação de falhas ou queima de componentes, sendo este novo *driver* capaz de servir ao sistema com segurança. A Figura 56 apresenta uma foto da placa montada.

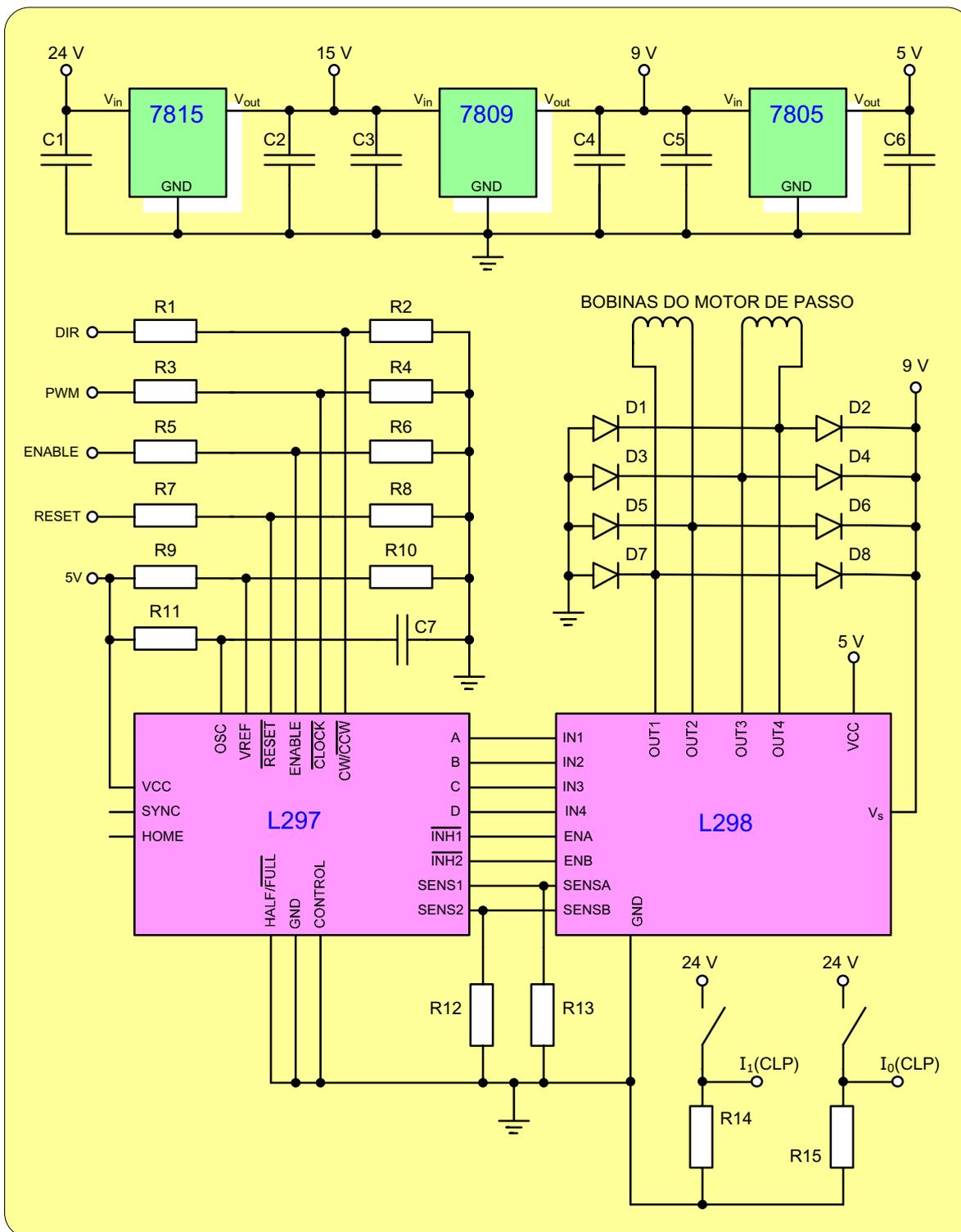


Figura 55 – Esquema elétrico do circuito de acionamento e controle dos motores de passo

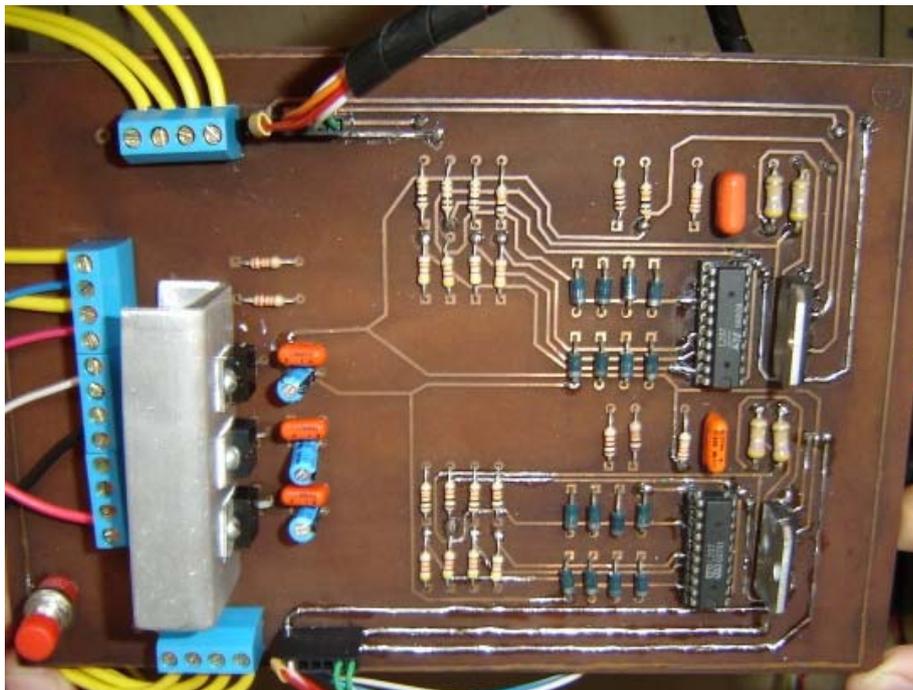


Figura 56 – Placa do circuito de acionamento e controle dos motores de passo

### 5.5 Desenvolvimento do Sistema de Controle e Monitoramento

Para o controle e monitoramento dos sistemas sob avaliação, escolheu-se usar um Controlador Lógico Programável (CLP). Este tipo de dispositivo é bastante versátil, com número de entradas e saídas expansível, o que permite controlarem-se os dois motores simultaneamente a partir da execução do programa aplicativo.

Além de controlar o movimento dos motores de passo, o conjunto CLP + expansões também é o responsável pelo monitoramento de todo o sistema, recolhendo os dados (tensão, corrente, temperatura, radiação) utilizados para avaliar o comportamento do sistema. Os dados são obtidos a partir de sensores de radiação solar, sensores de temperatura, sensores de corrente e de tensão.

O programa de controle e movimentação do painel fotovoltaico é constituído de uma rotina principal, a qual ‘chama’ as sub-rotinas de cálculos, de leitura dos sensores, de acionamento dos motores e de armazenamento de dados.

### 5.5.1 Programação do CLP – Rotinas de Cálculos

O primeiro passo foi a implementação das rotinas de leitura e conversão dos parâmetros de entrada a serem utilizados pelas rotinas de cálculos. Estas rotinas estão ilustradas no diagrama em blocos da Figura 57 e descritas no texto a seguir.

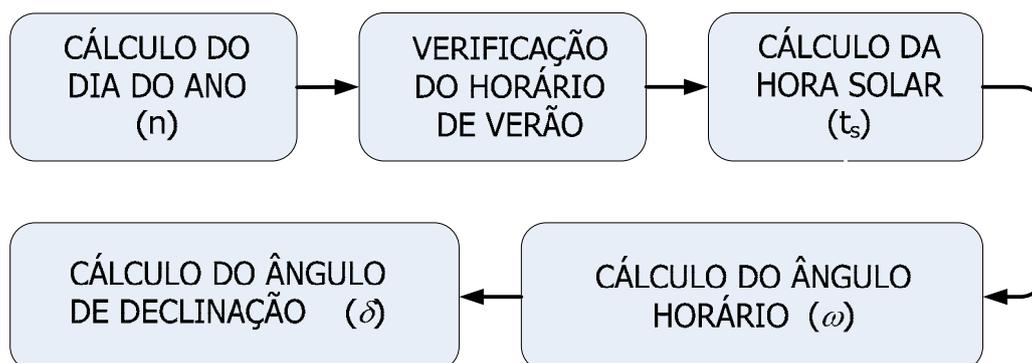


Figura 57 – Diagrama em Blocos representando as Rotinas de Cálculos

Cálculo do Dia do Ano (  $n$  )– Esta rotina tem a função converter o dia do ano em um somatório unitário, desde o primeiro até o último dia do ano em um ciclo de 4 anos, para aplicação na Equação (8). O relógio de tempo real do CLP fornece uma variável inteira no formato DDMM (um número inteiro com 4 caracteres na ordem Dia-Mês); esta variável é fragmentada para separar o dia do ano e, conhecido o mês do ano em que se encontra o dia atual, soma-se a este um valor correspondente à soma dos dias dos meses já concluídos.

Determinação do Período de Horário de Verão (  $DST$  )– Como o período de Horário de Verão no Brasil não é fixo, mas determinado por Decreto Presidencial, é necessário informar este período ao CLP através do seu teclado. A partir desta informação, a sub-rotina calcula o valor do parâmetro  $D$  , utilizado na Equação (9), para que os ângulos de posicionamento sejam corretamente calculados. Do mesmo modo que no cálculo do Dia do Ano, o CLP trabalha com uma variável inteira no formato HHMM (um número inteiro com 4 caracteres na ordem Hora-Minuto).

Cálculo da Hora Solar ( $t_s$ )– Esta rotina utiliza a Equação (9) para determinar a hora solar, a partir dos dados já obtidos e/ou calculados, a qual será posteriormente utilizada para o cálculo do Ângulo Horário, determinando o ângulo de início do movimento horário do painel fotovoltaico, para a hora local (LCT) pré-definida.

Cálculo do Ângulo Horário ( $\omega$ )– É realizado por sub-rotina específica, utilizando os dados já obtidos e/ou calculados, a partir da Equação (5).

Cálculo do Ângulo de Declinação ( $\delta$ ) – Este ângulo determina a inclinação do painel fotovoltaico ao longo do ano e é calculado por uma sub-rotina que utiliza a Equação (11).

Estes cálculos são realizados diariamente pelo programa de controle executado no CLP, para determinação exata da posição aparente do Sol no céu.

### 5.5.2 Programação do CLP – Rotinas de Movimento dos Motores

Com os parâmetros de entrada adquiridos e os cálculos realizados, desenvolveram-se as rotinas de movimentação do painel. Estas rotinas estão ilustradas no diagrama em blocos da Figura 58 e descritas no texto a seguir.

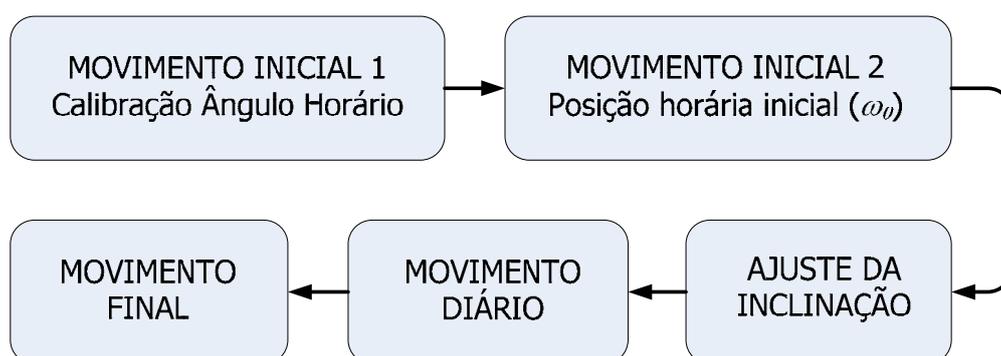


Figura 58 – Diagrama em Blocos representando as Rotinas de Movimentação

Movimento Inicial 1 – Antes do amanhecer, o painel deve estar posicionado ao meio de sua trajetória, devido ao movimento final, realizado após o pôr-do-sol do dia anterior. A rotina de Movimento Inicial é responsável pelo deslocamento do painel desta posição até onde está posicionado o sensor de início de curso. Trata-se também de uma rotina de calibração, uma vez que o sensor de início de curso tem posição fixa e conhecida em relação ao plano horizontal.

Movimento Inicial 2 – Definida a hora de início do movimento diário e calculado o valor do Ângulo Horário na hora determinada para início do movimento, esta rotina gera o número de pulsos necessário para que o motor de movimentação de Azimute (Ângulo Horário) leve o painel até a posição inicial de movimento.

Movimento Anual – A partir do valor calculado para o ângulo de declinação, esta rotina atua no motor responsável pela movimentação do eixo de inclinação do painel, corrigindo a inclinação caso seja necessário.

Movimento Diário – Sabendo-se que o Sol, em seu movimento aparente, desloca-se  $15^\circ$  em uma hora, determinou-se o movimento do painel de  $1^\circ$  a cada 4 minutos. Esta rotina se encarrega de fazer esta movimentação, que se inicia no horário previsto para o início do movimento, no qual o painel está posicionado perpendicularmente aos raios de Sol incidentes. Com o deslocamento de  $1^\circ$  a cada 4 minutos, há um sincronismo entre o movimento do painel fotovoltaico e o movimento aparente do Sol, o que mantém a superfície do painel em posição perpendicular aos raios de Sol incidentes durante todo o período, até que o painel atinja o sensor de fim de curso, cessando assim sua movimentação diária.

Movimento Final – Após o pôr-do-sol, o painel deverá repousar em uma posição intermediária, prevendo a possibilidade de nuvens no dia seguinte. Por este motivo, em um horário pré-determinado, realiza-se a movimentação de volta do painel até este ficar posicionado ao centro de sua trajetória, onde aguardará o início do próximo dia.

Todas as rotinas descritas foram implementadas em linguagem LADDER e executadas no CLP.

### 5.5.3 Sistema de Aquisição de Dados

Uma vez implementado o sistema de movimentação, iniciou-se a etapa de aquisição de dados. Como os sinais disponíveis no sistema fotovoltaico não se encontravam no formato necessário à leitura destes dados pelo CLP, foi necessário projetar, construir e calibrar duas placas (uma para cada módulo fotovoltaico) de condicionamento e conversão dos sinais para o padrão do CLP. O diagrama esquemático do circuito destas placas está apresentado na Figura 59.

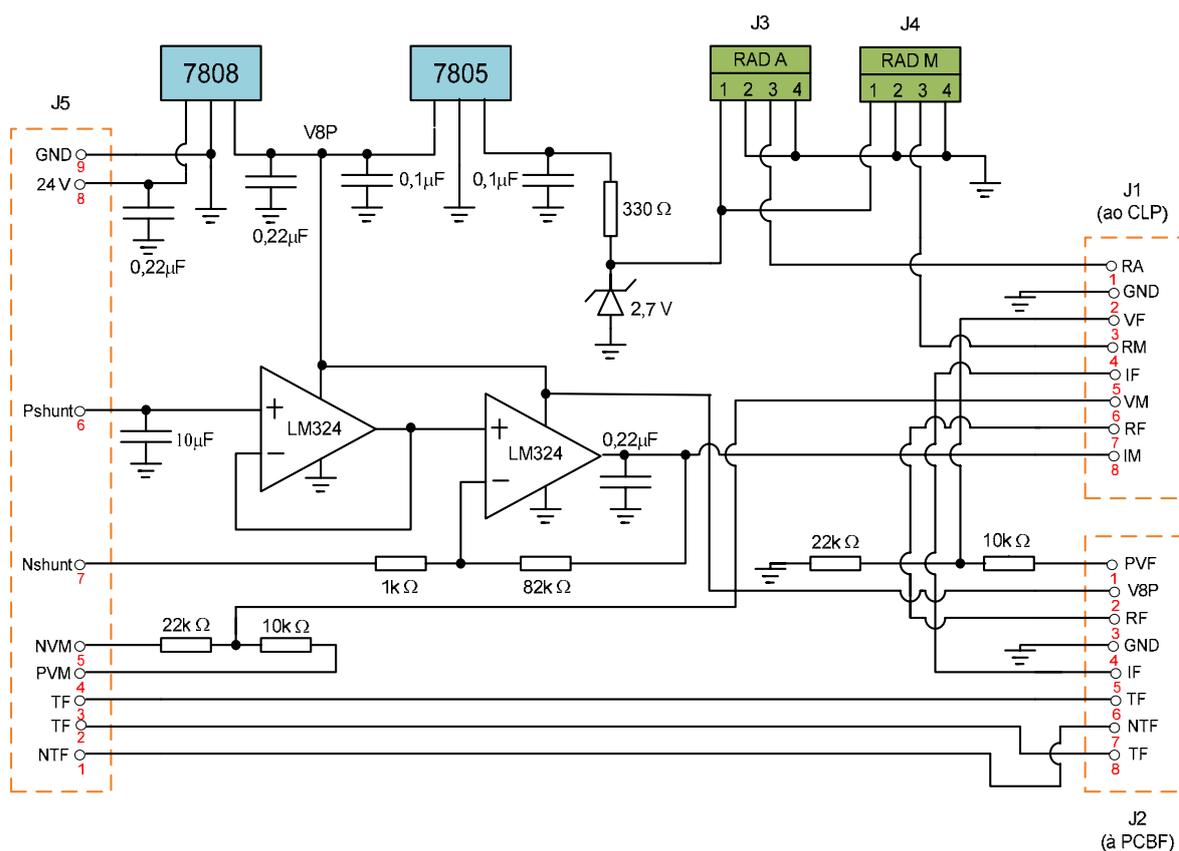
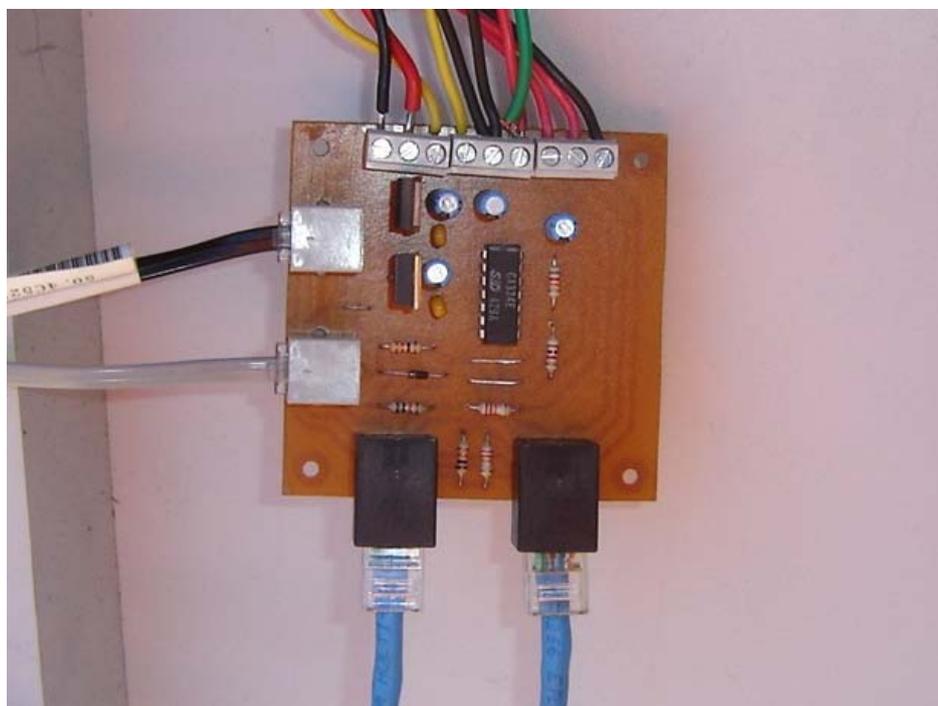


Figura 59 – Circuito da Placa de Condicionamento e Conversão de Sinais

Para aquisição da tensão do painel fotovoltaico utilizou-se um divisor resistivo, de modo que o valor medido nos terminais fosse reduzido à faixa de valores de entrada admitida pelo módulo de expansão do CLP. A calibração dos valores de leitura foi feita diretamente pelo programa de aquisição de dados. Os divisores são formados pelos resistores de 22 k $\Omega$  e 10 k $\Omega$  na Figura 59.

A corrente de carga foi indiretamente obtida através da aferição da tensão sobre o resistor *shunt*. Como o valor da resistência *shunt* é muito baixo, foi necessário projetar-se um amplificador de instrumentação, com boa linearidade, alto ganho e baixo ruído, de modo a transformar a tensão lida nos seus terminais para valores dentro da faixa admitida pelo CLP. Utilizaram-se 2 portas do Amplificador Operacional LM324 e novamente a calibração foi feita no programa de aquisição de dados.

Nesta placa observam-se ainda circuitos reguladores de tensão responsáveis por fornecer as tensões necessárias para alimentar o circuito integrado e também alimentar os sensores de radiação, que são dispositivos ativos. A Figura 60 apresenta uma foto da placa construída.



**Figura 60** – Foto da placa de condicionamento e conversão dos sinais dos sensores

Os sensores de temperatura possuem módulo de expansão específico no CLP para a sua conexão, não tendo sido necessário nenhum tipo de ajuste, calibração ou condicionamento de sinais para a sua leitura. Foram utilizados três sensores, sendo que dois deles foram instalados diretamente sobre a superfície dos painéis fotovoltaicos (vide Figura 61) e o terceiro foi colocado dentro do armário, medindo a temperatura neste ambiente.



**Figura 61 – Detalhe do sensor de temperatura sobre a superfície do painel fotovoltaico**

Para a medição da radiação solar, foram instalados dois sensores em superfície paralela a cada um dos painéis fotovoltaicos (Figura 62), sendo que um terceiro sensor foi instalado sobre um suporte paralelo à superfície da Terra (Figura 63). Cada um destes sensores possui um transdutor ativo (fotodiodo de silício com ampla resposta espectral) e um amplificador interno, que convertem a radiação incidente em tensão

Os terminais de todos os sensores foram ligados à placa de condicionamento e conversão, que recebe os sinais e os envia ao CLP. Através de rotinas acrescentadas ao programa de controle, os mesmos são lidos e armazenados, para posterior análise.



**Figura 62 – Detalhe do sensor de radiação instalado no plano do painel fotovoltaico**



**Figura 63 – Detalhe do sensor de radiação instalado em plano horizontal**

## 5.6 Testes em Campo e Calibração do Sistema

Tendo-se o sistema mecânico, o sistema eletrônico de controle e aquisição de dados, e o programa aplicativo prontos, iniciou-se a etapa de testes em campo e calibração do sistema como um todo.

Para que o posicionamento correto pudesse ser conferido, uma solução simples e bastante eficiente foi adotada, com o uso de uma vareta indicadora da posição do Sol, a qual, instalada em posição perpendicular sobre uma chapa metálica no mesmo plano do painel fotovoltaico, não deve projetar sombra em nenhum instante do dia, caso a posição desejada do painel seja atingida (vide Figura 64).



**Figura 64 – Detalhe da vareta indicadora do correto posicionamento**

Durante a fase de testes e ajustes foram verificados detalhes da programação, os quais foram ajustados conforme as necessidades, resultando no programa final de controle. Através destes testes, confirmou-se também o funcionamento do sistema mecânico e dos circuitos eletrônicos. No aperfeiçoamento do sistema para a aplicação final, acrescentaram-se sensores de início e fim de curso, com a finalidade de evitar perda da

calibração do sistema posicionador, que poderia ser causada, por exemplo, por ventos fortes, resultando em movimentos errados e perda da eficiência do posicionamento.

Transferidores foram instalados no suporte móvel para ajustar os ângulos de referência (Ângulo Horário e Ângulo de Inclinação – vide Figura 65).



Figura 65 – Transferidor para calibração do Ângulo Horário

## 5.7 Coleta dos Dados Experimentais

Com o sistema calibrado e em funcionamento, iniciou-se a aquisição dos dados experimentais, os quais foram coletados durante o período aproximado de um ano.

Devido a ajustes e recalibração que foram realizados durante este período, causando interrupção no funcionamento do sistema, alguns resultados não puderam ser registrados. Entretanto, analisou-se um conjunto com 152 dias de coleta, dentre os quais foram escolhidos 95 para apresentação neste trabalho, compreendidos entre os meses de

fevereiro e julho de 2008, e que permitiram verificar a viabilidade da proposta, sob o ponto de vista de ganho na geração de energia elétrica com o posicionamento automático.

Por cobrirem um intervalo de meses que compreendeu épocas de tempo seco, épocas de tempo chuvoso, dias frios e dias mais quentes, período de verão, outono e inverno, os dados coletados e registrados permitiram uma avaliação do ganho de rendimento em condições bastante variadas de operação do sistema fotovoltaico móvel em comparação com o sistema fixo.

As curvas apresentadas neste tópico procuram reproduzir algumas das situações verificadas na prática. As rotinas utilizadas para traçado destas curvas, cálculo da energia gerada no dia por cada um dos painéis e o resultado comparativo entre ambos foram desenvolvidas no programa MatLab<sup>®</sup>, e os scripts utilizados são apresentados no APÊNDICE.

A rotina de coleta de dados implementada no CLP registra as leituras dos dados em intervalos de 1 minuto, no período compreendido entre 7h00 e 17h00 ( *LCT* ), resultando em tabelas diárias de 600 linhas (10 horas, 60 leituras por hora) e 11 colunas:

- Hora do dia (tempo)
- Tensão do Painel Móvel (VM)
- Tensão do Painel Fixo (VF)
- Corrente do Painel Móvel (IM)
- Corrente do Painel Fixo (IF)
- Temperatura Ambiente (TA)
- Temperatura da Superfície do Painel Móvel (TM)
- Temperatura da Superfície do Painel Fixo (TF)
- Irradiância no Plano do Painel Móvel (RM)
- Irradiância no Plano do Painel Fixo (RF)
- Irradiância no Plano Horizontal (RA)

Ao final do dia, esta tabela de 6.600 pontos é transferida a um computador pessoal. As Tabelas 5 e 6 apresentam subconjuntos de resultados amostrados, representando os pontos gravados a cada 20 minutos do dia 26/06/2008.

**Tabela 5 – Grandezas elétricas, intervalos de 20 min., 7h às 17h, dia 26/06/2008**

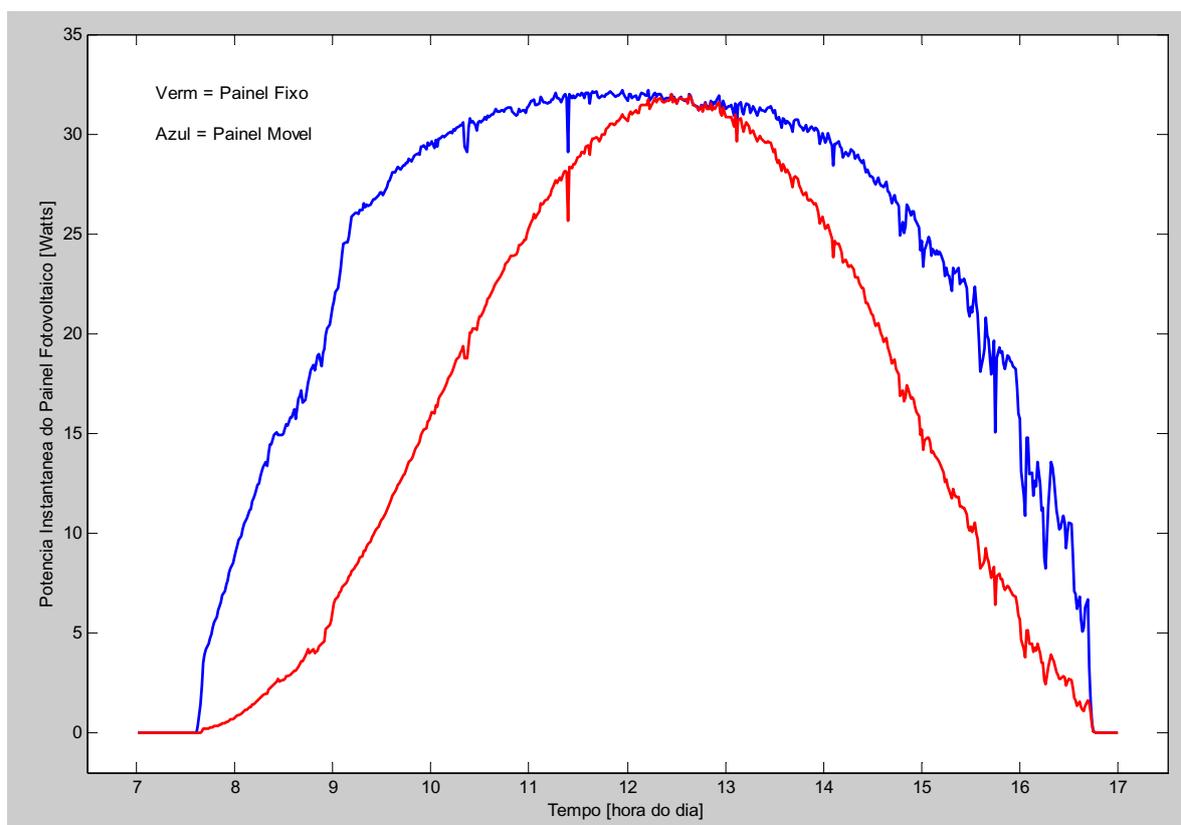
tempo [hora]	VM [V]	IM [A]	PM [W]	VF [V]	IF [A]	PF [W]
7,0333	0,0000	0,0777	0,0000	0,0039	0,0544	0,0002
7,3667	0,0218	0,0781	0,0017	0,0158	0,0544	0,0009
7,7000	2,8281	1,3906	3,9326	0,3216	0,5801	0,1932
8,0333	4,9010	1,9187	9,4036	0,9056	0,8977	0,8418
8,3667	6,3934	2,2547	14,4151	1,8073	1,1973	2,2404
8,7000	6,9562	2,3783	16,5436	2,4801	1,3971	3,5875
9,0333	8,3395	2,6432	22,0430	3,7270	1,7259	6,6600
9,3667	9,3146	2,8336	26,3937	4,6780	1,9562	9,4749
9,7000	9,7169	2,9015	28,1935	5,6369	2,1634	12,6266
10,0333	9,9349	2,9477	29,2850	6,5563	2,3546	15,9838
10,3667	9,8932	2,9393	29,0792	7,2409	2,5008	18,7494
10,7000	10,2975	3,0230	31,1289	8,2333	2,6780	22,8294
11,0333	10,3887	3,0443	31,6263	8,8805	2,7987	25,7338
11,3667	10,4581	3,0566	31,9656	9,4270	2,8881	28,1901
11,7000	10,4323	3,0531	31,8503	9,7525	2,9479	29,7668
12,0333	10,4739	3,0566	32,0141	10,0426	2,9961	31,1533
12,3667	10,4224	3,0447	31,7325	10,1393	3,0121	31,6219
12,7000	10,3530	3,0324	31,3945	10,0880	3,0047	31,3844
13,0333	10,3570	3,0303	31,3848	9,9775	2,9870	30,8577
13,3667	10,3174	3,0247	31,2069	9,7585	2,9487	29,7932
13,7000	10,1925	3,0044	30,6223	9,3303	2,8815	27,8373
14,0333	10,0003	2,9705	29,7053	8,7739	2,7855	25,3052
14,3667	9,7922	2,9390	28,7787	8,1505	2,6751	22,5753
14,7000	9,2928	2,8536	26,5173	7,1640	2,4951	18,5074
15,0333	8,7676	2,7580	24,1810	6,1597	2,2985	14,6596
15,3667	8,5476	2,7206	23,2541	5,3606	2,1317	11,8317
15,7000	7,2535	2,4749	17,9512	4,0802	1,8433	7,7872
16,0333	5,5709	2,1266	11,8471	2,7287	1,4898	4,2090
16,3667	5,3509	2,0769	11,1133	2,1999	1,3369	3,0452
16,7000	2,4674	1,3398	3,3058	1,3416	1,0638	1,4777
<b>Média</b>	<b>7,9678</b>	<b>2,4998</b>	<b>22,3624</b>	<b>5,8321</b>	<b>2,0715</b>	<b>15,6308</b>

Tabela 6 – Demais grandezas, intervalos de 20 min., 7h às 17h, dia 26/06/2008

tempo [hora]	PM [W]	TM [°C]	RM [W.m <sup>-2</sup> ]	PF [W]	TF [W]	RF [W.m <sup>-2</sup> ]
7,0333	0,0000	10,8534	4,8105	0,0002	11,8738	7,6741
7,3667	0,0017	11,2245	23,6826	0,0009	12,1521	16,8100
7,7000	3,9326	14,1930	483,6421	0,1932	14,1930	200,2586
8,0333	9,4036	22,2635	628,3277	0,8418	20,0371	305,1385
8,3667	14,4151	25,0464	706,7762	2,2404	23,0983	386,2652
8,7000	16,5436	26,7161	770,7930	3,5875	22,8200	458,6214
9,0333	22,0430	30,9833	826,6691	6,6600	28,6642	529,8813
9,3667	26,3937	29,3136	841,8407	9,4749	30,1484	594,5634
9,7000	28,1935	29,3136	854,0521	12,6266	29,6846	651,5713
10,0333	29,2850	29,6846	867,7435	15,9838	30,2412	704,5594
10,3667	29,0792	32,5603	868,8536	18,7494	32,6531	742,9302
10,7000	31,1289	32,1892	888,0957	22,8294	32,7458	795,5529
11,0333	31,6263	34,6939	894,0163	25,7338	34,6939	828,4420
11,3667	31,9656	34,1373	895,8666	28,1901	33,9518	854,7534
11,7000	31,8503	34,6011	894,0163	29,7668	34,6939	873,3906
12,0333	32,0141	34,5084	896,9767	31,1533	34,9722	886,5463
12,3667	31,7325	35,5288	896,6067	31,6219	36,7347	893,4895
12,7000	31,3945	35,1577	891,7961	31,3844	36,1781	890,9315
13,0333	31,3848	35,8071	892,1661	30,8577	36,6419	885,8154
13,3667	31,2069	35,8071	889,2058	29,7932	36,1781	875,9486
13,7000	30,6223	37,1985	883,2852	27,8373	37,2913	855,4843
14,0333	29,7053	35,8998	875,1443	25,3052	35,9926	825,5185
14,3667	28,7787	37,2913	865,1532	22,5753	37,1985	793,7257
14,7000	26,5173	38,1262	842,5808	18,5074	36,9202	746,2191
15,0333	24,1810	37,4768	818,5282	14,6596	36,7347	692,8655
15,3667	23,2541	39,3321	812,2375	11,8317	37,1985	647,9169
15,7000	17,9512	38,5900	747,8506	7,7872	35,8998	565,3286
16,0333	11,8471	36,2709	654,2305	4,2090	33,3952	464,4684
16,3667	11,1133	36,7347	649,0500	3,0452	33,3952	425,7322
16,7000	3,3058	33,1169	550,9894	1,4777	29,6846	352,6451
<b>Média</b>	<b>22,3624</b>	<b>31,4873</b>	<b>753,8329</b>	<b>15,6308</b>	<b>30,8689</b>	<b>625,1016</b>

A partir dos dados coletados no dia 26/06/2008 (início do inverno), foram traçados gráficos que permitem uma melhor visualização dos resultados.

A Figura 66 apresenta as curvas de potência entregue à carga (equivalente à potência instantânea gerada, considerando perdas desprezíveis entre a geração e o consumo) para os dois painéis fotovoltaicos, trabalhando em condições idênticas de operação.



**Figura 66 – Potência instantânea dos Painéis Fotovoltaicos – 26/06/2008**

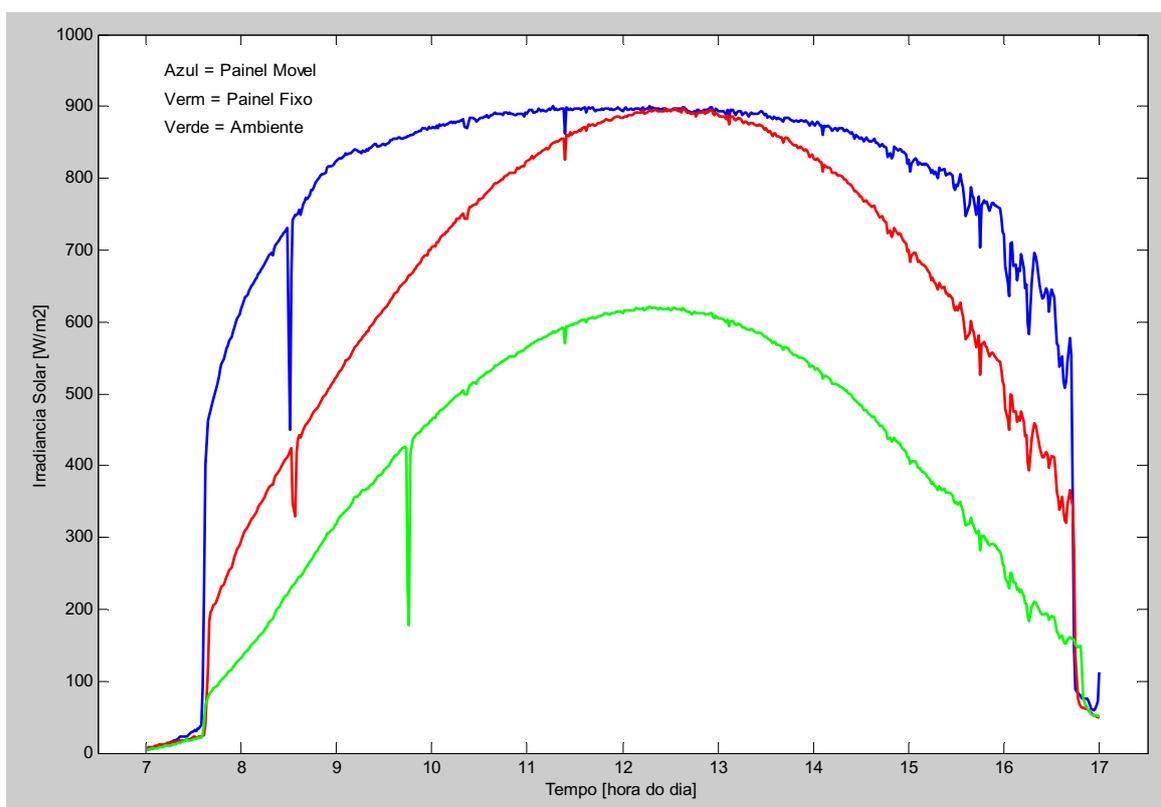
Nas curvas traçadas é possível verificar o comportamento típico esperado no caso do painel fixo (curva em vermelho): a potência gerada no início do dia é zero antes do nascer do Sol, e aumenta gradativamente a partir das 7h36min, atingindo o valor máximo por volta das 12h37min, aproximadamente o meio-dia solar. O perfil observado permite verificar que durante o período da manhã o céu permaneceu claro, com poucas

interferências de nuvens ou sombras, o que se alterou ligeiramente no período da tarde, quando se observam variações um pouco mais acentuadas na curva de potência.

O comportamento do painel fotovoltaico móvel (curva em azul) evidencia seu melhor desempenho quando se trata da potência instantânea entregue à carga. Desde o início do dia, quando os primeiros raios de Sol atingem o Laboratório de Campo, a potência gerada pelo painel móvel é substancialmente maior que a potência do painel fixo. Às 9h31min esta diferença atinge 150%, ou seja, a potência instantânea do painel móvel é 26,93 W enquanto que a potência instantânea do painel fixo é 10,73 W.

Integrando-se as curvas de potência ao longo do dia, o resultado da energia gerada é 156,5 Wh para o painel fixo, contra 225,0 Wh para o painel móvel, o que representa um ganho bruto de 43,77% na geração de energia.

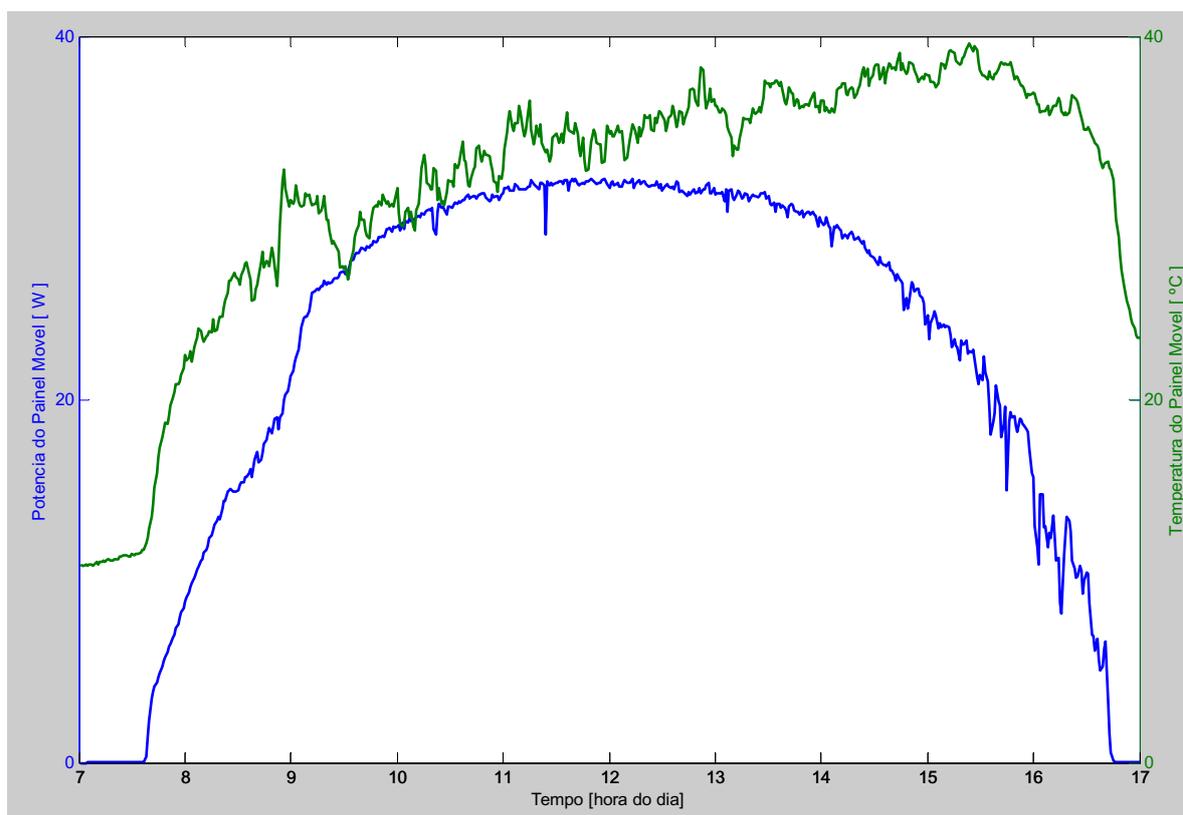
A Figura 67 apresenta as curvas de insolação referentes aos dados coletados no dia 26/06/2008.



**Figura 67 – Insolação incidente nos Painéis Fotovoltaicos – 26/06/2008**

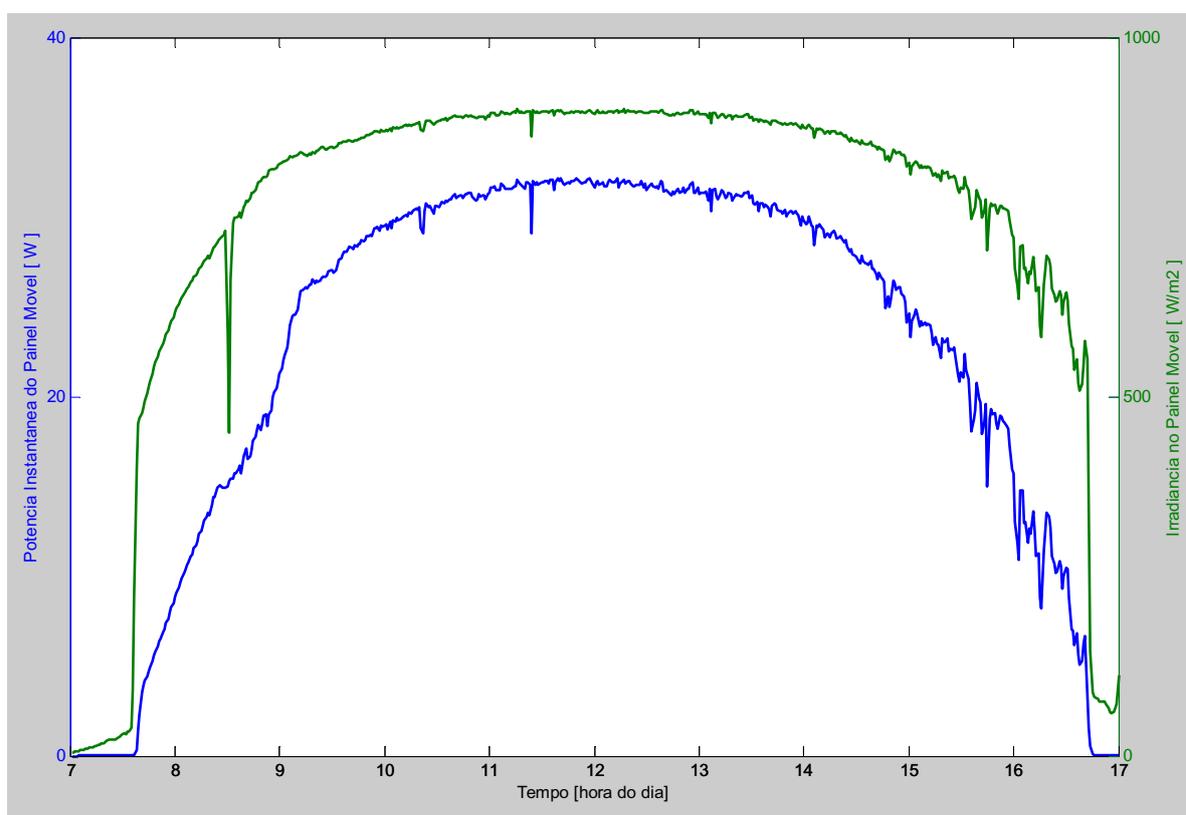
Além do formato que evidencia os valores instantâneos de irradiância que atingem a superfície do painel móvel ao longo do dia serem maiores do que aqueles que incidem sobre o painel fixo sobre o plano horizontal (curva verde = Ambiente), outro aspecto relevante é o valor máximo observado nestas curvas. Por se tratar de época de inverno no hemisfério Sul, na qual a Terra encontra-se mais distante do Sol, o nível de potência solar que atinge a superfície terrestre é menor do que na época do verão. Nas curvas traçadas, o valor máximo é da ordem de  $900 \text{ W.m}^{-2}$ , enquanto que no verão este valor é superior.

O fato do painel fotovoltaico estar direcionado ao Sol durante todo o tempo resulta em uma maior temperatura de sua superfície, quando comparado ao painel fixo. Conhecidas as características que relacionam o aumento de temperatura da célula com sua menor eficiência de conversão, traçou-se a curva da Figura 68 com o objetivo de avaliar este efeito.



**Figura 68 – Relação entre Potência Gerada e Temperatura do Módulo – 26/06/08**

Conforme apresentado no gráfico, não se evidencia este tipo de comportamento, embora nos valores mais altos de temperatura (por volta das 15h30min) observe-se uma queda na potência instantânea do módulo fotovoltaico. Esta queda, no entanto, é predominantemente causada pelo menor nível de irradiância neste horário, como mostra o gráfico da Figura 69, no qual a potência instantânea apresenta o mesmo comportamento da radiação solar.



**Figura 69 – Relação entre Potência Gerada e Irradiância sobre o Módulo – 26/06/08**

Para ilustrar outros resultados observados, apresentam-se as Tabelas 7 e 8 com subconjuntos de resultados amostrados, representando os pontos gravados a cada 20 minutos do dia 03/03/2008, e a partir dos dados coletados neste período de final de verão, foram traçados gráficos que permitem uma melhor visualização dos resultados.

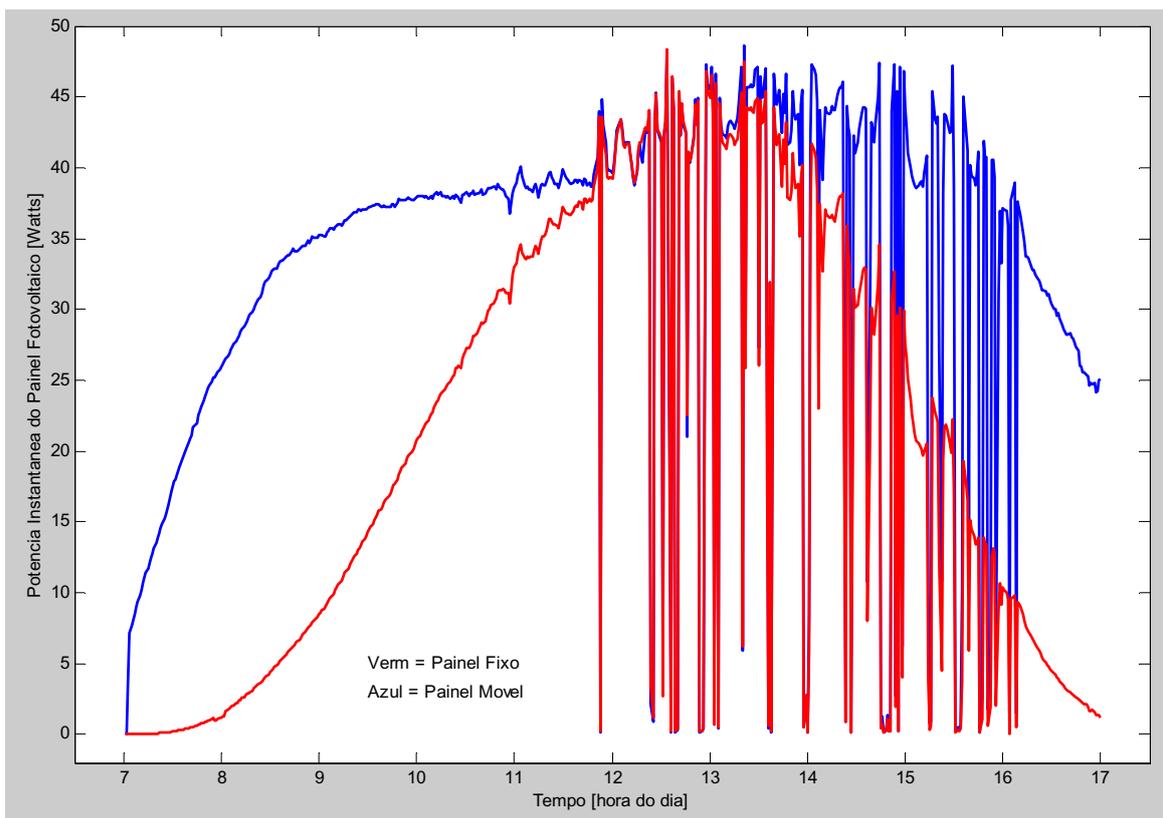
Tabela 7 – Grandezas elétricas, intervalos de 20 min., 7h às 17h, dia 03/03/2008

tempo [hora]	VM [V]	IM [A]	PM [W]	VF [V]	IF [A]	PF [W]
7,0333	0,2180	0,3395	0,0740	0,0728	0,1412	0,0103
7,3667	6,3755	2,2281	14,2053	0,2123	0,4378	0,0929
7,7000	8,1988	2,5771	21,1287	0,6429	0,7878	0,5065
8,0333	9,4178	2,7960	26,3321	1,2413	1,0157	1,2608
8,3667	10,3103	2,9565	30,4822	2,4847	1,3907	3,4555
8,7000	10,9813	3,0811	33,8338	3,5522	1,6678	5,9242
9,0333	11,2607	3,1294	35,2387	4,5852	1,9121	8,7673
9,3667	11,5679	3,1829	36,8194	5,7861	2,1682	12,5458
9,7000	11,5877	3,2148	37,2516	6,9486	2,4019	16,6897
10,0333	11,7185	3,2407	37,9756	8,0990	2,6093	21,1324
10,3667	11,7106	3,2431	37,9785	9,0836	2,7818	25,2689
10,7000	11,7443	3,2540	38,2153	9,9610	2,9327	29,2122
11,0333	11,9880	3,2949	39,4994	10,9799	3,0925	33,9556
11,3667	12,0237	3,3023	39,7053	11,4752	3,1729	36,4092
11,7000	11,8453	3,2697	38,7307	11,5945	3,1954	37,0491
12,0333	12,4042	3,3390	41,4177	12,4113	3,3114	41,0986
12,3667	12,7114	3,3726	42,8704	12,8015	3,3692	43,1305
12,7000	12,6024	3,3534	42,2602	12,6822	3,3380	42,3336
13,0333	13,0424	3,4164	44,5573	12,9774	3,3774	43,8295
13,3667	9,9963	2,7937	27,9267	9,5566	2,7052	25,8524
13,7000	13,0503	3,4447	44,9543	12,6013	3,3307	41,9707
14,0333	12,5152	3,3639	42,0992	11,4247	3,1909	36,4549
14,3667	13,2841	3,4675	46,0621	11,8472	3,2229	38,1819
14,7000	12,7114	3,3950	43,1552	9,9974	2,9294	29,2861
15,0333	12,3408	3,3271	41,0590	8,8915	2,8199	25,0728
15,3667	5,2875	2,0591	10,8872	2,8061	1,6036	4,4999
15,7000	11,9821	3,2718	39,2030	6,1096	2,2964	14,0301
16,0333	11,5600	3,1952	36,9358	4,9087	2,0397	10,0123
16,3667	10,5354	3,0380	32,0064	3,4834	1,7019	5,9285
16,7000	9,7050	2,8917	28,0639	2,1632	1,3402	2,8991
<b>Média</b>	<b>10,8226</b>	<b>3,0280</b>	<b>34,3643</b>	<b>7,3794</b>	<b>2,3428</b>	<b>21,2287</b>

**Tabela 8 – Demais grandezas, intervalos de 20 min., 7h às 17h, dia 03/03/2008**

tempo [hora]	VM [V]	IM [A]	PM [W]	VF [V]	IF [A]	PF [W]
7,0333	0,0740	19,8516	338,9543	0,0103	18,5529	94,6478
7,3667	14,2053	33,9518	721,9912	0,0929	25,2319	176,1399
7,7000	21,1287	37,7551	812,7495	0,5065	30,4267	271,8839
8,0333	26,3321	36,5492	875,7246	1,2608	31,9110	351,5489
8,3667	30,4822	41,8367	920,1776	3,4555	35,8071	430,1175
8,7000	33,8338	38,4972	945,7381	5,9242	37,2913	506,1280
9,0333	35,2387	37,7551	959,4443	8,7673	37,4768	576,2916
9,3667	36,8194	38,7755	976,4847	12,5458	39,7032	646,8206
9,7000	37,2516	42,1150	983,5232	16,6897	43,2282	710,0410
10,0333	37,9756	40,9091	991,6728	21,1324	40,9091	771,0687
10,3667	37,9785	40,8163	990,5616	25,2689	40,6308	821,1334
10,7000	38,2153	43,3210	993,8954	29,2122	42,6716	870,1017
11,0333	39,4994	43,5065	1010,9358	33,9556	43,4137	926,0132
11,3667	39,7053	45,5473	1010,9358	36,4092	44,9907	953,7864
11,7000	38,7307	43,5993	999,0817	37,0491	43,1354	965,8457
12,0333	41,4177	44,2486	1030,1990	41,0986	43,5993	1012,2560
12,3667	42,8704	45,1763	1045,3872	43,1305	44,2486	1035,2780
12,7000	42,2602	40,4453	1024,2719	42,3336	39,8887	1012,9870
13,0333	44,5573	40,6308	1052,4254	43,8295	40,0742	1033,8170
13,3667	27,9267	45,1763	892,0240	25,8524	44,6197	878,8721
13,7000	44,9543	42,5789	1068,3546	41,9707	41,4657	1020,2960
14,0333	42,0992	40,9091	1033,5330	36,4549	40,1670	939,8998
14,3667	46,0621	44,2486	1095,0261	38,1819	43,2282	980,0977
14,7000	43,1552	45,1763	1052,0554	29,2861	43,5065	875,2177
15,0333	41,0590	41,6512	1023,1609	25,0728	40,6308	821,8642
15,3667	10,8872	41,8367	625,3058	4,4999	38,9610	466,6610
15,7000	39,2030	41,7440	1003,5270	14,0301	39,3321	680,0753
16,0333	36,9358	42,0223	978,7074	10,0123	38,3117	606,9882
16,3667	32,0064	42,1150	924,2524	5,9285	37,3840	505,7626
16,7000	28,0639	41,8367	880,5404	2,8991	36,3636	410,7494
<b>Média</b>	<b>34,3643</b>	<b>40,8194</b>	<b>942,0214</b>	<b>21,2287</b>	<b>38,9054</b>	<b>711,7463</b>

A Figura 70 apresenta as curvas de potência instantânea para os dois módulos fotovoltaicos, trabalhando em condições idênticas de operação, com dados coletados entre 7h00 e 17h00 (*LCT*).



**Figura 70 – Potência instantânea dos Painéis Fotovoltaicos – 03/03/2008**

Nestas curvas verifica-se o comportamento típico dos dias de verão na localidade onde está instalado o Laboratório de Campo, onde se destaca o céu claro no período da manhã (o traçado da curva é ‘suave’, sem alterações bruscas nos valores de potência instantânea) e nebulosidade intensa no período da tarde (verificada pelos traços verticais indicando bruscas variações nos valores de potência, notadamente a partir das 12h00). Neste dia, em particular, não foram observadas chuvas, bastante comuns nesta época do ano.

Pelo fato do Sol nascer mais cedo, observa-se que o painel móvel já inicia geração de potência com valores significativos nas primeiras amostragens de dados do

dia, apresentando 17,4 W por volta da 7h30min. Ao final do dia, o sistema encerrou sua amostragem de dados às 17h, mas pelo último valor coletado de potência (25 W para o painel móvel) conclui-se que ainda havia algum tempo de Sol.

Os máximos valores de potência registrados foram 48,64 W (painel móvel) e 48,36 W (painel fixo), significativamente superiores aos valores registrados na Figura 66, que foram, respectivamente, 32,18 W e 31,97 W. Isto se deve à época do ano; sendo verão no hemisfério Sul, a Terra está mais próxima ao Sol, recebendo por este motivo mais energia em sua superfície.

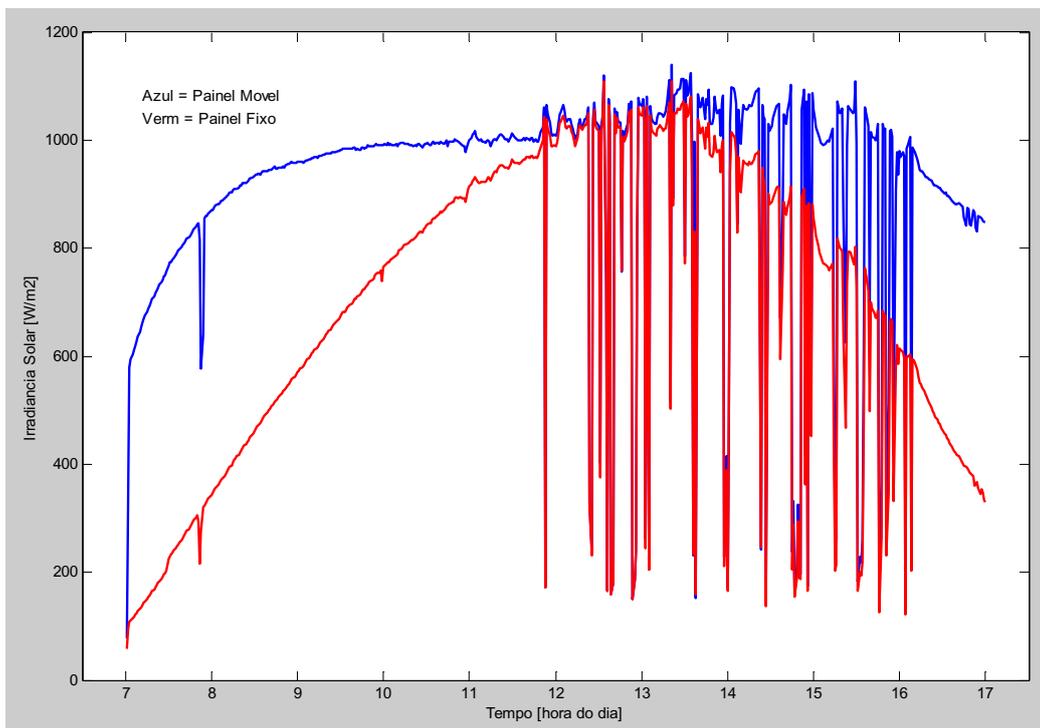
Conforme previsto, o comportamento do painel fotovoltaico móvel evidencia seu melhor desempenho em termos de potência instantânea, chegando a atingir em alguns instantes picos de 29,2 W acima da potência do painel fixo (295% de ganho na geração de energia elétrica ou quase quatro vezes mais).

Calculando-se a energia gerada nesta situação, chega-se a um resultado de 198,3 Wh para o painel fixo, contra 329,3 Wh para o painel móvel, o que representa um ganho bruto de 66,14% na geração de energia. Observa-se um aumento substancial também da energia gerada em comparação com um dia de inverno, chegando-se a +26,71% para o painel fixo e +46,44% para o painel móvel.

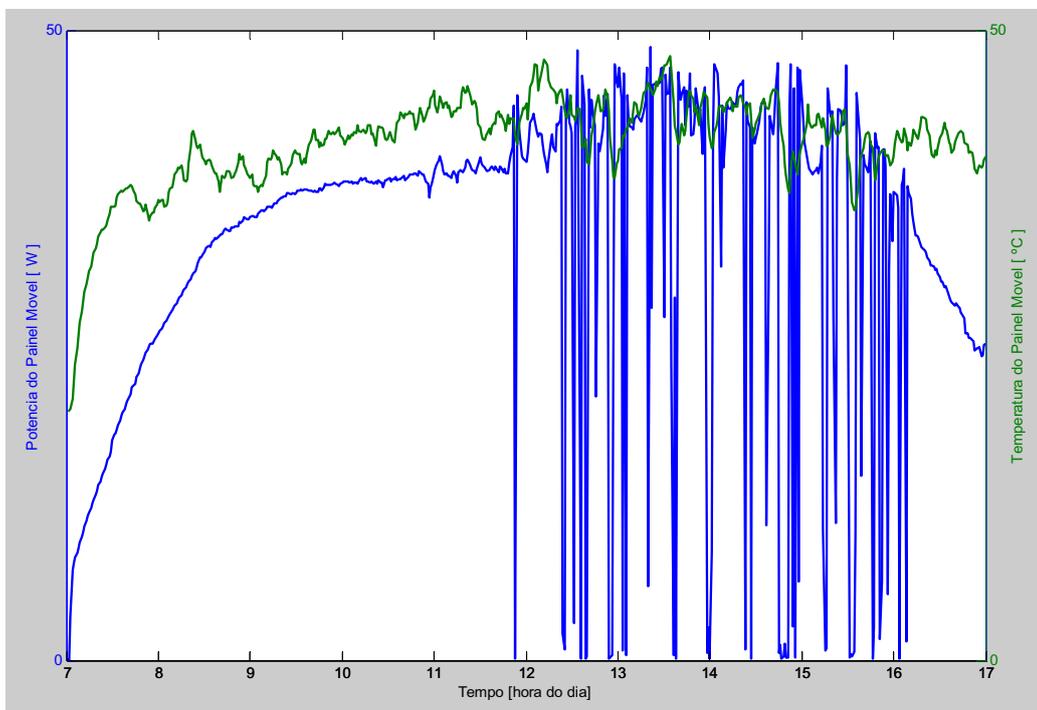
As curvas de irradiância medida no plano dos painéis e apresentadas na Figura 71, para o mesmo dia citado na Figura 70, apresentam como aspectos relevantes, além dos já citados, altos valores para as primeiras coletas de dados, registrando  $627 \text{ W.m}^{-2}$  às 7h09min e valores de pico bastante superiores aos observados em dias de inverno, chegando a atingir  $1109 \text{ W.m}^{-2}$  no painel fixo e  $1125 \text{ W.m}^{-2}$  no painel móvel, aumentos estes justificados novamente pela época do ano (verão no hemisfério Sul).

Novamente foi traçado um gráfico relacionando a Potência Instantânea do Painel Móvel com a sua temperatura de superfície, a fim de avaliar se há perda de eficiência devido a este fator. A curva está apresentada na Figura 72.

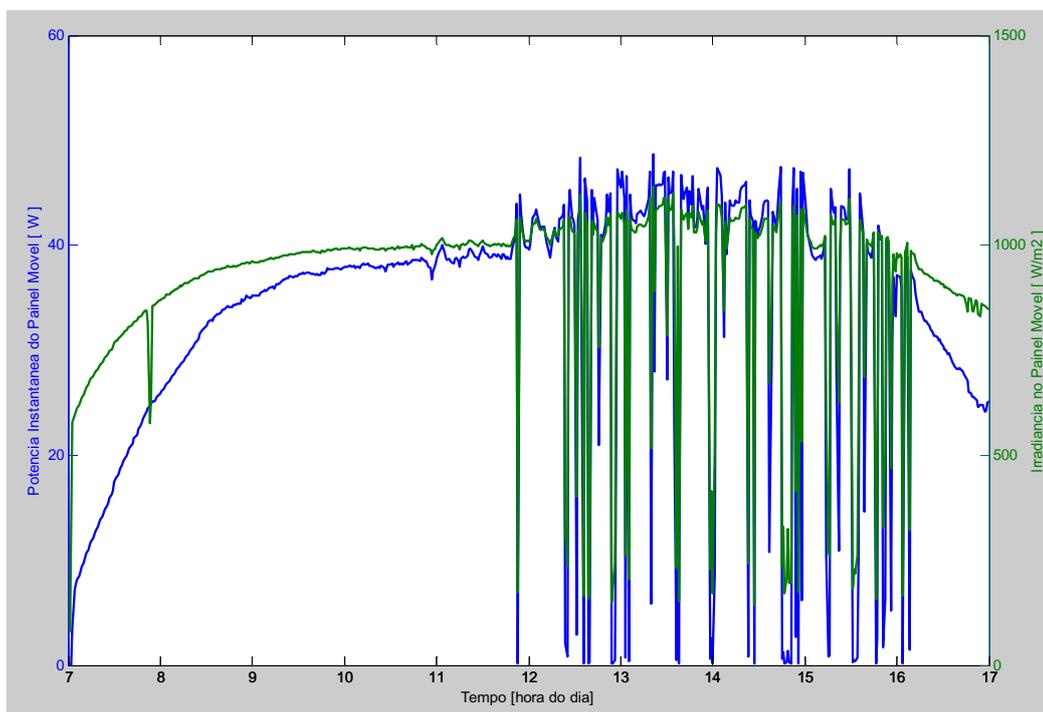
De acordo com o observado no gráfico, não se evidencia este tipo de comportamento, mas sim uma relação muito próxima entre o nível de irradiância e a potência instantânea (vide Figura 73).



**Figura 71 – Insoiação incidente nos Painéis Fotovoltaicos – 03/03/2008**



**Figura 72 – Relação entre Potência Gerada e Temperatura do Módulo – 03/03/08**

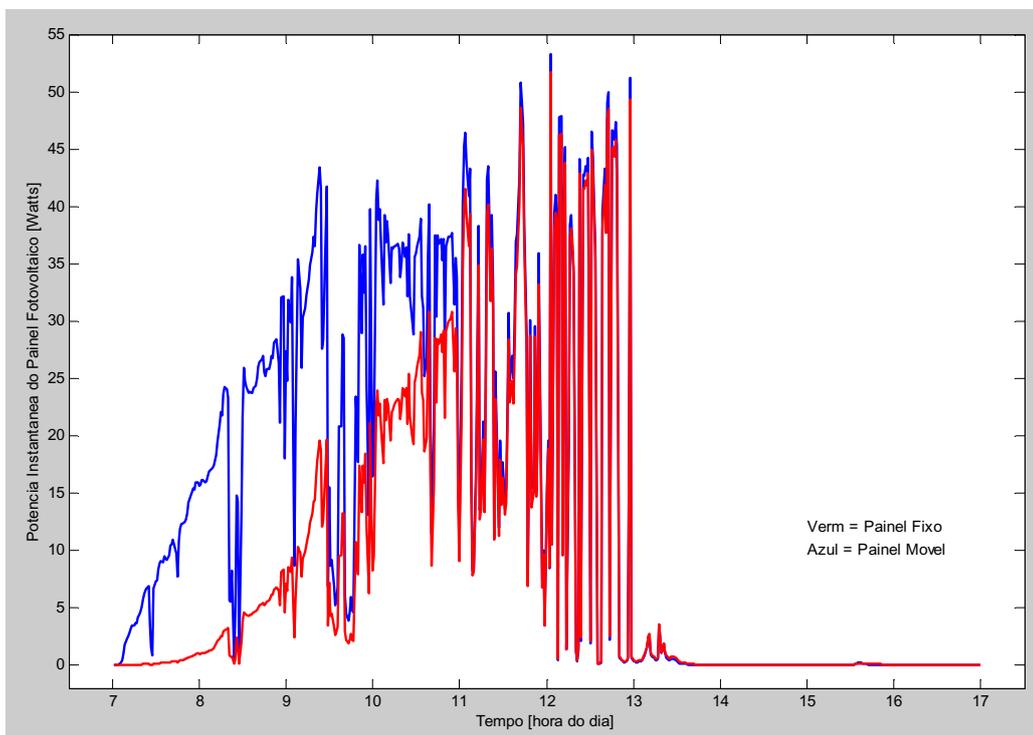


**Figura 73 – Relação entre Potência Gerada e Irradiância sobre o Módulo – 03/03/08**

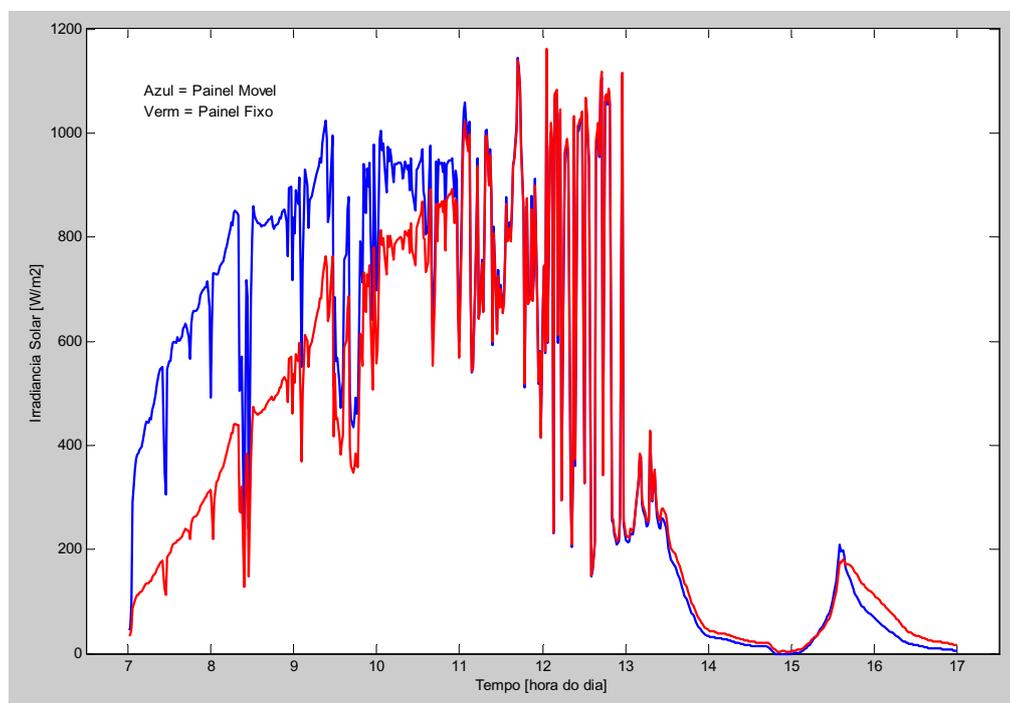
A seguir apresenta-se um conjunto de curvas representando os dados coletados no dia 08/04/2008 (Figura 74, Figura 75 e Figura 76), referente à época de outono na localidade onde está instalado o Laboratório de Campo, escolhido em razão de apresentar um comportamento bastante particular, referente a um dia onde houve grande quantidade de nuvens no período da manhã, com aumento da nebulosidade a partir das 11h, e chuva intensa depois das 13h, prolongando-se até o final da coleta de dados do dia, às 17h.

No período da manhã, a presença de nuvens causou uma instabilidade nos valores de potência até as 12h; entre 12h e 13h, com o aumento da nebulosidade, observa-se uma variação mais intensa da potência instantânea, culminando com o início de uma forte chuva às 12h59min, que reduziu a potência em ambos os painéis a valores próximos de zero.

As curvas de radiação incidente (Figura 75) novamente apontam valores máximos da ordem de  $1100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  em ambos os painéis, causada pela proximidade da Terra com o Sol nesta época do ano, e após as 13h, uma drástica redução nestes valores, devido à forte nebulosidade causada pela chuva.

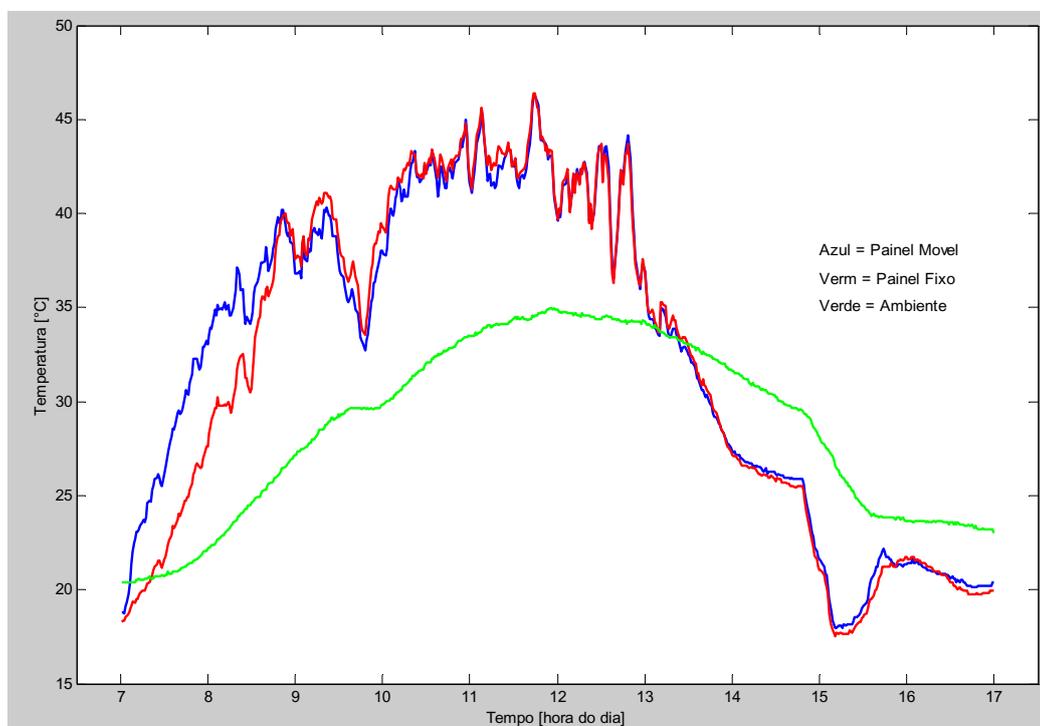


**Figura 74 – Potência instantânea dos Painéis Fotovoltaicos – 08/04/2008**



**Figura 75 – Irradiância incidente nos Painéis Fotovoltaicos – 08/04/2008**

Por se tratar de início de outono, o comportamento das temperaturas ainda é típico da época de verão. Por volta das 11h45min, estas atingiram 46,3°C na superfície dos painéis e 34,5°C no ambiente interno do armário. Na Figura 76 verifica-se a variação da temperatura ambiente numa curva bastante suave, sem grandes variações instantâneas; isto se deve ao fato do sensor estar colocado em um ambiente fechado, sem interferência direta de ventos ou outros fatores que pudessem causar uma brusca variação de temperatura. O valor máximo é atingido por volta das 12h e após isso, decai acompanhando a variação da temperatura externa, influenciada diretamente pela chuva.

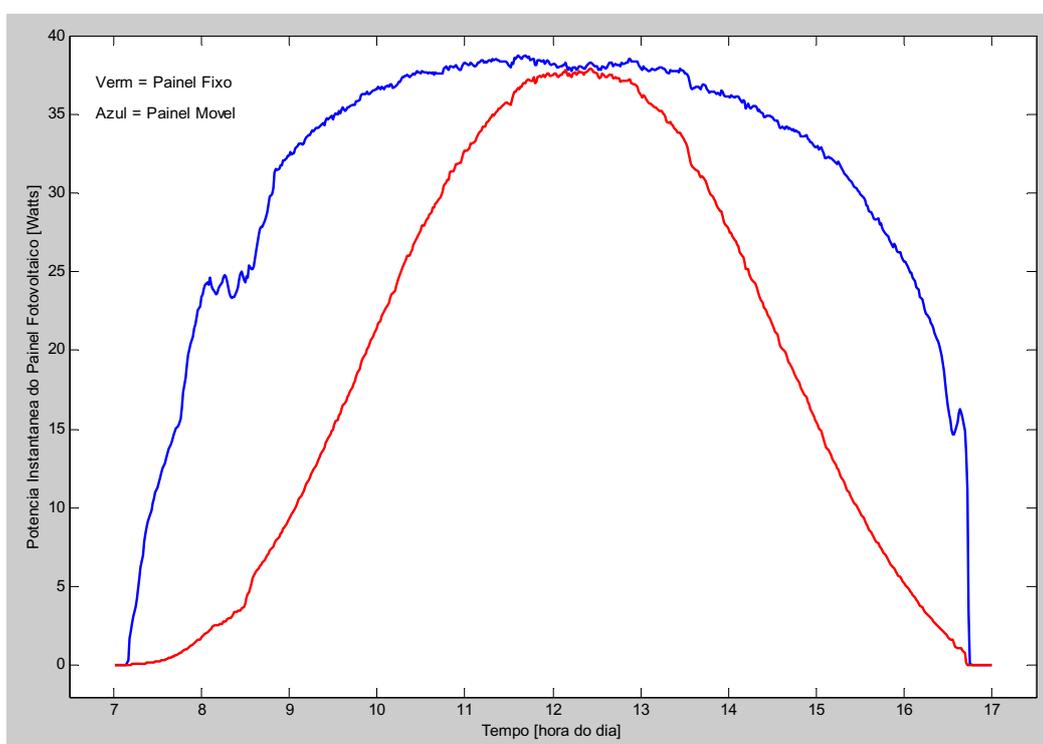


**Figura 76 – Temperaturas dos Painéis Fotovoltaicos e Ambiente – 08/04/2008**

Na superfície dos painéis, as variações de temperatura são mais acentuadas, pois sofrem a influência direta da ação do Sol (ou da ausência da insolação direta, pela ação das nuvens), de ventos e da chuva. Isto pode ser verificado pelo próprio perfil da curva. Após o início da chuva, por volta das 13h, a temperatura cai rapidamente; sobre a superfície dos painéis há uma queda de 10°C em um intervalo de dez minutos, enquanto a temperatura ambiente interna ao armário varia menos de 0,5°C.

Neste dia, integrando-se as curvas de potência ao longo do dia, o resultado da energia gerada é 86,6 Wh para o painel fixo, contra 138 Wh para o painel móvel, o que representa um ganho de 59,35% na geração de energia, embora os valores absolutos de energia gerada sejam bem menores que os resultados anteriores apresentados, devido à baixíssima radiação incidente no período da tarde.

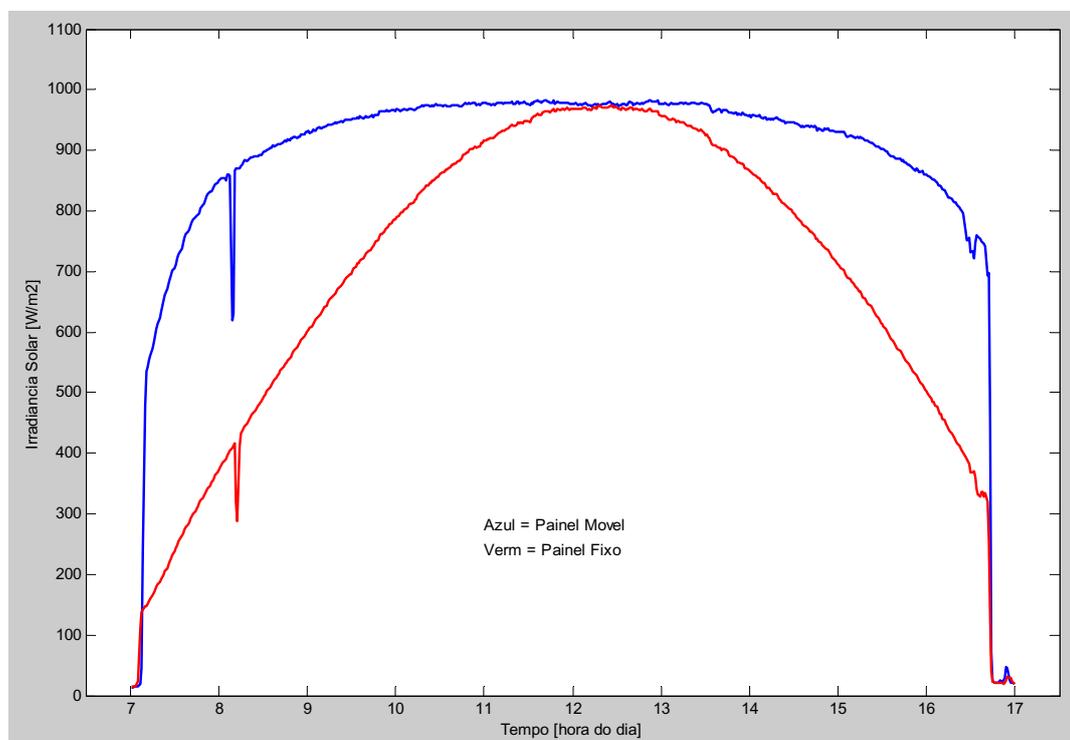
Para completar o conjunto de resultados sob análise, apresentam-se as curvas de potência (Figura 77) e radiação incidente (Figura 78) correspondentes ao início do mês de maio, referentes a um dia totalmente sem nuvens e com perfis praticamente sem interferências.



**Figura 77 – Potência instantânea dos Painéis Fotovoltaicos – 06/05/2008**

As curvas de potência instantânea (Figura 77) apresentam um comportamento livre de interferências, sendo registrada apenas uma pequena sombra entre 8h00 e 8h40min, que alterou ligeiramente a curva do painel móvel, sem alteração significativa na curva do painel fixo, mas com registro nas curvas de radiação (Figura 78) de ambos os

painéis. Nas curvas de radiação a interferência é de menor duração em tempo, mas mais acentuada em valor, devido à característica do registro.



**Figura 78 – Insolação incidente nos Painéis Fotovoltaicos – 06/05/2008**

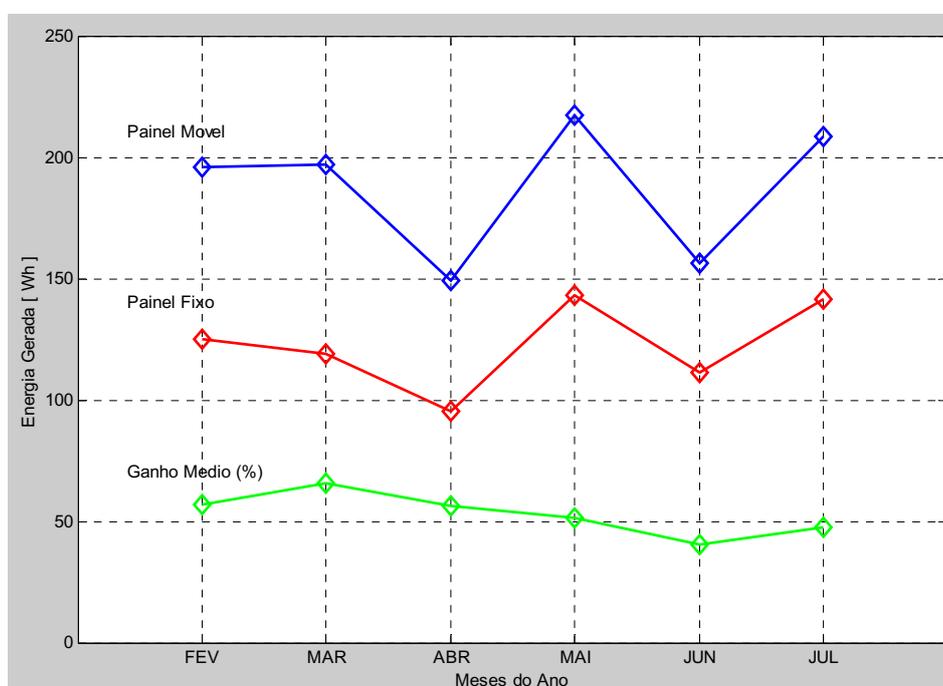
O sensor de radiação é pontual, ou seja, detecta a sombra quando ela passa exatamente sobre seu dispositivo foto-sensível, o qual tem uma área reduzida (aproximadamente 1cm de diâmetro). Já o módulo fotovoltaico, por ter uma dimensão de 1m de comprimento por 50cm de largura, fica exposto à mesma sombra por um intervalo de tempo maior, sendo que a mesma atinge algumas das células componentes do módulo.

Nesta condição, o ganho na geração de energia foi de 61,32%, tendo painel móvel gerado 301,8 Wh e o painel fixo gerado 187,1 Wh.

A Tabela 9 resume as médias apuradas durante o período de coleta de dados, entre fevereiro e julho de 2008. Estes resultados foram obtidos a partir da soma dos valores da energia gerada diariamente dentro de cada mês, dividida pelo número de dias de amostragem, o que resultou na Média Diária de Energia Gerada para cada um dos dois painéis.

**Tabela 9 – Dados médios de geração de energia elétrica por ambos os painéis**

Mês	Média Diária da Energia Gerada (Painel Fixo – Wh)	Média Diária da Energia Gerada (Painel Móvel – Wh)	Média do Ganho na Geração (Móvel/Fixo – %)
Fev/2008	125,0197	196,0899	56,8471
Mar/2008	119,2039	197,2418	65,4659
Abr/2008	95,2888	149,0618	56,4317
Mai/2008	143,2470	217,2234	51,6426
Jun/2008	111,2681	156,3569	40,5226
Jul/2008	141,2527	208,6112	47,6866
<b>Média</b>	<b>122,6</b>	<b>187,4</b>	<b>53,1</b>

**Figura 79 – Dados médios de geração de energia e ganho do sistema móvel**

A comparação entre os valores médios gerados resultou na Média do Ganho na Geração, valor apresentado em porcentagem, por ser comparativo. Para completar este conjunto de dados, preencheu-se uma última linha referente às médias de cada coluna, o que permitiu que se calculasse a Média do Ganho na Geração para todo o período analisado, resultando no valor de 53%. O gráfico da Figura 79 ilustra os resultados da Tabela 9.

No sistema implantado no laboratório de campo não foram instaladas baterias, pois a função destas é armazenar a energia gerada para posteriormente fornecê-la às cargas durante os períodos em que não há radiação solar incidente nos painéis. Como o objetivo principal do experimento foi verificar a geração de energia por ambos os painéis (móvel e fixo) sob as mesmas condições de carga, não haveria sentido em conectar-se baterias a estes sistemas, haja vista também a influência que as características destas baterias poderia ocasionar nos resultados.

Entretanto, considerando-se que a viabilidade da proposta exige que o sistema seja totalmente autônomo, com a capacidade de se auto-alimentar fornecendo energia para os motores e sua placa de acionamento e controle, além de alimentar o próprio *hardware* que controla o movimento, há a necessidade de se avaliar qual a parcela da energia gerada que o conjunto móvel consome para funcionar.

No experimento montado, a alimentação do CLP e de todo o sistema responsável pelo movimento foi obtida a partir da rede convencional de energia, quando em um sistema real, não-experimental, esta energia deverá ser suprida pelo próprio aparato fotovoltaico juntamente com seu banco de baterias.

Com a finalidade de se avaliar o ganho líquido na geração de energia, mediu-se o consumo dos motores, dos circuitos eletrônicos e do conjunto CLP + expansões. Para tanto, foi utilizada a mesma metodologia da medição de potência gerada pelo painel fotovoltaico, ou seja, mediu-se a tensão contínua fornecida pela fonte de alimentação e a corrente de cada um dos componentes utilizando-se resistor em série. Com estes resultados, fizeram-se os cálculos complementares.

O motor que aciona o movimento de Azimute é acionado a cada 4 minutos, recebendo um trem de 35 pulsos em cada bobina, num intervalo total de aproximadamente 455 ms.

A Figura 80 apresenta a tela do osciloscópio digital com a forma de onda de tensão observada sobre um resistor de  $0,978 \Omega$  colocado em série com a alimentação do conjunto “*Driver + Motor*”.

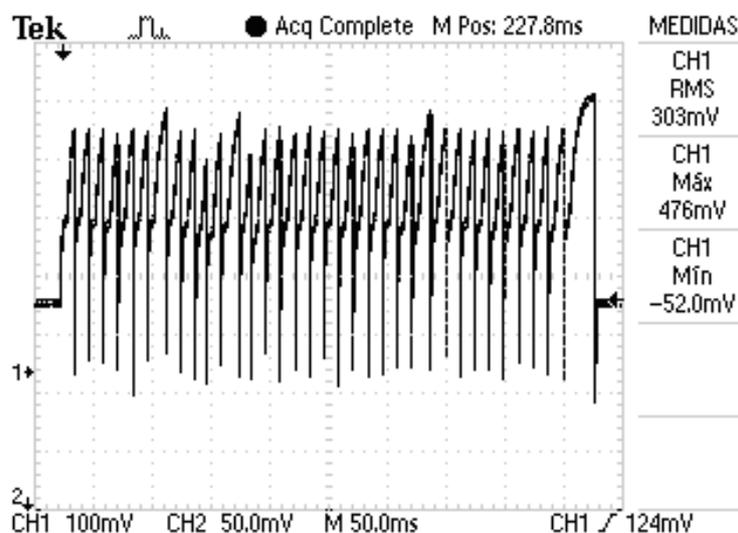


Figura 80 – Trem de pulsos aplicado ao motor de passo para movimento de  $1^\circ$

Com o auxílio das funções automáticas do osciloscópio, mediu-se um valor eficaz de 303 mV nesta forma de onda, considerado um intervalo de 500 ms. Calcula-se assim a corrente e, conhecido o valor contínuo de tensão de 22,3 V da fonte de alimentação, a potência consumida da fonte em cada disparo também pode ser calculada:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0,303}{0,978} = 0,3098 A \Rightarrow P = V.I = 22,3 * 0,3098 = 6,909 W$$

Durante 1 hora (60 minutos), o motor é acionado uma vez a cada quatro minutos, totalizando 15 disparos neste intervalo. Como o painel movimenta-se durante um intervalo de 10 h durante o dia, são disparados 150 trens de pulso por dia, e o tempo total durante o qual o motor fica acionado é igual a:

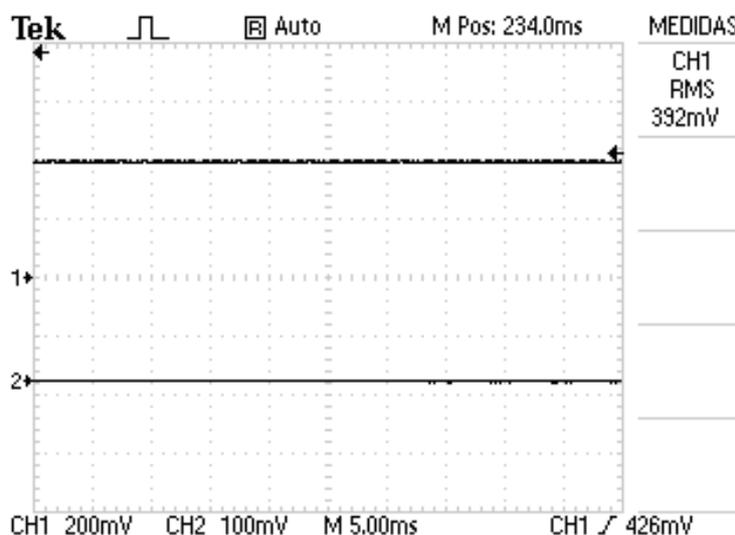
$$150 * 455ms = 68,25s = \frac{68,25}{60} \text{min} = 1,1375 \text{min} = \frac{1,1375}{60} h = 0,01896h$$

e a energia consumida pelo conjunto “*Driver* + Motor” durante o dia pode ser calculada:

$$E = P.t = 6,909 * 0,01896 = 0,131Wh$$

Dentre os resultados coletados, considerando-se dias nublados, o menor valor de geração de energia obtido pelo painel móvel foi 138 Wh, o que significa que a energia consumida pelo movimento representou 0,095% da energia gerada, no pior caso. Como este consumo não se altera para os outros dias, pode-se afirmar que a parcela consumida pelo conjunto sempre é inferior a um milésimo da energia gerada.

Além do consumo do sistema eletromecânico, verificou-se ainda o consumo do conjunto CLP + expansões. Neste caso, a corrente consumida é constante, e foi aferida da mesma maneira, utilizando-se um resistor em série com a fonte de alimentação. A Figura 81 apresenta a tensão medida sobre este resistor.



**Figura 81 – Tensão medida no resistor em série com o conjunto CLP + expansões**

O osciloscópio apresentou, neste caso uma tensão eficaz de 392 mV sobre o resistor de 0,978  $\Omega$ , permitindo o cálculo da corrente e da potência instantânea:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0,392}{0,978} = 0,401A \Rightarrow P = V.I = 22,3*0,401 = 8,938W$$

Por se tratar de valor contínuo, isso representa a energia consumida durante 1 hora (60 minutos), o que totaliza 89,38 Wh durante 1 dia. O valor verificado neste caso foi bastante elevado e incompatível com a aplicação proposta, atingindo, na pior situação, 65% da energia gerada.

Entretanto, há de se considerar que o uso do CLP com suas expansões serviu especificamente aos objetivos da pesquisa, incluindo a coleta de dados e a flexibilidade de alterações no programa através da Interface Homem-Máquina. Em um sistema autônomo, para funcionamento contínuo, este tipo de controlador não é necessário, e o programa de movimentação pode ser implantado em um microcontrolador dedicado, por exemplo, da família PIC, de consumo baixíssimo e compatível com a aplicação proposta.

Tomando-se como exemplo o microcontrolador PIC 16F877, a partir de seus dados de catálogo, encontra-se uma corrente de operação típica de 0,6 mA para uma tensão de 3 V em frequência de 4 MHz, o que resulta em:

$$P = V.I = 3*0,0006 = 1,8mW$$

Considerando-se a operação deste controlador por 10 horas diárias, continuamente, a energia por ele consumida é:

$$E = P.t = 0,0018*10 = 0,018Wh$$

O valor encontrado representa cerca de 0,013% da energia gerada, o que pode ser considerado desprezível, e que, quando somado à energia consumida pelos motores e *drivers* resulta em um consumo máximo de 0,11% da energia gerada sendo

consumida pelo sistema de movimentação. Considerando-se ainda a necessidade de memória adicional para o controlador e o consumo de seus periféricos, sempre da ordem de mili-Watt-hora, o consumo total do sistema de movimento nunca ultrapassará os 0,2% da energia gerada.

### 5.8 Análise da Viabilidade Econômica

Sob o ponto de vista do melhor aproveitamento da energia solar, os resultados apresentados demonstram a superioridade do sistema móvel em relação ao fixo. Entretanto, a implementação proposta apresenta maior complexidade construtiva por necessitar de diversos componentes eletromecânicos não utilizados em um sistema fixo.

A Tabela 10 apresenta uma relação com o custo dos componentes para o sistema fotovoltaico móvel, considerando os valores dispendidos para a construção do protótipo, incluídos materiais e mão de obra e excluído o CLP, que nesta relação é substituído por um microcontrolador, objetivando uma análise mais realista sob a óptica do consumo de energia. A Tabela 11 apresenta o custo do sistema fotovoltaico fixo, já contabilizados os custos de mão de obra e materiais envolvidos.

**Tabela 10 – Custo do Sistema Fotovoltaico Móvel (atualizado em Novembro de 2008)**

Quantidade	Item	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
01	Suporte Mecânico Móvel	75,00	75,00
01	Painel Fotovoltaico	1.020,00	1.020,00
02	Motor de Passo	40,00	80,00
02	Redutor Mecânico	70,00	140,00
01	Placa de Driver	75,00	75,00
01	Microcontrolador PIC16F877	16,50	16,50
01	Placa do Controlador	25,00	25,00
<b>Custo Total de um Sistema Móvel com 50 Wp</b>			<b>1.431,50</b>

**Tabela 11 – Custo do Sistema Fotovoltaico Fixo (atualizado em Novembro de 2008)**

Quantidade	Item	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
01	Suporte Mecânico Fixo	35,00	35,00
01	Painel Fotovoltaico	1.020,00	1.020,00
<b>Custo Total de um Sistema Fixo com 50 Wp</b>			<b>1.055,00</b>

Comparando-se os custos de ambos os sistemas, verifica-se um custo 35,7% superior para o sistema fotovoltaico móvel. Entretanto, este custo maior é compensado pelo ganho médio na conversão de energia deste sistema, da ordem de 53%.

Nesta situação, calculando-se a relação entre o custo de cada um dos sistemas pela sua geração média diária de energia, conclui-se que o retorno do investimento realizado para implantação de um sistema fotovoltaico com posicionamento automático ocorre em um tempo 11,23% inferior ao tempo necessário para recuperação do investimento realizado na instalação de um sistema fotovoltaico fixo.

## 6 CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento das diferentes etapas, é possível afirmar que a pesquisa realizada atingiu os objetivos propostos, dentre os quais a implantação de um laboratório na área de energias alternativas, o projeto e a construção de um sistema automático de posicionamento para painéis fotovoltaicos com tecnologia simplificada e baixo custo, além da avaliação do ganho na conversão da energia solar em energia elétrica que este sistema com posicionamento automático apresenta em relação a um sistema idêntico, porém fixo.

Com base na revisão bibliográfica realizada e nos resultados experimentais obtidos, importantes conclusões puderam ser extraídas e estas passam agora a ser elencadas:

- Os sistemas fotovoltaicos apresentam seu maior rendimento quando a incidência dos raios solares é perpendicular à superfície do painel, mas dispositivos de posicionamento têm sido utilizados somente em grandes instalações (conjuntos com capacidade de geração da ordem de Megawatts) e nem sempre são empregados em

sistemas domésticos por serem caros, complexos e necessitarem de manutenção periódica por possuírem partes móveis e motores;

- Neste trabalho foram verificados resultados de aumento na energia gerada de até 70% para determinadas situações, com um valor médio de 53%, sendo que o consumo dos componentes eletromecânicos responsáveis pelo controle e movimento do painel representa menos de 0,1% desta energia. Estes resultados demonstram que é possível a implementação de conjuntos posicionadores que proporcionem um ganho considerável na geração de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos, com o uso de mecanismos simplificados e tecnologia de baixo custo;
- Uma contribuição bastante significativa e que difere o conjunto construído de outros sistemas até então conhecidos e relatados nas publicações consultadas, refere-se ao suporte mecânico desenvolvido, o qual posiciona o painel com dois graus de liberdade, entretanto movimentando apenas um motor ao longo do dia. Isto resulta em significativa redução na complexidade do programa de controle, além de proporcionar menor consumo de energia para a movimentação do painel. Neste suporte, a inclinação é mantida constante durante todo o dia e o movimento do painel ocorre pela rotação do mesmo em um eixo que se localiza paralelo ao seu comprimento maior, unindo o centro dos dois lados menores;
- A não utilização de sensores para determinação da posição aparente do Sol representa inovação tecnológica, pois evita movimentos desnecessários em casos de sombras causadas por nuvens, por exemplo. O programa de controle executa rotinas que convertem a hora do relógio local na hora solar, utiliza as equações de posicionamento da Terra em relação ao Sol, prevendo com exatidão a localização do Sol no céu, e acionando os motores de passo de modo a direcionar o painel solar em posição perpendicular aos raios incidentes;

- Pelo fato de utilizar motores de passo para a movimentação do painel fotovoltaico, a proposta apresentada significa uma solução simplificada, pois não envolve malha de realimentação para controle de posição, sendo calibrado uma vez ao dia, no início do movimento, através de uma chave de fim de curso; o *driver* para este tipo de acionamento, que há algum tempo era considerado um circuito complexo, atualmente apresenta-se como um elemento também simplificado, de baixo custo, composto apenas de dois circuitos integrados, e um reduzido conjunto de componentes auxiliares ao funcionamento destes circuitos integrados;
- A utilização de um Controlador Lógico Programável para controle do movimento e coleta dos dados experimentais se mostrou perfeitamente adequada considerando-se o desenvolvimento realizado enquanto atividade de pesquisa, pois este tipo de Controlador apresenta características importantes de flexibilidade, facilidade de programação e re-programação, grande quantidade de portas de entrada e saída e robustez para operação em ambientes externos, sujeito a intempéries. Entretanto, devido a seu custo, dimensões físicas, e principalmente, consumo de energia, certamente não é a melhor solução para a implementação de um sistema de movimento para painel fotovoltaico. A construção de um controlador dedicado, desenvolvido especificamente para esta finalidade, com *hardware* simplificado, alcança as propostas iniciais de simplicidade e baixo custo, além de apresentar um consumo de energia significativamente inferior ao CLP, desempenhando as tarefas de cálculo da posição relativa Terra-Sol e acionamento dos motores de passo com eficiência.
- A comparação entre os custos de implantação para ambos os sistemas e o ganho na geração de energia elétrica obtido com o sistema móvel desenvolvido permitiu concluir que o retorno do investimento realizado para implantação de um sistema fotovoltaico com posicionamento automático ocorre em um tempo inferior ao tempo necessário para recuperação do investimento realizado na instalação de um sistema fotovoltaico fixo, justificando sua viabilidade econômica.

Dentro deste contexto, conclui-se que o sistema proposto é uma alternativa viável, tanto do ponto de vista econômico quanto das facilidades de implantação, operação e manutenção, para o fornecimento de energia elétrica para domicílios rurais de baixo consumo, ou consumidores em áreas isoladas, para os quais a extensão da rede elétrica convencional signifique alto custo ou apresente dificuldades de ordem técnica. Além disso, a pesquisa desenvolvida representou uma contribuição aos estudos na área de sistemas fotovoltaicos isolados de pequeno porte, por apresentar soluções simplificadas como a não utilização de sensores para o posicionamento, o uso de motores de passo e um novo modelo de suporte mecânico para 2 graus de liberdade, com movimento alternado dos motores.

Como continuidade deste trabalho, a principal tarefa a ser desenvolvida é a construção de um controlador dedicado, no qual as funções de cálculos e acionamento dos motores possam ser realizadas eficientemente, sem a necessidade do CLP, de modo a diminuir os custos e o consumo do sistema de movimentação.

Aperfeiçoamentos no algoritmo de movimentação podem tornar o posicionamento mais eficiente, com a utilização de lógica nebulosa, permitindo ao controlador decidir se o movimento do painel sob determinadas condições oferece ganho na geração de energia. Algoritmos com lógica *fuzzy* têm simplicidade na implementação e podem oferecer resultados significativos quanto à eficiência do movimento.

Um melhor aproveitamento do sistema de movimento pode ser obtido com um conjunto composto de vários painéis fotovoltaicos ligados em paralelo, de modo a se aumentar a área de captação da energia solar e gerar mais energia elétrica, utilizando um único controlador; neste caso, conexões mecânicas adequadas transmitem o movimento dos 2 motores aos diversos painéis, simultaneamente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-KHADER, M. M.; BADRAN, O. O.; ABDALLAH, S. Evaluating Multi-axes Sun-Tracking System at Different Modes of Operation in Jordan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 12, 2008, pp. 864-873. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/rser>>. Acesso em 17 Set. 2008.

ALDABÓ, R. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002. 162 p. Inclui índice. ISBN 85-88098-09-1.

AL-MOHAMAD, A. Efficiency Improvements of Photovoltaic Panels Using a Sun-Tracking System. In: **Applied Energy Magazine**. Vol. 79, 2004, pp. 345-354. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/apenergy>>. Acesso em 17 Set. 2008.

ARACIL, C.; QUERO, J. M.; CASTAÑER, L.; OSUNA, R.; FRANQUELO, L. G. Tracking System for Solar Power Plants. In: **Records of 32<sup>nd</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, IECON 2006**. Pp. 3024-3029. Novembro 2006. doi: 10.1109/IECON.2006.348127.

ATLAS de Energia Elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p. ISBN 85-87491-09-1

AVOLIO, E. **Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sistemas de movimento utilizando motores de passo**. Bauru, 2004. 147 p. Tese de Livre Docência – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista.

BOGART JR, T. F. **Electronic Devices and Circuits**. 3. ed. New York: Macmillan, 1993. 988 p. Inclui índice. ISBN 0-02-311701-X.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. 5. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1992. 916 p. Inclui índice. ISBN 0-13-249517-1.

CASTANER, L.; SILVESTRE, S. **Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice**. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2002. 358 p. Inclui índice. ISBN 0-470-84527-9.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL) / CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 1999. 204 p.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL) / CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Coletânea de Artigos – Energias Solar e Eólica – volume 1**. Rio de Janeiro, 2003. 232 p.

CERAGIOLI, P. C. **Manual de energia solar fotovoltaica**. São José dos Campos: Siemens, RC Com Sistemas Ltda., 1997. 112 p.

CHOJNACKI, J.; TENETA, J. Control Algorithms for a Remote Sun-Tracking Photovoltaic System. In: **19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference**. Paris, França, pp. 2219-2222. Junho 2004.

CHUN-SHENG, W.; YI-BO, W.; SI-YANG, L.; YAN-CHANG, P.; HONG-HUA, X. Study on Automatic Sun-tracking Technology in PV Generation. In: **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008**. DRPT 2008. Nanjing, China. Pag. 2586-2591. doi: 10.1109/DPRT.2008.4523847.

DAKOL. **Vision 230/260/280 User Guide**. 42p. 2007. Disponível em <[http://www.dakol.com.br/download/Catalogos/Unitronics/PDF/Vision Hardware/](http://www.dakol.com.br/download/Catalogos/Unitronics/PDF/Vision%20Hardware/)>. Acesso em 01 mai. 2007.

DOBON, F.; LUGO, A.; MONEDERO, J.; VALERA, P.; OSUNA, R.; ACOSTA, L.; MARICHAL, G. N. First results of the tetra-track system and control electronics. In: **Proceedings of 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003**, Volume 2, pp. 2050-2053. Maio 2003.

ENSLIN, J. H. R. Maximum Power Point Tracking: A Cost Saving Necessity in Solar Energy Systems. In: **Recordings of 16<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society**, Vol. 2, pp. 1073-1077. Novembro 1990.

EPIA – European Photovoltaic Industry Association. **Solar Generation V – 2008**. Bruxelas, Bélgica, 2008. Disponível em <[http://www.epia.org/fileadmin/EPIA\\_docs/documents/EPIA\\_SG\\_V\\_ENGLISH\\_FULL\\_Sept2008.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/EPIA_docs/documents/EPIA_SG_V_ENGLISH_FULL_Sept2008.pdf)>. Acesso em 08 Out. 2008.

FAIMAN, D.; BERMAN, D.; BUKOBZA, D.; KABALO, S.; KARKI, I.; MEDWED, B.; MELNICHAK, V.; de HELD, E.; OLDENKAMP, H. A 1-Year, Side-by-Side Comparison of: Static; 1-Axis Tracking; and V-Trough Mirror-Assisted Grid-connected PV Modules in a Desert Environment. In: **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003**. Osaka, Japão. Volume 3, pp. 2190-2193. Maio 2003.

FEDRIZZI, M. C. **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos**. São Paulo, 1997. 161 p. Dissertação (Mestrado em Energia/Politécnica) – Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo.

FIORENTINO, J. J. **Avaliação técnica-social de projetos de eletrificação rural com sistemas fotovoltaicos em três comunidades do Estado de Mato Grosso**. Botucatu, 2000. 95 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

FIORENTINO, J. J.; SERAPHIM, O. J. Análise da Eficiência de Módulos Fotovoltaicos Instalados em Condições Normais de Operação. **Revista Energia na Agricultura**. Botucatu. Volume 20, Número 3, 2005, pp. 89-112.

GREEN, M. A. **Solar Cells – Operating Principles, Technology, and System Applications**. New Jersey, EUA: Prentice-Hall Inc., 1982. 274 p. Inclui índice. ISBN 0-13-822270-3.

HANSELMAN, B.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB 6: Curso Completo**. São Paulo: Prentice-Hall, 2003. 676 p. Inclui índice. ISBN 85-87918-56-7.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. Toronto, Canadá: 1983. 390p. ISBN 01-23737-52-4

ITO, M.; KATO, K.; KOMOTO, K.; KICHIMI, T.; SUGIHARA, H.; KUROKAWA, K. An Analysis of Variation of Very Large-Scale PV (VLS-PV) Systems in the World Deserts. In: **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003**. Osaka, Japão. Volume 3, pp. 2809-2814. Maio 2003.

ITO, M.; KATO, K.; KOMOTO, K.; KICHIMI, T.; SUGIHARA, H.; KUROKAWA, K. Comparative Study of Fixed and Tracking System of Very Large-Scale PV (VLS-PV) Systems in the World Deserts. In: **19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference**. Paris, França, pp. 2113-2116. Junho 2004.

JESPERSON, J.; FITZ-RANDOLPH, J. **From Sundials to Atomic Clocks: Understanding Time and Frequency**. New York: Dover Publications, Inc., 1977.

LABORATÓRIO de Engenharia Elétrica/FE/UERJ. **Curso de Controladores Lógicos Programáveis**. Rio de Janeiro: UERJ, 2006. Apostila. 37p. Disponível em: <<http://www.lee.eng.uerj.br/downloads/cursos/clp/clp.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2008.

LAMM, L. O. A New Analytic Expression for the Equation of Time. In: **Solar Energy**. Volume 26, Issue 5, p. 465. 1981.

LEITE, B. H. F. C.; LIMA, E. J. C.; LEÃO, F. L.; PRESTES, R. F. **Estudo do motor de passo e seu controle digital**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. Disponível em: <<http://www.eletronica.org/modules.php?name=News&file=article&sid=15>>. Acesso em: 07 abr. 2008.

LENARDIC, D. **PV Resources**. 2008. Atomstromfreie Website mantido por GREENPEACE ENERGY. Disponível em: <<http://www.pvresources.com/en/>>. Acesso em: 16 Out. 2008.

LUQUE-HEREDIA, I.; MARTIN, C.; MAÑANES, M. T.; MORENO, J. M.; AUGER, J. L.; BODIN, V.; ALONSO, J.; DIAZ, V.; SALA, G. A Subdegree Precision Sun Tracker for 1000X Microconcentrator Modules. In: **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003**. Osaka, Japão. Volume 3, pp. 857-860. Maio 2003.

MAH, Olivia. Fundamentals of Photovoltaic Materials. **National Solar Power Research Institute, Inc.**, San Francisco, California, 21 dez. 1998. 10p. Disponível em: <<http://solar-works.com/sos/fundamentalsofphotovoltaicmaterials.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2008.

MAISH, A. B. Performance of a Self-aligning Solar Array Tracking Controller. In: **Conference Record of the 21<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Specialists, 1990**. Volume 2, pp. 864-869. Maio 1990.

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. **Eletrônica: Volume I**. 7. ed. São Paulo: MacGraw-Hill, 2007. 672 p. Inclui índice. ISBN 978-85-7726-022-5.

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. **Eletrônica: Volume II**. 7. ed. São Paulo: MacGraw-Hill, 2007. 556 p. Inclui índice. ISBN 978-85-7726-023-2.

MARINESCU, D.; MARINESCU, C. Control Optimizing Algorithm for Soft Sun-Trackers. In: **IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, 2006**. Volume 1, pp. 54-57. Maio 2006.

MILLMAN, J.; HALKIAS, C. C. **Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems**. Tokio: MacGraw-Hill Kogakusha, 1972. 911 p.

MINEIRO, S. E., Jr.; DAHER, S.; ANTUNES, F. L. M.; CRUZ, C. M. T. Photovoltaic System for Supply Public Illumination in Electrical Energy Demand Peak. In: **Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004, APEC '04. Nineteenth Annual IEEE**. Vol. 3, pp. 1501-1506.

MME – Brasil. Ministério de Minas e Energia, Assessoria de Comunicação do Luz para Todos. **Informativo Luz para Todos**. Número 12, Julho de 2008. Disponível em <<http://200.198.213.102/luzparatodos/downloads/Informativo%2012.pdf>>. Acesso em 17 Set. 2008.

MME – Brasil. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME: EPE, 2007. Disponível em <[http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_9.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_9.pdf)>. Acesso em 18 Set. 2008.

MONEDERO, J.; DOBON, F.; LUGO, A.; VALERA, P.; OSUNA, R.; ACOSTA, L.; MARICHAL, G. N. Minimizing Energy Shadow Losses for Large PV Plants. In: **Photovoltaic Energy Conversion, Proceedings of 3<sup>rd</sup> World Conference on**. Vol. 2, pp. 2043-2045. Maio 2003.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. São Paulo: LTC, 2001. 295 p. Inclui índice. ISBN 85-216-1269-9.

MOSZKOWICK, M. Aproveitamento das Energias Renováveis – Solar e Eólica. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, ANAIS**. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. (Seção Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura, editado em CD-ROM).

NASCIMENTO, Paulo César. Os Brasileiros que Vivem na Escuridão. **Jornal da Unicamp**, Campinas, out. 2000. Disponível em: <[http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp\\_hoje/ju/out2000/pagina4e5-Ju155.html](http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/out2000/pagina4e5-Ju155.html)>. Acesso em: 10 abr. 2008.

OLIVEIRA, S. H. F. **Geração Distribuída de Eletricidade: Inserção de Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede no Estado de São Paulo**. São Paulo, 2002. 198 p. Tese de Doutorado – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

PEREIRA, E. B. de C. **Controlador Lógico Programável**. Juiz de Fora: UFJF, 2007. Notas de aula da disciplina Automação da Produção. 5 p. Disponível em: <[http://www.engprod.ufjf.br/epd\\_automacao/EPD030\\_PLCs.pdf](http://www.engprod.ufjf.br/epd_automacao/EPD030_PLCs.pdf)>. Acesso em: 07 abr. 2008.

PEREIRA, E. B. de C. **Fundamentos da Programação LADDER**. Juiz de Fora: UFJF, 2007.

Notas de aula da disciplina Automação da Produção. 11 p. Disponível em:

<[http://www.engprod.ufjf.br/epd\\_automacao/EPD030\\_Ladder1.pdf](http://www.engprod.ufjf.br/epd_automacao/EPD030_Ladder1.pdf)>. Acesso em: 07 abr. 2008.

PERLIN, John. The History of Solar Energy – Photovoltaics. In: PERLIN, J. **From Space to Earth: The Story of Solar Electricity**. Michigan: Edwards Brothers, 1999. ISBN 0-937948-14-4. Disponível em: <[http://www.californiasolarcenter.org/history\\_pv.html](http://www.californiasolarcenter.org/history_pv.html)>. Acesso em: 11 abr. 2008.

PIAO, Z. G.; PARK, J. M.; KIM, J. H.; CHO, G. B.; BAEK, H. L. A Study on the Tracking Photovoltaic System by Program Type. In: **ICEMS 2005 – Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005**. Volume 2, pp. 971-973. Set. 2005.

PRITCHARD, D. Sun Tracking by Peak Power Positioning for Photovoltaic Concentrator Arrays. In: **IEEE Control Systems Magazine**. Volume 3, Issue 3, pp. 2-8. Agosto 1983.

QUINTAS, A. R. **Programação em LADDER**. Porto: FEUP, 2006. Notas de aula da disciplina Automação Industrial. 23 p. Disponível em <[http://paginas.fe.up.pt/aiwww\\_apel/files/anexoB-parte2.pdf](http://paginas.fe.up.pt/aiwww_apel/files/anexoB-parte2.pdf)>. Acesso em 10 abr. 2008.

SANTOS, R. R. **Procedimentos para a Eletrificação Rural Fotovoltaica Domiciliar no Brasil: Uma Contribuição a Partir de Observações de Campo**. São Paulo, 2002. 221 p. Tese de Doutorado – Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

SAXENA, A. K.; DUTTA, V. A versatile microprocessor based controller for solar tracking. In: **Conference Record of the 21<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Specialists**. Vol. 2, pp. 1105-1109. Maio 1990.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 2000. 1270 p. Inclui índice. ISBN 85-346-1044-4.

SILVA, C. D. **Avaliação do Potencial das Energias Solar e Eólica para Acionamento de Pequenos Sistemas de Bombeamento na Fazenda Lageado**. Botucatu, 2000. 89 p.  
Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

SOLARBUZZ, Solar Energy Research and Consultancy. Solar Module Prices. 2001.  
Disponível em <<http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm>>. Acesso em 28 Abr. 2008.

STERN, M. J.; WEST, R. T. Development of a Low Cost Integrated 15 KW AC Solar Tracking Sub-Array for Grid Connected PV Power System Applications. In: **Conference Record of the 25<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists**. pp. 1369-1372. Maio 1996.

STINE, W. B., GEYER, M. **Power from the Sun**. 2001. Disponível em: <<http://www.powerfromthesun.net>>. Acesso em: 18 Dez. 2006.

SUNGUR, C. Multi-axes Sun-Tracking System with PLC Control for Photovoltaic Panels in Turkey. In: **Renewable Energy International Journal**. 2004. doi: 10.1016/j.renene.2008.06.020. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/renene>>. Acesso em 17 Set. 2008.

TIBA, C. **ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL – Banco de Dados Terrestres**. Recife: Edit. Universitária da UFPE, 2000. 111 p. ISBN 85-7315-142-0.

TRIGOSO, F. B. M. **Demanda de Energia Elétrica e Desenvolvimento Sócioeconômico: O Caso das Comunidades Rurais Eletrificadas com Sistemas Fotovoltaicos**. São Paulo: USP, 2004. 311p. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-04042005-153411/>>. Acesso em 24 nov. 2007.

URBANO, J. A.; MATSUMOTO, Y.; ASOMOZA, R.; ACEVES, F. J.; SOTELO, A.; JACOME, A. 5 Wp PV Module-Based Stand-Alone Solar Tracking System. In: **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003**. Osaka, Japão. Volume 3, pp. 2463-2465. Maio 2003.

VOROBIEV, P. Y.; GONZALES-HERNANDEZ, J.; VOROBIEV, Y. V. Optimization of the Solar Energy Collection in Tracking and Non-Tracking Photovoltaic Solar System. In: **ICEEE – 1<sup>st</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering**, pp. 310-314. Jun. 2004.

WIKIPEDIA. **Controlador Lógico Programável**. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Clp>>. Acesso em 01 mai. 2007.

WOOLF, H. M. On the Computation of Solar Evaluation Angles and the Determination of Sunrise and Sunset Times. **National Aeronautics and Space Administration**. NASA Report TM-X-164. Set. 1968.

ZILLES, R. **Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <http://www.riosvivos.org.br/arquivos/1242925239.pdf>. Acesso em: 19 set. 2008

## 8 APÊNDICE

### 8.1 Script do MatLab para coleta de dados e cálculo da energia gerada

```
% sinal referente ao dia 20-mar-2008, obtido em campo,  
atribuido a matriz; separam-se os vetores.
```

```
clc;  
clear all; clf;  
xlsread 01-08-08;  
x=ans;  
t=x(:,1); % vetor tempo  
Vmovel=x(:,2); % vetor tensao do painel movel  
Vfixo=x(:,3); % vetor tensao do painel fixo  
Imovel=x(:,4); % vetor corrente do painel movel  
Ifixo=x(:,5); % vetor corrente do painel fixo  
Tamb=x(:,6); % vetor temperatura ambiente  
Tmovel=x(:,7); % vetor temperatura do painel movel  
Tfixo=x(:,8); % vetor temperatura do painel fixo  
Radmovel=x(:,9); % vetor radiacao do painel movel
```

```

Radfixo=x(:,10); % vetor radiacao do painel fixo
Radamb=x(:,11); % vetor radiação ambiente

% calculo das potencias: painel movel e painel fixo
Pmovel=Vmovel.*Imovel; % calculo da potencia
Pfixo=Vfixo.*Ifixo;

th=t/60; % conversao minuto-hora
tdia=th+7; %somar com horario inicial = 7 horas da manha

subplot(3,1,1),plot(tdia,Pmovel,'b',tdia,Pfixo,'r');
subplot(3,2,3),plot(tdia,Vmovel,'b',tdia,Vfixo,'r');
subplot(3,2,4),plot(tdia,Imovel,'b',tdia,Ifixo,'r');
subplot(3,2,5),plot(tdia,Tmovel,'b',tdia,Tfixo,'r',tdia,T
amb,'g');

subplot(3,2,6),plot(tdia,Radmovel,'b',tdia,Radfixo,'r',td
ia,Radamb,'g');

% calculo das energias geradas pelos paineis
Efixo=0; Emovel=0;
for a=1:600
    Efixo=Efixo+Pfixo(a);
    Emovel=Emovel+Pmovel(a);
end
Efixo=Efixo/60000 %conversao para hora
Emovel=Emovel/60000
rendimento=Emovel/Efixo

%text(7,33, 'Azul = Painel Movel');
%text(7,31.5,'Verm = Painel Fixo' );
%XLABEL('Tempo [hora do dia]')
%YLABEL('Potencia Instantanea do Painel Fotovoltaico
[Watts]')

```