

MÁRIO AFONSO RIBEIRO DO CANTO

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO PARA MONITORAMENTO DE FONTES
ALTERNATIVAS DE ENERGIA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá

2007

C232 Canto, Mário Afonso Ribeiro do
Projeto e desenvolvimento de um sistema automatizado
para monitoramento de fontes alternativas de energia / Mário
Afonso Ribeiro do Canto. – Guaratinguetá : [s.n.], 2007
71f.: il.

Bibliografia: f.65-67
Dissertação mestrado – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, 2007.
Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

1. Monitoramento de fontes alternativas 2. Energia
Solar 3. Energia Eólica I. Título

CDU 620.91



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**“PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO
PARA MONITORAMENTO DE FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA”**

MARIO AFONSO RIBEIRO DO CANTO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

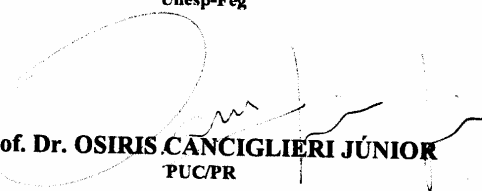
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. SAMUEL EUZEDICE DE LUCENA
Unesp-Feg


Prof. Dr. OSIRIS CÂNCIGLIERI JÚNIOR
PUC/PR

Março de 2007

DADOS CURRICULARES

MÁRIO AFONSO RIBEIRO DO CANTO

NASCIMENTO	24.09.1962 – BAGÉ / RS
FILIAÇÃO	Mario Barbosa do Canto Elvira Ribeiro do Canto
1999/2003	Curso de Graduação – Engenharia Elétrica – Eletrônica Universidade do Vale do Paraíba – UniVap
2005/2007	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado na Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá da UNESP

de modo especial, à minha esposa, Valeria, e aos meus filhos, que foram os grandes motivadores para continuidade dos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza*, que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

À minha família e amigos, apesar das dificuldades enfrentadas, pela compreensão e incentivo em todos os momentos.

Às funcionárias da Biblioteca do *Campus* de Guaratinguetá, pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

Aos professores da pós-graduação, pela qualidade e nível de conhecimento transmitido em todas as etapas do curso.

Aos funcionários da pós-graduação pela dedicação e alegria no atendimento.

CANTO, M. A. R. do. Desenvolvimento de um sistema automatizado de monitoramento de fontes alternativas de energia. 2007. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

RESUMO

A utilização de fontes alternativas e renováveis de energia apresenta-se como um recurso energético com um mínimo de impacto ambiental. Com o crescimento do uso destes recursos, torna-se importante o conhecimento dos mesmos do comportamento em relação às condições ambientais naturais. As alterações das condições climáticas, por vezes, causam incertezas quanto ao rendimento dos sistemas alternativos e renováveis de geração de energia. Este trabalho apresenta-se como uma forma de conhecimento do comportamento das fontes de energia perante diversas condições do clima. Esta dissertação tem por objetivo contribuir com o conhecimento sobre o comportamento de fontes alternativas de energia comerciais e desenvolvidas no Centro de Energias Renováveis da UNESP de Guaratinguetá. Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de aquisição e tratamento de dados para monitorar o comportamento de fontes alternativas e renováveis de energia e das condições ambientais. Nesse sistema são especificados sensores para monitoramento das condições ambientais e para monitoramento dos dispositivos componentes das fontes de energia alternativa. O desenvolvimento de um *software* para coleta de dados e controle dos dispositivos de medição é parte integrante do trabalho para viabilizar o acesso às informações de forma a facilitar a análise de resultados. O protótipo construído durante o desenvolvimento da dissertação possibilitou o monitoramento das fontes de energia do laboratório como também das condições atmosféricas locais.

PALAVRAS-CHAVE: monitoramento, energia renovável, aquisição de dados, energia solar, energia eólica.

CANTO, M. A. R. Project and development of data acquisition system for monitoring of alternative energy sources. 2007. 64f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

ABSTRACT

The renewable and alternative energy sources utilization presents-itself as an energy resource with a minimum environmental impact. With the growth of the use of these resources, becomes so important the knowledge of the performace regarding to the natural environmental conditions. The climatic conditions alterations, for times, cause users doubts of confidance of the renewable and alternative systems performance in energy generation. This work presents-itself as a form of knowledge of the performance of the energy sources to diversiity climate conditions. This dissertation has for objective contribute with the knowledge about the performance of commercial and alternative energy sources and developed in the Renewable Energies Center of the UNESP, Guaratinguetá. Was developed a system of data acquisition and analysis for monitoring renewable and alternative energy sources and environmental conditions. In this work, are determined and specified sensors for monitoring of the environmental conditions and for monitoring of the devices components of the alternative energy.sources The development of a data aquisition software and control of measurement is a part to make easy the access the information to facilitate the results analysis. The prototype built during the dissertation development enabled the energy sources monitoring of the center as also of the local atmospheric conditions.

KEYWORDS: monitoring, renewable energy, data acquisition, solar energy, wind energy.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO	17
1.2 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	19
2 OS RECURSOS ENERGÉTICOS.....	20
2.1 A RADIAÇÃO SOLAR.....	20
2.1.1 As características da radiação solar	20
2.1.2 Determinação da massa de ar.....	22
2.1.3 A constante solar	23
2.1.4 O espectro eletromagnético da radiação solar	23
2.1.5 O efeito fotoelétrico.....	25
2.2 A ENERGIA EÓLICA	26
2.2.1 A camada limite planetária	26
2.2.2 O gradiente da velocidade do vento em relação à altura	27
3 OS CONVERSORES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	32
3.1 A ENERGIA SOLAR FOTOELÉTRICA	32
3.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	33
3.2.1 Células de silício.....	34
3.2.2 Módulos fotovoltaicos	35
3.2.3 Estrutura mecânica.....	36
3.2.4 Metodologia de ensaio.....	36
3.3 ENERGIA SOLAR TÉRMICA	38
3.3.1 Metodologia de ensaio.....	39
3.3.2 Método e procedimento utilizados	40
3.3.3 Determinação da constante de tempo	40
3.3.4 Eficiência térmica.....	41
3.3.5 Medição das transferências de calor no coletor.....	41

3.3.6	Localização dos sensores de medição	42
3.3.7	Desempenho do coletor térmico	43
3.3.8	As características de medição de vento	43
3.3.9	A medição da radiação solar	45
3.3.10	Os fotoresistores	46
3.3.11	Os detectores quânticos	46
4	O SISTEMA DE MONITORAMENTO	48
4.1.1	Descrição do sistema	49
4.2	OS SENSORES	52
4.2.1	Sensores para indicação de temperatura	52
4.2.2	Sensores de condições ambientais	53
4.2.3	Os circuitos de condicionamento	55
4.2.4	Circuito de controle, conversão e transmissão de dados	56
4.3	SOFTWARE PARA CONTROLE DE ENSAIOS	58
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES	59
5.1	CONFIGURAÇÃO	59
5.2	RASTREABILIDADE	62
5.3	TRABALHOS FUTUROS	62
6	CONCLUSÕES	63

Figura 1 Matriz energética brasileira de 2005, adaptado do BEN-2006.....	14
Figura 2 Matriz elétrica brasileira em 2005, adaptado do BEN-2006	15
Figura 3 Espectro de radiação solar (adaptado de NREL e ASTM G-173)	21
Figura 4 Ângulo de inclinação do Sol (adaptado de Wieder, 2005).....	21
Figura 5 Espectro eletromagnético de frequências	25
Figura 6 Gradiente teórico da velocidade do vento.....	29
Figura 7 Gradiente da pressão atmosférica média	31
Figura 8 Junção P-N de um módulo fotovoltaico (adaptado de Wieder, 2005)	35
Figura 9 Circuito equivalente de uma célula fotoelétrica.....	36
Figura 10 Tensão, corrente e potência de uma célula fotovoltaica.....	37
Figura 11 Trocas de energias do coletor térmico. Adaptado de Guillett (1985).	39
Figura 12 Esquema de monitoramento de coletores térmicos	40
Figura 13 Espectro solar e faixas de detecção (adaptado de Rocha, 1992).....	45
Figura 15 Estrutura do sistema de monitoramento	50
Figura 14 Monitoramento de condições meteorológicas.....	52
Figura 16 Sensor de temperatura modelo LM35	53
Figura 17 Painel com fotoresistores em série	53
Figura 18 Sensor de pressão barométrica	54
Figura 19 Anemômetro de copos experimental.	54
Figura 20 Circuito de condicionamento de termopares.....	55
Figura 21 Circuitos de condicionamento com amplificador operacional	56
Figura 22 Circuito de controle, condicionamento e transmissão de dados	57
Figura 23 Escalonamento da tensão do gerador.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

α	ângulo formado entre a direção dos raios solares e o plano horizontal.
m_a	Massa de ar
ϕ	Latitude
L	Longitude
δ	Declinação dos raios solares.
w	distância angular com base no centro da Terra
Γ	Ângulo da trajetória percorrida diariamente pela terra.
β	Ângulo formado entre o plano horizontal e a superfície.
A_a	Área ativa da célula solar
C	Velocidade da luz no vácuo, $2,9979 \times 10^8$ m/s
D	Diodo do circuito equivalente da célula mono junção
E	Energia do fóton
f	Frequência do fóton
h	Constante de Planck, $6,6261 \times 10^{-34}$ J.s
I	Corrente elétrica
I_D	Corrente do diodo
I_0	Corrente de saturação da célula solar
I_{sc}	Corrente de curto-circuito da curva I-V de células solares sob iluminação
I_{max}	Corrente de máxima potência
K	Constante de Boltzmann, $8,6173 \times 10^{-5}$ eV/K
n	Número de elétrons na condução eletrônica
N	Número de átomos inicialmente separados uns dos outros
p	Número de buracos na condução eletrônica
$p-n$	Junção retificadora dopada
P_{max}	Máxima potência de conversão de energia da curva I-V de células solares
q	Carga eletrônica, $1,602 \times 10^{-19}$ C
R_c	Resistência de carga
R_p	Resistência em paralelo do circuito elétrico equivalente à célula solar
R_s	Resistência série do circuito elétrico equivalente à célula solar
T	Temperatura absoluta

V	Tensão elétrica nos terminais da célula solar
V_{oc}	Tensão elétrica de circuito aberto da curva I-V de célula solar sob iluminação
V_{max}	Tensão elétrica de máxima potência
θ_Z	Ângulo de incidência, ângulo entre a linha vertical que passa pelo observador e a linha do observador em relação ao sol
e	Campo elétrico
η	Eficiência de conversão de energia solar
λ	Comprimento de onda
S	Desvio padrão
z_1	altura da medição do vento
z_2	altura na qual é desejado estimar a velocidade do vento
u_f	velocidade de fricção
K_V	constante de Von Kármán's (definida como 0,4)
z_0	rugosidade da superfície
Le	fator de escala
P	Pressão atmosférica
R	constante do gás
p_0	pressão atmosférica média ao nível do mar
g	aceleração da gravidade
c_p	calor específico do ar à pressão constante
$Ta(z)$	temperatura à elevação z sobre nível do mar
G	irradiância solar (W/m^2)
Q_0	quantidade de calor extraída do coletor
A_a	área do coletor
n_0	rendimento em relação a diferenças reduzidas de temperatura
U	coeficientes de perda de calor no coletor
T_m	temperatura média do fluido
T_a	temperatura ambiente
T_e	temperatura de entrada do fluido
T_s	temperatura de saída do fluido

1 INTRODUÇÃO

A grande dependência de fontes não renováveis de energia tem acarretado, além da preocupação permanente com seu esgotamento, a emissão de gases causadores do efeito estufa. Este começou a fazer parte de discussões internacionais, Rio (1992), Kioto (1997 e 2005) e outras, a ponto de inúmeros países, notadamente aqueles que mais contribuem com as emissões destes gases, comprometeram-se com algum tipo de controle destas emissões, mesmo que até o momento estes compromissos não tenham provocado ações efetivas dos governos neste sentido.

A matriz energética brasileira pode ser considerada uma das mais limpas do mundo, principalmente, devido a utilização em larga escala das fontes hídricas de energia, e o aproveitamento da biomassa com o uso do álcool como combustível, conforme ilustrado na Figura 1, servindo de exemplo em relação ao uso de recursos renováveis.

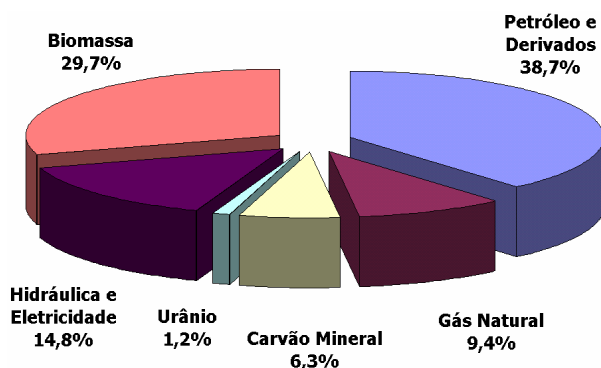


Figura 1 Matriz energética brasileira de 2005, adaptado do BEN-2006

Atualmente, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2006, BEN-2006, mais de 98% de nossa energia elétrica é originária de grandes centrais hidroelétricas e de combustíveis fósseis tais como carvão, petróleo e gás natural. Por mais importantes que sejam, as reservas de combustíveis fósseis são limitadas e, como a interrupção do consumo é praticamente impossível, o ritmo atual de exploração de tais combustíveis é considerado insustentável. Como indicado na Figura 2, o predomínio das grandes centrais hídricas na oferta de energia elétrica coloca o Brasil numa situação privilegiada em relação a utilização de recursos renováveis. Entretanto o uso de

grandes centrais hidroelétricas não é considerado como uma fonte de energia totalmente limpa, devido principalmente à grandes áreas inundadas de solo fértil.

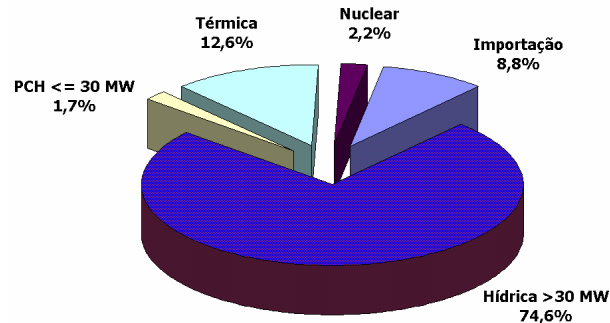


Figura 2 Matriz elétrica brasileira em 2005, adaptado do BEN-2006

Como pode ser observado na Figura 2, as fontes alternativas de energia como a energia solar direta e a energia eólica, consideradas energias renováveis limpas, ainda não são significativas na matriz das fontes de energia elétrica. De acordo com os resultados do BEN-2006, no panorama mundial, a oferta de energia originária de fontes renováveis passou de 11,2% em 1973 para 10,6% em 2004. O crescente uso de recursos renováveis não acompanham a exploração de recursos não renováveis. Estes dados mostram que, apesar dos esforços divulgados na imprensa e entidades de defesa dos recursos naturais, dos países desenvolvidos e alguns países em desenvolvimento no apoio de programas de incentivo ao desenvolvimento, produção e consumo de energia originária de fontes renováveis, ainda não se obtém resultados significativos em relação ao uso de energia originária de fontes alternativas e renováveis de energia.

O pequeno aproveitamento da energia originária de fontes renováveis, como a energia solar, eólica, e originária de pequenas centrais hidroelétricas, que podem ser consideradas como fontes inesgotáveis de energia, é decorrente do atual desenvolvimento tecnológico na capacidade de exploração, distribuição e processamento do petróleo e o alto rendimento no seu aproveitamento.

A baixa densidade da energia gerada pelas fontes alternativas de energia, principalmente ocasionado pelo baixo rendimento dos dispositivos de conversão, são um dos motivos que ainda não propiciaram o uso em alta escala destas fontes. As alterações climáticas contribuem para uma instabilidade de fornecimento fazendo com que as fontes não convencionais de energia não garantam um fornecimento contínuo

de energia, por exemplo, basta uma nuvem para que um aquecedor térmico solar perca imediatamente a potência ou épocas de densidade de vento muito baixa, insuficiente para girar as pás de um aerogerador.

A utilização da energia originária de fontes renováveis, além de suas dificuldades técnicas e econômicas para sua implantação, são necessários, entendimento do comportamento das condições atmosféricas locais, um planejamento energético organizado e estratégias de educação e disseminação para sua utilização.

Os sistemas alternativos de aproveitamento de energia, originário de fontes renováveis, têm suas características de desempenho estipuladas de acordo com o tipo de construção. Os aspectos inovadores do projeto estão na possibilidade de avaliação de novos projetos de dispositivos de geração alternativa de energia, utilizando fontes renováveis, por meio de ensaios considerando a capacidade de geração de energia em relação à diversidade das condições ambientais do micro-clima da região. Os resultados de ensaios também podem fornecer parâmetros básicos para a caracterização dos dispositivos de conversão de energia como também viabilizar pesquisas do uso de sistemas híbridos em instalações alternativas de geração de energia. A certificação de produtos decorrente de caracterizações por meio de ensaios de desempenho de projetos de dispositivos de aproveitamento de recursos naturais renováveis que são realizados em laboratórios confiáveis e seus resultados comparados a valores padronizados pode motivar a confiança de uma certa fatia de mercado consumidor para o uso de recursos renováveis alternativos em instalações residenciais, comerciais e industriais.

O desenvolvimento de técnicas e produtos para aproveitamento de fontes de energias renováveis depende de parâmetros econômicos e técnicos que resultam de análises de rendimento e desempenho para a sua implementação. Devido a grande complexidade das condições ambientais, que interferem diretamente nos resultados da avaliação de dispositivos de conversão de energia, é proposto um sistema de monitoramento e armazenamento de dados de custo reduzido e de visualização facilitada visando proporcionar o acesso as informações sobre o desempenho de produtos e técnicas de geração utilizando fontes alternativas e renováveis de energia em relação as características das condições ambientais.

O sistema desenvolvido em plataforma de *software* de instrumentação controla um sistema de aquisição, condicionamento, digitalização e armazenamento de dados em mídia eletrônica. O sistema de monitoramento consiste numa instalação de sensores, circuito de condicionamento de sinais analógicos para sinais digitais, um circuito de controle e um circuito de interface de comunicação. Esse *software* foi desenvolvido na Unesp - *Campus* de Guaratinguetá, e possibilita o fornecimento de informações para o desenvolvimento das pesquisas sobre desempenho de produtos relacionados ao aproveitamento de recursos renováveis de energia alternativa. O sistema de aquisição de dados pode ser utilizado também no desenvolvimento e análise de sistemas híbridos alternativos de aproveitamento de energia de recursos renováveis.

Atualmente o Centro de Energias Renováveis da UNESP dispõe, de um aquecedor solar popular para água e acessórios, um aquecedor convencional industrializado para água e acessórios, um painel fotovoltaico e acessórios, um carneiro hidráulico, uma micro usina hidrelétrica completa e dois cata-ventos, um com 18 pás instalado com um gerador de ímãs permanentes e outro um cata-vento de duas pás, uma roda d'água industrializada de um metro de diâmetro com um gerador acoplado, uma roda-d'água popular de baixo custo. Ainda dispõe de toda infraestrutura de instalações hidráulicas.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo contribuir com o conhecimento sobre o comportamento de sistemas de conversão de fontes renováveis de energia. Especificamente na ampliação dos recursos disponíveis no Centro de Energias Renováveis na implantação de um laboratório de ensaios multidisciplinar para avaliação de sistemas de geração de energia alternativa no Centro de Energias Renováveis da UNESP - *Campus* Guaratinguetá - SP, através do desenvolvimento de um sistema para monitoramento de fontes de energia de recursos renováveis e condições atmosféricas de baixo custo.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Monitoramento das condições ambientais: Projetar e especificar de dispositivos e sensores de medição das condições ambientais sobre os equipamentos instalados no

Centro de Energias Renováveis como desenvolvimento de um sensor anemométrico de baixo custo para detecção da velocidade do vento, um dispositivo para medição da intensidade da radiação global utilizando sensores baseados em semicondutores, dispositivo para medição da temperatura ambiente com sensores de temperatura tipo circuito integrado, medição de umidade relativa utilizando um circuito integrado com sensor capacitivo, e medição de pressão atmosférica utilizando um sensor de pressão absoluta.

- Monitoramento das fontes de energia: Desenvolver, projetar e especificar dispositivos e sensores de baixo custo para medição das fontes de energia. Os dispositivos devem converter as grandezas mecânicas em estímulos elétricos para condicionamento e coleta dos sinais, de modo que disponibilizem informações confiáveis para possibilitar avaliação de desempenho de conversores de energias renováveis.

- Monitoramento dos painéis coletores solares de aquecimento de água utilizando sensores para medição de temperatura na entrada e saída de água, temperatura do reservatório,

- Monitoramento em painéis de conversão de energia fotovoltaica utilizando sensores para medição dos níveis de corrente e tensão fornecida, e temperatura na superfície da placa coletora

- Monitoramento em turbinas conversoras de energia eólica utilizando dispositivos para medição dos níveis de corrente e tensão.

- Desenvolvimento de um sistema de uma interface de seleção, condicionamento, medição e controle constituído de um circuito de controle e conversão analógico-digital baseado em um microcontrolador com dispositivo de conversão analógico/digital.

- Desenvolvimento de um *software* de controle e aquisição de dados em linguagem de alto nível na plataforma *LabView*. Este *software* faz a comunicação com a interface de medição, controle do fluxo de dados e capacidade de configuração para o hardware instalado. Apresentar dados em valores numéricos e gráficos para facilitar a visualização e armazenar os dados de forma de modo a possibilitar a formação de um histórico para aproveitamento para aplicações futuras.

1.2 Escopo da dissertação

Esta dissertação está constituída desta introdução e mais cinco capítulos onde são descritos e discutidos às características das fontes de energia, os sistemas de conversão e os modelos, métodos e resultados relacionados com os componentes do sistema de monitoramento. São também mostrados os modelos práticos e o *software* desenvolvido durante o desenvolvimento da dissertação.

O capítulo 2 contém o levantamento bibliográfico e conceitual da forma e características das fontes alternativas e renováveis de energia. São discutidos neste capítulo, os fatores de influência do potencial energético destas fontes. São equacionados os parâmetros da capacidade energética da energia eólica e da energia solar.

No capítulo 3 são discutidas as características das fontes de energias solar e eólica. Neste capítulo são mostrados os equacionamentos da conversão fotovoltaica e da conversão mecânica da energia eólica. Ainda discute os parâmetros para medição das fontes de energia e dos dispositivos de conversão. São analisados os tipos de sensores para cada tipo de aplicação.

O capítulo 4 mostra as características das etapas do sistema experimental de monitoramento para cada segmento. São mostradas as características dos componentes do sistema sensor. São determinados os equacionamentos para condicionamento dos sinais e mostrados os diagramas elétricos do projeto. São mostrados os algoritmos do *software* de controle do sistema de medição desenvolvido em linguagem *assembly* e do *software* de controle de monitoramento desenvolvido em linguagem de instrumentação *LabView*.

No capítulo 5, são comentadas as características técnicas do sistema de monitoramento e sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo 6, são comentados e discutidos os aspectos do desenvolvimento da dissertação e conclusões.

2 OS RECURSOS ENERGÉTICOS

2.1 A radiação solar

O Sol emite radiações eletromagnéticas em todas as direções no espaço. A radiação que chega a terra é considerada uniforme e os raios aproximadamente paralelos devido à distância entre os dois.

A radiação é máxima quando o plano da superfície é perpendicular à direção dos raios solares, sendo mínima quando o plano da superfície está paralelo à direção dos raios solares. Entre estes limites observa-se uma variação de intensidade devido à variação da área exposta aos raios solares. A energia captada por uma superfície durante um certo período de tempo é a integração da irradiância recebida pelo mesmo no mesmo período de tempo. A radiação pode ser determinada por relações trigonométricas dos ângulos de incidência entre o sol e o plano da superfície.

2.1.1 As características da radiação solar

As estrelas emitem um espectro contínuo de radiação, através do qual está baseada toda a classificação das estrelas. De acordo com Dickinson;Cheremisinoff (1980), o Sol é uma estrela amarela com uma temperatura superficial em torno de 5780 K que irradia em comprimentos de onda na faixa de 10^{-13} até 10^3 metros.

O conceito de corpo negro foi criado para quantificar a radiação térmica, definindo-o como um corpo ideal que não reflete a radiação incidente, absorvendo-a totalmente em todos os comprimentos de onda e para qualquer direção de incidência. Além da de ser um absorvedor perfeito, um corpo negro tem a propriedade de ser um emissor perfeito em todas as direções e em todos os comprimentos de onda. De acordo com Wieder (2005), com as propriedades de corpo negro e das leis de Stefan-Boltzman, Wien e Planck , pode-se obter a temperatura da superfície do Sol que se situa em torno de 5800 K. Como o Sol não emite como um corpo negro perfeito, há uma inexatidão na determinação da sua temperatura. A temperatura de 5780 K é obtida para a melhor relação entre o espectro solar e a curva do corpo negro. A Figura 3 mostra o espectro de radiação solar e sua intensidade em relação aos segmentos de comprimentos de onda.

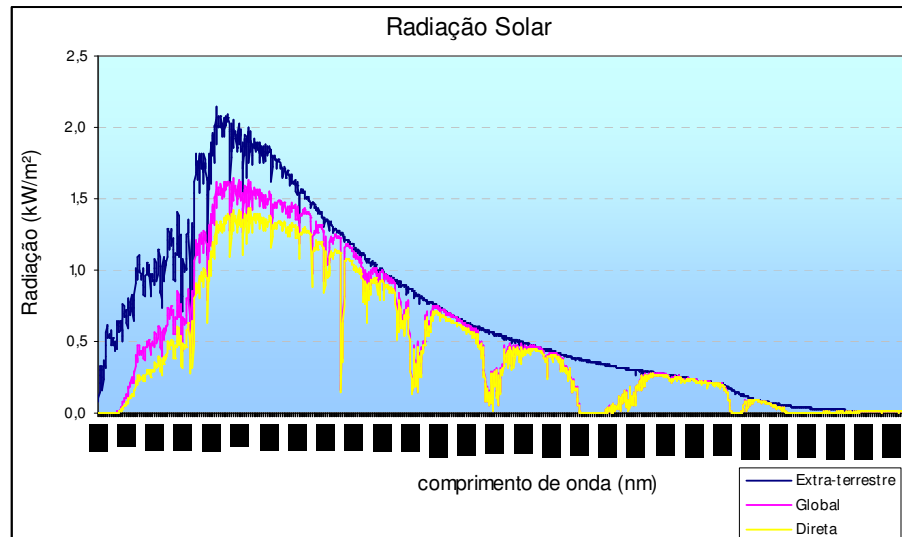


Figura 3 Espectro de radiação solar (adaptado de NREL e ASTM G-173)

A radiação solar global é a soma da radiação direta e da radiação difusa. Em todas as regiões do globo há uma diferença considerável entre a radiação solar no inverno e no verão. Ao tomar um ponto localizado na linha do trópico de capricórnio a $23,5^\circ$ sul, a radiação solar provém do zênite, ao meio-dia, no solstício de verão, a 21 de dezembro. Neste instante a superfície horizontal deste ponto recebe uma radiação direta máxima. O contrário ocorre no instante do dia 21 de junho, onde o ângulo de incidência da radiação solar passa para 47° , a radiação recebida pela superfície é proporcional ao cosseno de 47° , que é equivalente a $1/3$ da radiação máxima.

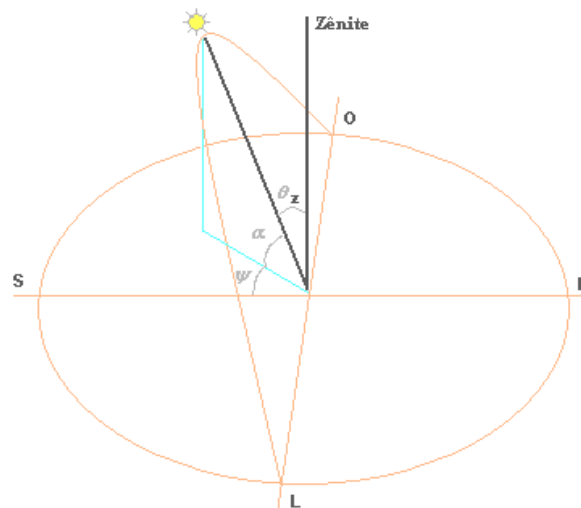


Figura 4 Ângulo de inclinação do Sol (adaptado de Wieder, 2005)

A Figura 4 indica os ângulos de posicionamento do Sol, sendo α , o ângulo entre o Sol e o plano da superfície da terra, o ângulo ψ corresponde ao ângulo do Sol em relação ao plano normal a linha do equador e θ_z , é o ângulo entre o Sol e o eixo normal a linha do equador.

2.1.2 Determinação da massa de ar

A massa de ar considera o caminho dos raios do Sol ao cruzar a atmosfera. O valor da massa de ar considerado igual a um quando o Sol encontra-se no Zênite e o ponto de referência está posicionado no nível do mar. A Tabela 1 identifica os valores padronizados para quantificação da massa de ar para ângulos de inclinação definidos. É também mostrado na tabela a diferença da radiação direta e a radiação global para um mesmo ângulo de inclinação. A massa de ar é definida na equação (1) por Wieder (2005).

$$m = \frac{\int \rho_a ds}{\int \rho_a dz} \quad (1)$$

Sendo ρ_a a densidade do ar, ds o incremento horizontal e dz o incremento vertical.

Tabela 1– Incidência de radiação com a variação da massa de ar.

Ângulo (°)	Massa de Ar	Intensidade (W/m ²)	Característica
0	0	1353	Radiação fora da atmosfera
47,5	1,5	950	Radiação global no inverno
0	1	1000	Radiação direta ao nível do mar
47,5	1,5	740	Radiação direta no inverno
60	2	727,5	Radiação direta

Para aplicações simples onde são utilizados ângulos de zênite menores que 60 °, pode-se utilizar a equação (2)

$$m = \sec \theta_z \quad (2)$$

Da equação (2), a massa de ar varia desde um, para o Sol na posição próxima do zênite, para aproximadamente dois, para um ângulo de zênite de 60° , e tende a infinito, para o sol na posição do horizonte. O valor de infinito é impossível de acontecer de horizonte a horizonte devido às refrações da superfície.

2.1.3 A constante solar

A intensidade de radiação solar além dos limites da atmosfera terrestre, de acordo com a norma ASTM E-490-00, é determinada como o valor médio de $1366,1 \text{ W/m}^2$, valor denominado de constante solar. A constante solar é a densidade de fluxo de radiação que incide numa superfície unitária, normal aos raios solares, numa região fora da atmosfera terrestre e separada do Sol por uma distância igual à distância média entre a Terra e o Sol. A distribuição espectral desta radiação é chamada de espectro solar extraterrestre, este espectro é padronizado com o objetivo de facilitar os cálculos que envolvem a previsão da radiação incidente em um determinado local, e se apresenta numa faixa de $0,199$ a $4,000 \mu\text{m}$. Do total de energia solar que encontra a atmosfera terrestre, cerca de 30% é refletido para o espaço. O restante é absorvido em forma de calor e luz.

Conforme o balanço energético, a absorção do fluxo solar é igual à energia emitida pelo sistema. Aproximadamente 48% do fluxo solar chega até o solo, o restante é absorvido ou refletido pelo ar, pelos obstáculos na superfície e nuvens.

2.1.4 O espectro eletromagnético da radiação solar

A radiação eletromagnética é composta de campos elétricos e magnéticos. As ondas são caracterizadas por comprimentos de onda e frequências baseadas na velocidade da luz no vácuo. Quanto maior a frequência menor o comprimento de onda e vice-versa. O espectro eletromagnético é detalhado na Tabela 2, e ilustrado simplificadaamente na Figura 5. As ondas ultravioletas correspondem às faixas de comprimento de onda λ , menores que 400 nm . A faixa de comprimento de onda de 400 nm a 700 nm corresponde à luz visível, que corresponde a menos de 40% do espectro de luz e a partir de 700 nm torna-se novamente invisível e é correspondente à faixa do infravermelho.

As proporções relativas de radiação direta e radiação difusa variam durante o dia, que com céu claro dependem principalmente do ângulo de incidência da radiação. As condições meteorológicas como umidade, vapor d'água, nuvens, poeira e dióxido de carbono modificam estas relações, atenuando o nível de radiação direta. Quando o sol está no zênite, em condições favoráveis, a radiação solar direta é cerca de 10 vezes a radiação difusa.

O espectro de radiação solar é alterado pelas condições do ar até a chegada no solo, a componente de luz infravermelha é atenuada principalmente devido à presença de vapor d'água e do dióxido de carbono. A intensidade de radiação solar em condições atmosféricas ótimas, no nível do mar, atinge 1 kW/m^2 , e pode chegar a $1,1 \text{ kW/m}^2$, no alto de regiões montanhosas.

Tabela 2 - Espectro da radiação solar em faixas de frequência, (adaptado de Dickinson; Cheremisinoff, 1980)

	Característica	Comprimento de onda
Infravermelho 100 GHz a 100 THz	Muito Distante (XIR)	1000 a 15 mm
	Distante (FIR)	15 a 6 mm
	Médio (MIR)	6 a 3 mm
	Próximo (NIR)	3 a 0,75 mm
	Vermelho	770 a 622 nm
Visível > 200 THz	Laranja	622 a 597 nm
	Amarelo	597 a 577 nm
	Verde	577 a 492 nm
	Azul	492 a 455 nm
	Violeta	455 a 390 nm
	Ultravioleta 10^{15} a 10^{16} Hz	UV-A – Luz Negra
UV-B		315 a 280 nm
UV-C		280 a 100 nm

Uma radiação eletromagnética incidindo numa superfície pode ser absorvida, F_a , ou refletida, F_r , dependendo da característica da superfície para os diferentes comprimentos de onda e do ângulo de incidência. Muitas superfícies podem refletir a faixa visível do espectro e absorver a faixa de infravermelho. O corpo negro é uma superfície com capacidade de absorver todas as componentes da radiação eletromagnética incidente, independentemente dos comprimentos de onda e do ângulo de incidência. O corpo branco é uma superfície com capacidade de refletir todos os componentes da radiação eletromagnética incidente, independentemente dos comprimentos de onda e o ângulo de incidência. O corpo cinza é uma superfície com capacidade de refletir e absorver radiação entre os níveis do corpo negro e do corpo branco.

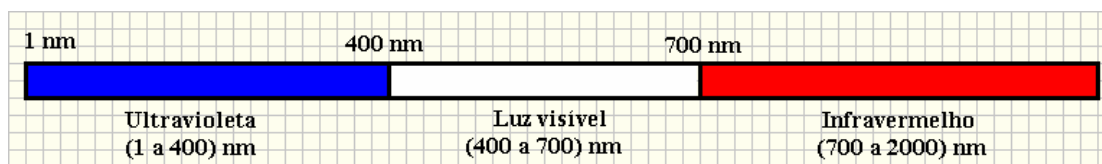


Figura 5 Espectro eletromagnético de frequências

2.1.5 O efeito fotoelétrico

Hertz observou que na presença de luz ultravioleta, ocorre uma descarga elétrica entre dois eletrodos com mais facilidade. Este efeito que facilita as descargas na presença de luz ultravioleta foi chamado de efeito fotoelétrico. Este efeito fotoelétrico foi comprovado quando Einstein explicou o efeito fotoelétrico utilizando as idéias de quantização inicialmente propostas por Planck. Uma das definições desta teoria, que uma onda eletromagnética possa ser quantizada em energia. A teoria define que se uma onda eletromagnética tem uma frequência f , esta onda pode ser gerada com valores discretos de energia n, h e f , sendo n um número inteiro e h a constante de Planck ($h = 6,6262 \times 10^{-34}$ J.s). De acordo com a teoria de Einstein, a energia da radiação eletromagnética quantizada na forma de pacotes é chamada de fótons.

A relação entre energia e frequência permite representar o espectro eletromagnético em unidades de energia, eV , Wieder (2005). A energia de um fóton é determinada pela equação (5).

$$E=hf \quad (3)$$

e

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

Então

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (5)$$

Utilizando o valor da constante de Planck (h) e o valor da velocidade luz no vácuo, c, o valor da energia em eletrovolts é determinado pela equação (6)

$$E(eV) = \frac{1,24}{\lambda(\mu m)} \quad (6)$$

2.2 A energia eólica

A energia dos ventos é uma das fontes de energias renováveis, limpas e disponíveis em todos os lugares. A utilização desta fonte energética para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e através de conhecimentos da indústria aeronáutica os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de idéias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia. No início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão.

A energia eólica depende de três fatores básicos principais: a natureza aleatória do vento, a característica do gerador utilizado para conversão de energia e as características dos coletores de vento do sistema de movimento circular. São apresentados os aspectos básicos do comportamento próximo à superfície do solo e os fatores como a natureza e característica do terreno, as variações de temperatura decorrentes da intensidade de radiação solar. Estes parâmetros são úteis para estimar as velocidades de vento em posições diferentes da que está sendo monitorada.

2.2.1 A camada limite planetária

De acordo com Gomes (2002), próximo à superfície terrestre, os cisalhamentos decorrentes do vento e a temperatura do solo, favorecem o desenvolvimento de vórtices turbulentos. Estes agentes misturadores que servem para transferir calor e

umidade na vertical, para cima da superfície da terra. Este transporte turbulento tem uma influência considerável dentro de uma camada, que é chamada de camada limite planetária, cuja profundidade pode variar entre 30 m sob condições de grande estabilidade até mais de 1000 m. A camada limite divide-se em duas camadas: a camada superficial, e a camada superior, também chamada de camada de Ekman. Devido ao fato da camada limite planetária ser uma camada de característica turbulenta, não existe ainda uma teoria matemática rigorosa para uma estrutura no campo das velocidades. Assim, algumas equações e constantes neste trabalho são originadas de estimativas e observações de resultados de ensaios por seus autores.

2.2.2 O gradiente da velocidade do vento em relação à altura

A camada superficial caracteriza-se por um escoamento logo acima da superfície terrestre. O conhecimento da velocidade do vento na camada superficial em alturas de 20 a 120 metros é desejável devido às melhores condições de escoamento. Muitas vezes não é possível obter dados nestas condições, então é possível fazer estimativas de velocidades de vento mensuradas a 10 m. Esta metodologia requer equações para avaliar a velocidade do vento em uma determinada altura em termos da velocidade do vento em mensurada em outra altura, acima ou abaixo. Algumas das equações descritas por Prandtl (1957) possibilitam uma avaliação da variação da velocidade do vento $u(z)$ com a altura z em metros:

$$u(z) = \frac{U_f}{K_v} \left[\ln \frac{z}{z_0} - \varepsilon \left(\frac{z}{Le} \right) \right] \quad (7)$$

Sendo: u_f , a velocidade de fricção, K_v , a constante de Von Kármán's, z_0 , a rugosidade da superfície e Le , o fator de escala.

A função $\varepsilon(z/Le)$ é determinada pela intensidade de radiação solar do local. Esta equação é aplicada para médias de velocidade de vento em curto espaço de tempo, aproximadamente 1 min. A rugosidade da superfície, z_0 , depende do tamanho e do espaçamento dos elementos rugosos da superfície. Os Valores típicos de z_0 são 0,01 m, para grama rasteira, 0,25 m, para grama alta ou plantações rasteiras, e de 1 a 4 m, para matas, florestas e construções. Como não é sempre praticável uma avaliação correta

destes parâmetros, foram desenvolvidas equações teóricas com base em experiências práticas para facilitar a determinação da velocidade do vento de forma generalizada. A expressão para a determinação da velocidade do vento em relação a altura de medição pode ser simplificada pela equação (8).

$$\frac{u(z_2)}{u(z_1)} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (8)$$

Sendo: z_1 , a altura da medição, aproximadamente 10 m, z_2 , a altura na qual é desejado estimar a velocidade. O parâmetro α é definido pela equação (9).

$$\alpha = a - b \times \log_{10} u(z) \quad (9)$$

Os parâmetros estimados para a e b são: $a = 0,11$ e $b = 0,061$, para o dia, e $a = 0,38$ e $b = 0,209$, para a noite. Estes parâmetros são generalizados através de um grande número de avaliações ao redor do mundo. Se houver condições que possibilitam a avaliação das variáveis do local, deve ser usada a lei das potências para determinação da velocidade do vento em diversas alturas. As equações para estimativas de velocidade para o dia e para a noite são definidas pelas equações (10) e (11):

Para o dia,

$$\frac{u(z_2)}{u(z_1)} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{0,11 - 0,061 \times \log_{10} u(z_1)} \quad (10)$$

Para a noite,

$$\frac{u(z_2)}{u(z_1)} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^{0,38 - 0,209 \times \log_{10} u(z_1)} \quad (11)$$

Conforme a Figura 6, as curvas obtidas com o uso das equações (10) e (11), mostram que o perfil da velocidade do vento durante o dia é típica de um escoamento turbulento, isto se deve à a componente da radiação solar na equação (7)

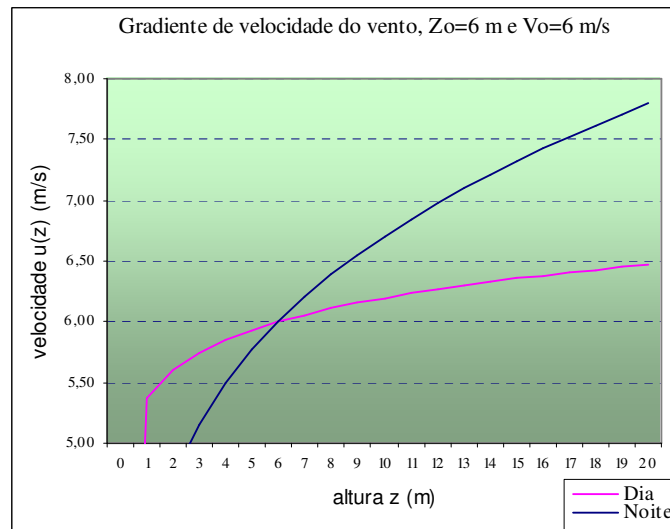


Figura 6 Gradiente teórico da velocidade do vento.

A pressão atmosférica média, como uma função da elevação sobre o nível do mar, para latitudes medianas, é mostrada na Figura 7. No nível de mar e a uma temperatura de 293 K, a pressão média situasse em 101,315 kPa. A metade do valor da pressão média é alcançada numa altitude de aproximadamente 5500 m.

A massa específica do ar, ρ , é determinada em relação à pressão média na altitude definida. A equação para o cálculo da massa específica é obtida através da equação de estado dos gases perfeitos:

$$p \times V = m \times R \times T \Rightarrow \frac{m}{V} = \frac{p}{R \times T} \Rightarrow \rho = \frac{p}{R \times T} \quad (12)$$

Sendo, p , a pressão atmosférica, R , a constante do gás, T , a temperatura em Kelvin.

A pressão média numa certa altitude é deduzida da equação fundamental da hidrostática.

$$p_o - p = -\rho \times g \times (h - 0) \quad (13)$$

Sendo, p , pressão atmosférica, p_o , a pressão atmosférica média ao nível do mar, g , a aceleração da gravidade

Considerando o ar como um fluido compressível, a massa específica varia com a altura. Então, diferenciando a equação em relação a uma altura infinitesimal:

$$dp = -\rho(p) \times g \times dh \quad (14)$$

Integrando a equação (14):

$$P = P_0 \times e^{-\frac{g \times \rho_0 \times h}{P_0}} \quad (15)$$

Esta equação pode ser utilizada para determinar a variação da pressão atmosférica com a altitude. A pressão média em um determinado local é uma função da elevação sobre o nível do mar.. É observado que, pela equação de estado dos gases ideais, a temperatura e a pressão diminuem com a altitude num volume específico constante. Como determinado pela equação (12), o comportamento do ar em altitude é de um fluido compressível, ou seja, há a variação de massa e volume específicos.

É utilizada a primeira lei da termodinâmica e elimina-se o termo de volume num processo adiabático.

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{R/c_p} \quad (16)$$

Onde: T_1 e p_1 são a temperatura e pressão no estado 1, T_0 e p_0 são a temperatura e pressão no estado 0, R é a constante universal do gás específico e c_p é o calor específico do ar a pressão constante. Considera-se o valor médio para a relação R/c_p na atmosfera mais baixa de 0,286.

A equação (16), chamada de equação de Poisson, relaciona mudanças adiabáticas de temperaturas experimentais por uma massa de ar que se desloca verticalmente ao campo de pressão. Se forem conhecidas as condições iniciais T_0 e p_0 pode-se calcular a temperatura T_1 a qualquer pressão p_1 contanto que o processo seja adiabático e envolva gases ideais.

O ar se comporta como um gás ideal enquanto o vapor d'água não está saturado. Quando a saturação acontece, a água começa a condensar, e no processo de condensação cede calor latente do vapor. Esta energia calorífica introduzida viola o conceito de processo adiabático, enquanto a presença de água líquida impede que a composição do ar possa ser considerada como um gás ideal.

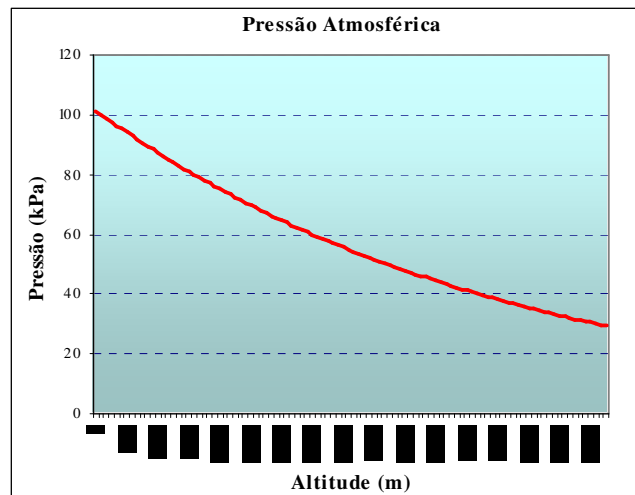


Figura 7 Gradiente da pressão atmosférica média

A relação de variação da temperatura obtida com o uso da equação (16) é chamada de gradiente de temperatura e seu valor é de aproximadamente $0,01\text{ }^{\circ}\text{C/m}$. É um valor ideal, e não varia com os parâmetros atmosféricos atuais. A diminuição de temperatura ideal é razoavelmente linear até vários quilômetros sobre a superfície da terra e pode ser aproximada por:

$$T_a(z) = T_s - R_a(z - z_g) \quad (17)$$

Na equação (17), $T_a(z)$ é a temperatura a elevação z (m) sobre nível do mar, se todos os processos são adiabáticos, T_s é a temperatura no solo no nível z_g , R_a é o gradiente de temperatura adiabático, $0,01\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ e $(z - z_g)$ é a altitude sobre o nível do solo.

3 OS CONVERSORES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

3.1 A energia solar fotoelétrica

A obtenção de energia solar fotovoltaica é realizada por meio de painéis fotoelétricos, compostos de semicondutores de silício, germânio ou selênio. Os painéis convertem diretamente a energia solar em energia elétrica, por meio da absorção de fótons, componentes da radiação luminosa do sol e conseqüente liberação de elétrons em condutores para a geração de energia. A utilização no Brasil de painéis fotoelétricos ainda não é significativa, (BEN-2006), principalmente em decorrência do alto custo para sua produção. Um sistema de geração de energia fotoelétrica depende da utilização de um banco de baterias para acumular a energia e fornecer esta energia nos períodos em que não há ocorrência de Sol.

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. As facilidades de sistemas fotovoltaicos tais como, modularidade, baixo custo de manutenção e longa vida útil, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica.

A luz, bem como as outras radiações eletromagnéticas, compreende um fluxo de fótons, cuja quantidade de energia é definida pela equação (3). Os fótons da luz amarela têm uma quantidade de energia igual a $3,4 \times 10^{-19}$ J. Uma lâmpada doméstica emite cerca de 10^{20} fótons por segundo. Os fótons não possuem massa e têm spin igual a um. Segundo a teoria quântica, os fótons transmitem força eletromagnética.

O funcionamento de um sistema de conversão fotovoltaico caracteriza-se pela absorção de fótons originários da radiação solar pela camada N de um semicondutor. O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron passe para a banda de condução. O fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n . Alguns materiais semicondutores podem ser dopados com quantidades diminutas (cerca de uma parte

por milhão) de outros elementos similares, mas com um elétron a mais ou um elétron a menos que o semicondutor. O primeiro é chamado semicondutor tipo *N* e o segundo tipo *P*.

Colocando-se em contato capas finas de ambos, formado um diodo, os elétrons cruzam a junção *P-N* quando é exposta à radiação, gerando uma corrente elétrica (ou diferença de potencial) que pode ser aproveitada. Esta é a descrição de um fotodiodo ou célula fotovoltaica. As células monocristalinas possuem boas características de rendimento.

3.2 Células fotovoltaicas

O princípio de funcionamento das células solares é o efeito fotovoltaico, o qual permite a conversão da luz em energia elétrica. Este fenômeno físico foi descoberto por Becquerel em 1839, trabalhando com células eletrolíticas. Em 1873 W. Smith descobriu a fotocondutividade do selênio. No entanto, a primeira célula solar de silício (Si) monocristalino somente foi construída em 1954 por Chapin, Fuller e Pearson.

Pela teoria atômica de Bohr, (Halliday; Resnick; Krane, 1996), sabe-se que os elétrons giram em torno do núcleo apenas em órbitas ou camadas distintas, sendo as mesmas relacionadas com níveis distintos de energia potencial negativa. Quando estes átomos isolados são reunidos para formar um cristal, as órbitas eletrônicas dos elétrons mais internos não mudam apreciavelmente, mas os níveis de energia dos elétrons mais externos ou de valência se superpõem em faixas de estados de energia muito próximos, chamadas de bandas de energia permitida. A banda de energia dos elétrons mais externos é chamada de banda de valência, enquanto que a outra é chamada de banda de condução. Entre estas bandas há uma barreira de potencial. O *Si* é tetravalente, isto é, tem quatro elétrons na sua camada de valência. Assim, ele necessita de quatro elétrons para completar seu número ideal de oito elétrons nesta camada, os quais são obtidos na união com outros átomos de *Si*, formando um cristal.

3.2.1 Células de silício

A estrutura cristalina do Silício é formada pela repetição regular tridimensional de uma célula unitária que apresenta a forma de um tetraedro, com um átomo em cada vértice, Van Vlack (1984). A força de ligação entre os átomos do cristal de *Si* é resultante do fato de que cada elétron de valência é compartilhado por um de seus quatro vizinhos mais próximos, que se denomina ligação covalente. A temperaturas muito baixas, perto de 0 K, a estrutura cristalina do *Si* é a de um isolante devido ao fato de não possuir nenhum portador livre de eletricidade na banda de condução e existir uma barreira de potencial até a banda de valência, que está completa. Já à temperatura ambiente, algumas ligações covalentes da banda de valência quebrando-se devido ao fornecimento de energia térmica suficiente para vencer a barreira de potencial, passando alguns elétrons à banda de condução possibilitando assim a condução elétrica.

A energia necessária para ionizar uma ligação covalente à temperatura ambiente é baixa, de aproximadamente $E = 1,1$ eV. Por isto o *Si* é considerado um semicondutor. Quando uma ligação covalente fica incompleta, é formada uma lacuna, a qual pode ser ocupada pelo elétron de valência vizinho. Este deixa, por sua vez, uma lacuna na sua posição original. Podem-se considerar as lacunas, como sendo cargas positivas livres, de igual valor à carga do elétron. Num semicondutor intrínseco ou puro, o número de lacunas é igual ao número de elétrons-lacuna, sendo que a agitação térmica produz continuamente novos pares de elétron-lacuna enquanto que outros pares desaparecem como resultado da recombinação.

Segundo Donati (1999), quando um semicondutor puro, tal como o *Si*, é colocado sob iluminação, os fótons de energia maior que a da barreira de potencial poderão, eventualmente, ionizar os enlaces covalentes da banda de valência, gerando deste modo pares de lacunas, além dos já existentes gerados termicamente.

Ao serem conectadas por meio de um circuito externo, circula uma corrente elétrica através do circuito, na presença de uma radiação incidente. Este fenômeno denomina-se efeito fotovoltaico.

Com a junção de duas camadas de *Si* dos tipos *P* e *N*, como mostrado na Figura 8, consegue-se um campo elétrico interno permanente. Isoladamente, ambas as

camadas são neutras, mas depois de serem unidas começa, na interface, uma difusão de elétrons da região N para a região P e uma difusão de lacunas da região P para a região N , devido ao gradiente de concentração. Em consequência desta difusão, a região N próxima à interface fica com deficiência de elétrons, isto é, fica com cargas positivas, e a região P próxima à interface fica com energias negativas. Esta polarização de cargas elétricas gera um campo elétrico interno no material, o qual origina uma força elétrica que se opõe à força de difusão original. No equilíbrio, a corrente devida ao campo compensa a corrente devida à difusão que flui em sentido contrário sendo assim nula a corrente na interface. O campo elétrico formado existe apenas na região da junção, e seu alcance define a zona de depleção, cuja largura depende das dopagens do lado N e do lado P .

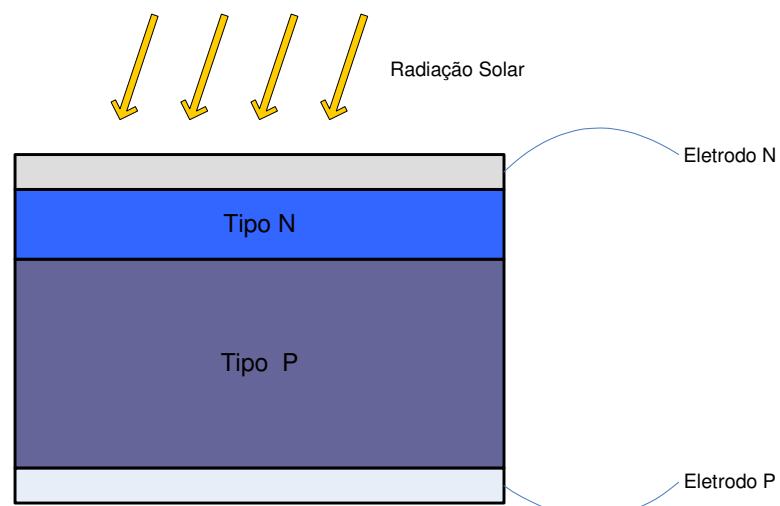


Figura 8 Junção P-N de um módulo fotovoltaico (adaptado de Wieder, 2005)

3.2.2 Módulos fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é um conjunto de células fotovoltaicas interligadas entre si em disposições série e paralelo com o objetivo de fornecer corrente elétrica. Como vimos, as células solares ou fotovoltaicas são, na verdade, diodos de grande superfície, cuja junção P-N é formada por difusão de partículas doadoras numa fina camada de Si tipo P . Para obter um bom dreno da corrente gerada os contatos metálicos ocupam toda a área da face não exposta à luz e formam uma grade na face que recebe a radiação.

3.2.3 Estrutura mecânica

Os módulos fotovoltaicos são dispositivos construídos com uma estrutura de alumínio ou outro metal resistente às alterações climáticas com uma proteção de vidro com acabamento para minimizar as perdas por reflexão na parte superior, matéria encapsulante para isolamento das superfícies internas dos efeitos da umidade e radiação solar. A parte inferior do módulo deve ser de material resistente para dar sustentação mecânica. O vidro também pode ser utilizado.

3.2.4 Metodologia de ensaio

Um modelo simplificado de uma célula fotovoltaica, consiste em uma fonte de corrente e um diodo como mostrado na Figura 9. A corrente no diodo é representada por I_D e a fonte de corrente por I_F .

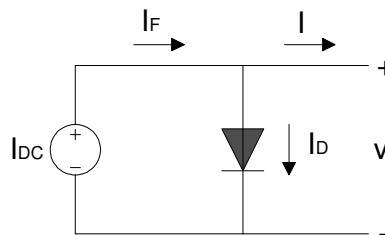


Figura 9 Circuito equivalente de uma célula fotoelétrica

Do circuito, a corrente I é definida pela equação

$$I = I_F - I_D \quad (18)$$

Utilizando uma simplificação das equações para conversão fotovoltaica de Wieder (2005), a corrente I pode ser determinada em função da energia da radiação

$$I = I_F - I_0 \times e^{\frac{e \times V}{mkT} - 1} \quad \text{solar.} \quad (19)$$

Sendo I e V a corrente e tensão da célula fotovoltaica, I_0 a corrente de saturação, e , a carga elementar do elétron, k a constante de Boltzman e T a temperatura absoluta da célula.

Para determinação da potência máxima do módulo fotovoltaico, é necessário determinar o traçado da curva corrente e tensão do módulo baseando-se na equação

(19). A corrente máxima corresponde a corrente de curto circuito, conseqüentemente a tensão e a potência neste ponto é zero. No ponto de tensão de circuito aberto, neste caso, a corrente e a potência neste ponto é zero. Com o traçado da curva $I \times V$ do módulo é possível calcular a potência em cada ponto de acordo com a equação (20).

$$P = I \times V \quad (20)$$

Observando-se o gráfico da Figura 10, de acordo com Garcia (2004), o ponto de tensão máxima e corrente máxima da célula é obtido nas referências do ponto de máxima potência, que é o ponto de máximo da curva de potência.

Para monitoramento de um módulo fotovoltaico é necessário determinar a resistência de carga de máxima potência que pode ser obtida na equação (21), Wieder (2005).

$$R_c = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \quad (21)$$

Onde R_c , é a resistência de carga, V_{\max} e I_{\max} são a tensão e corrente no ponto de máxima potência respectivamente.

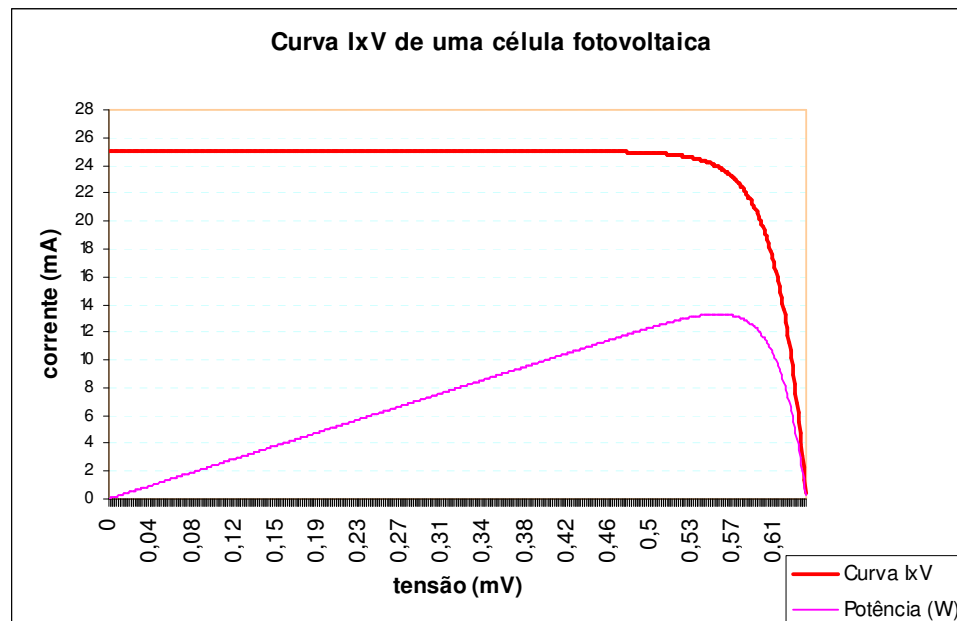


Figura 10 Tensão, corrente e potência de uma célula fotovoltaica

A curva característica de tensão *versus* corrente representa os valores da corrente de saída de com conversor fotovoltaico, em função da tensão em condições

determinadas de temperatura e radiação. A norma NBR12136 Determinação das características fotoelétricas, citada por Prieb (2004), adota os valores de 25 °C para temperatura ambiente e 1000 W/m² para a radiação solar.

O gráfico da Figura 10 mostra os valores ideais para o comportamento de uma célula fotovoltaica. O nível de corrente é aproximadamente constante com a variação de tensão até atingir o joelho da curva, após este ponto a corrente tem queda acentuada até chegar a zero no ponto de tensão em circuito aberto.

3.3 Energia solar térmica

A energia solar térmica é obtida por meio de coletores solares que absorvem o calor da radiação solar que é conduzido para dutos com água que abastecem recipientes com isolamento térmica, disponibilizando água quente para uso em residências, hotéis, pousadas, e instalações comerciais. O aproveitamento da energia solar para sistemas térmicos é um excelente redutor de consumo de energia tradicional, pois o gasto de energia para aquecimento de água é proporcionalmente elevado em relação a outros dispositivos de consumo de energia. O aquecimento por meio de energia solar é diretamente proporcional ao grau de radiação solar da região.

A conversão térmica de energia solar para a finalidade de suprimento de água quente, está na maior parte baseada em coletores solares planos. Sendo este coletor, o principal elemento de uma instalação solar, é necessária a utilização de um procedimento padrão para estabelecer suas características técnicas de desempenho. Devido à existência de um grande número de fabricantes e novas técnicas de construção destes coletores, o estabelecimento de uma padronização em procedimentos de testes é um fator importantíssimo para o aprimoramento tecnológico na fabricação de coletores com uma relação custo/rendimento de grande valia para as populações de baixa renda.

O coletor solar para aquecimento de água, é um equipamento que permite transformar energia solar sob a forma de radiação eletromagnética em energia térmica. A superfície coletora de cor preta absorve a energia solar incidente, enquanto que a cobertura de vidro transparente acima da superfície reduz as perdas por convecção e

radiação para a atmosfera fazendo com que ocorra o efeito estufa pela reflexão de alguns comprimentos de onda devido a mudança do ângulo de incidência.

A superfície coletora absorve grande parte da radiação eletromagnética solar que ultrapassa a cobertura de vidro. Geralmente é utilizado no coletor, superfícies metálicas com tratamento químico e cobertas com deposição de cromo preto que possui baixa emissividade para o espectro de infravermelho. Para uma avaliação da eficiência do coletor é necessário quantificar a energia solar direta, difusa ou refletida, que é absorvida pela superfície coletora.

Um balanço de energia em estado estacionário avalia a eficiência do coletor térmico solar no qual são indicadas as distribuições de energias. A energia total incidente distribuída em energia útil e as perdas óticas e térmicas.

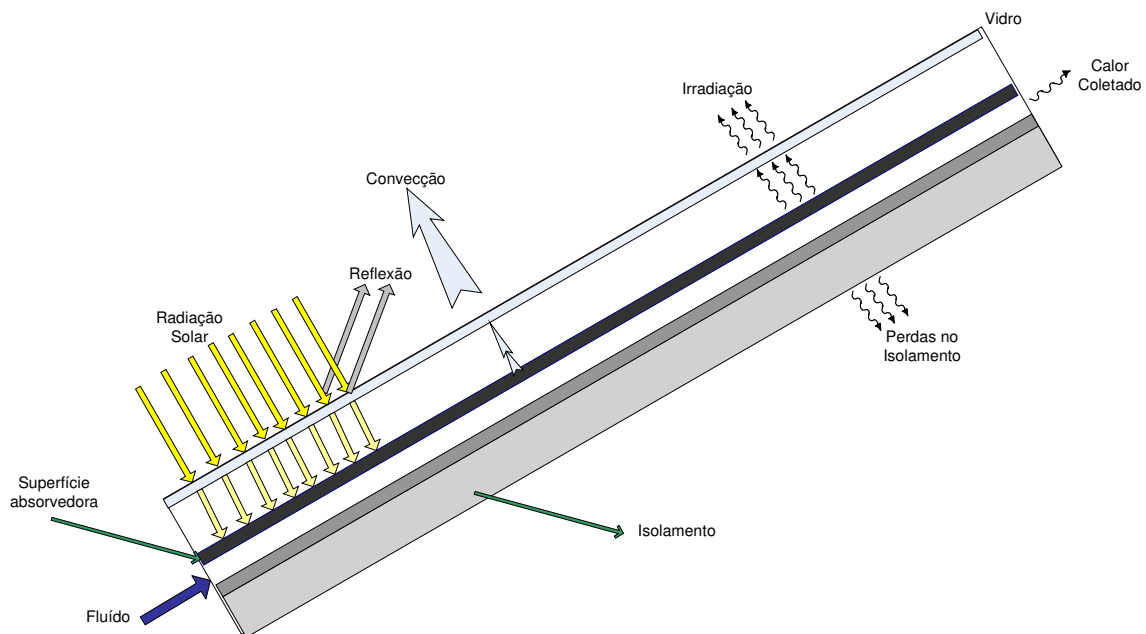


Figura 11 Trocas de energias do coletor térmico. Adaptado de Guillett (1985).

3.3.1 Metodologia de ensaio

São apresentados os métodos, procedimentos e análise dos resultados obtidos nos ensaios de desempenho de coletores de energia solar. As condições meteorológicas tais como velocidade do vento e temperatura ambiente e intensidade solar mínima devem estar de acordo com as normas vigentes para execução dos testes. Os resultados dos

ensaios experimentais devem ser úteis para avaliar a eficiência térmica e comparar com resultados teóricos do fabricante. Com o resultado de ensaios experimentais é possível calcular a constante de tempo do coletor.

3.3.2 Método e procedimento utilizados

O método indicado para realizar o ensaio de desempenho é o descrito nas normas nacionais ABNT NBR 10184 (1988). O propósito destas normas é estabelecer métodos para determinar o desempenho térmico de módulos coletores de energia solar com fluídos trocadores de calor.

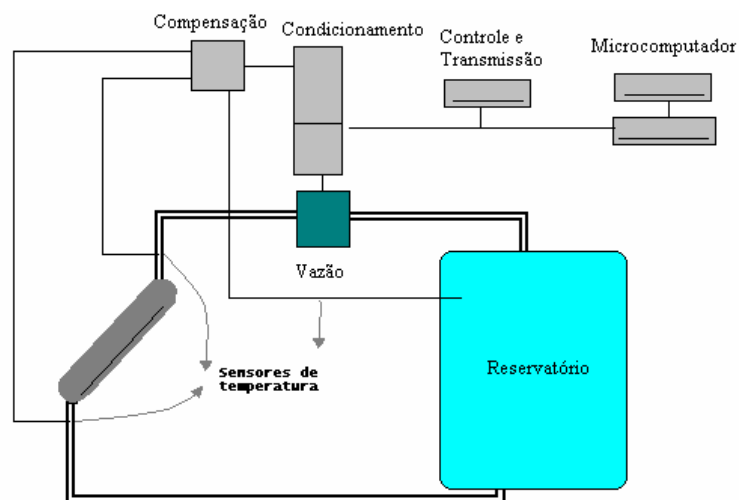


Figura 12 Esquema de monitoramento de coletores térmicos

A características de ensaio pode ser a configuração em circuito fechado, identificado na Figura 12 e tendo à água como fluído. O desempenho térmico do coletor de energia solar é determinado pela sua eficiência instantânea obtida por meio de uma combinação de valores de radiação incidente, temperatura ambiente, temperaturas de entrada e saída do fluído e pelas características de tempo de resposta térmica do coletor caracterizado pela constante de tempo do coletor. A exatidão da instrumentação utilizada deve atender os requisitos de incerteza determinados pela normalização.

3.3.3 Determinação da constante de tempo

Um das características de desempenho de coletores térmicos em que pode ser utilizado o sistema de monitoramento é a determinação da constante de tempo do coletor. As grandezas a serem determinadas são: temperatura na entrada do coletor T_e ,

temperatura na saída do coletor, vazão mássica do fluído. A seguir é descrito um dos métodos para obtenção deste parâmetro de desempenho.

O coletor térmico deve estar num local protegido da radiação solar. A temperatura de entrada do fluido, T_e , deve ser mantida em 30 °C acima da temperatura ambiente por meio de uma resistência elétrica ou outro tipo de aquecedor. A vazão mássica de fluído deve ser fixada em 0,020 kg/s. Espera-se um período de tempo suficiente para que a temperatura de saída do fluído, T_s , se estabilize em um valor constante. Quando isto acontece, desliga-se o sistema de aquecimento da entrada fazendo com que a temperatura de entrada seja reduzida drasticamente, para um valor próximo da temperatura ambiente ($\pm 1,0$ °C). Os dados de temperatura devem ser registrados e a entrada e saída de água é monitorada até que a temperatura de saída seja igual a 0,368 vezes o valor da temperatura inicial de entrada, T_e .

O tempo necessário para alcançar a diferença é denominado a constante de tempo do coletor. Por exemplo, se a temperatura de entrada for 55 °C, fazendo com que ocorra a queda brusca de temperatura na entrada, o tempo decorrido para atingir a temperatura de saída de 34,8 °C, é definido como a constante de tempo do coletor.

3.3.4 Eficiência térmica

Os ensaios de eficiência térmica são realizados no ambiente aberto. Os testes para sua determinação são realizados em condições ambientais específicas normalizadas para obtenção da curva de eficiência instantânea. São utilizadas quatro temperaturas diferentes de entrada do coletor para obter diferentes valores de $(T_e - T_a)/I$. O fluxo de fluido deve ser de aproximadamente 0,020 kg/s. O cálculo da eficiência térmica é feito através dos dados da diferença de temperatura de entrada, T_e , e saída T_s , do coletor, a vazão mássica, m , e o calor específico à pressão constante, C_p , dividido pela intensidade de radiação solar recebida, G , obtida através de um piranômetro colocado próximo ao coletor.

3.3.5 Medição das transferências de calor no coletor

De acordo com Gillett (1985) que especifica limites para ensaios de desempenho de coletores, a resolução necessária dos sistemas automatizados deve chegar a 0,02 °C, o que exige um sistema com conversor analógico digital de pelo menos 12 bits. Os

valores propostos por Gillett (1985) são incoerentes com as incertezas de sensores tipo termopares, indicados pelo autor, que de acordo com a norma ASTM E220, as incertezas características de diversos tipos de termopares de aproxima de 0,5 °C. Neste trabalho, como o objetivo principal não é caracterização para homologação de produtos, são utilizados conversores analógico-digitais de 10 bits, que proporcionam valores confiáveis dentro de parâmetros especificados a seguir. A temperatura do calor transferido do fluído na entrada do coletor deve ser mensurada numa incerteza de $\pm 0,5$ °C, porém para verificar que não há variação de temperatura em relação ao tempo, é necessária uma incerteza de aproximadamente 0,1 °C. Este nível de exatidão é adequado para as medições de temperatura utilizadas no ensaio do coletor.

3.3.6 Localização dos sensores de medição

Os sensores de temperatura devem ser montados a menos de 20 cm da entrada do coletor. Se for necessário uma distancia maior, deve-se observar que não haja variações de temperatura significativas entre a entrada do coletor e o ponto de medição. Para assegurar uma correta medição do valor médio da temperatura da mistura do fluído, devem ser colocadas curvas de 90° antes do ponto de medição para evitar medições de gradientes térmicos. Da mesma forma deve ser realizado a medição na saída do coletor. As diferenças de temperatura na entrada e saída do coletor devem ter uma incerteza próxima de 0,1 K com o objetivo de se obter uma incerteza de aproximadamente 1% para diferenças de temperatura de 10 K. Outro ponto de temperatura que deve ser mensurado é o da temperatura ambiente, o sensor deve ser colocado num ponto que não receba radiação solar direta com uma proteção de cor branca, deve estar a pelo menos um metro do solo para evitar influências da temperatura do terreno e no máximo a dez metros do coletor.

Para medição da vazão, podem ser utilizados sensores tipo turbina, que são largamente usados em ensaios de coletores, fornece resultados com incertezas na ordem de 1%. Dois pontos devem ser considerados, como os medidores tipo turbina medem volume, é necessário conhecer a massa específica do fluído para obtenção dos resultados em vazão mássica e estes sensores devem ser providos de circuitos de conversão de energia para que os resultados sejam fornecidos em grandezas elétricas

para facilitar o monitoramento. O uso de sensores de umidade relativa é útil em alguns tipos especiais de coletores.

3.3.7 Desempenho do coletor térmico

O desempenho do coletor deve ser avaliado em características lineares, resultando em velocidade de saída aquecida útil por unidade de área de abertura definidas na equação.

$$T_m = T_e + 0,5(T_s - T_e) \quad (22)$$

$$\frac{Q_0}{A_a} = n_0 G - U(T_m - T_a) \quad (23)$$

Sendo, G , a irradiância solar (W/m^2), Q_0 , a quantidade de calor extraída do coletor, A_a , a área do coletor (m^2), n_0 , o rendimento em relação a diferenças reduzidas de temperatura, U , os coeficientes de perda de calor no coletor, T_m , a temperatura média do fluido, T_a , a temperatura ambiente, T_e , a temperatura de entrada do fluido e T_s , a temperatura de saída do fluido.

As equações (22) e (23) podem ser utilizadas na comparação de desempenho de coletores térmicos. Nestas equações, apenas são utilizadas as temperaturas de entrada e saída do coletor e parâmetros ambientais como radiação solar e temperatura ambiente. Para uma avaliação de maior complexidade devem ser determinados, a velocidade do vento, a radiação solar difusa e o ângulo de incidência da radiação solar.

3.3.8 As características de medição de vento

A medição de vento é necessária em muitas áreas, como por exemplo na previsão de tempo, para instalação e avaliação de aerogeradores, para propósitos industriais ou para diferentes áreas da ciência. Basta um pequeno desvio nos resultados para levar a grandes erros de cálculos e aumentos de riscos de funcionamento antieconômico do investimento planejado.

A mais alta importância para medições exatas recai na escolha de sensores e na instalação dos sistemas de medição. Existe uma grande quantidade de anemômetros diferentes. Transmissores de vento com pequenas conchas e um corpo de perfil com

cantos vivos geralmente são muito sensíveis a ventos não horizontais e turbulências, as quais são causadas pela torre e suas travessas. Mesmo a exatidão de anemômetros altamente desenvolvidos, pode não preencher as necessidades de uma avaliação em conversão de energia. As tolerâncias estabelecidas pelo fabricante podem levar a desvios no cálculo do ganho energético. O uso de um anemômetro calibrado e o conhecimento de sua resposta em relação à variação das condições ambientais pode favorecer uma previsão energética confiável.

Nas instalações de anemômetros, junto à torre e às travessas existem turbulências que influenciam negativamente a medição. O transmissor de vento devido a isso não deve ser instalado diretamente na travessa. E a travessa propriamente deve ter, em relação ao diâmetro da torre, um comprimento mínimo. Deve ser avaliada a condição de estabilidade em relação à vibração.

O anemômetro deve ser acionado por correntes de vento em qualquer direção, sem obstáculos. O cálculo do perfil da altura não tem grande exatidão, pois a equação (10) é somente uma aproximação geral. Os dados recebidos de anemômetros posicionados muito próximos ao solo não podem ser usados devido a áreas turbulentas, como por exemplo casas, árvores ou outros obstáculos. Os anemômetros posicionados muito próximo um do outro proporcionam dados insuficientes para o cálculo do perfil da altura, uma vez que a diferença dos dois resultados é muito pequena.

Para o registro da velocidade do vento os anemômetros de copos são considerados como padrões nos sistemas de medição de energia eólica. Estes sensores possuem também pequenas desvantagens no registro das correntes de vento, que são a inércia dos copos e o efeito de sobre-velocidade, as quais são bem conhecidas e provadas. O importante é a linearidade do sinal eletrônico e a insensibilidade do anemômetro às turbulências e ventos não horizontais causados pela torre ou pelas travessas. Os transmissores de velocidade do vento com copos maiores apresentam melhores atributos do que os anemômetros cujos copos são pequenos em relação ao seu corpo.

3.3.9 A medição da radiação solar

O conhecimento da radiação solar incidente em um determinado local da superfície da Terra é um ponto básico para o melhor aproveitamento da energia solar, pois para um bom dimensionamento de um sistema conversor de energia é importantíssimo o conhecimento local da radiação solar principalmente em suas componentes global, direta e difusa

A radiação solar global é registrada por um piranômetro, que recebe energia solar de todo o hemisfério celeste, isto é, de horizonte a horizonte, em todas as direções. O instrumento repousa numa base horizontal. De acordo com a Figura 13 a faixa de comprimento de onda mensurada por um piranômetro é de $0,3 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m}$. Uma grande maioria de piranômetros é constituída por termopilhas. A constituição básica de um piranômetro consiste de dois anéis de prata concêntricos: o anel interior é enegrecido e o de fora revestido de branco. O anel externo não recebe radiação direta. As temperaturas dos anéis são medidas com termopares, termo-resistências ou termistores de forma que intensidade de radiação corresponda à diferença de temperatura entre os dois anéis.

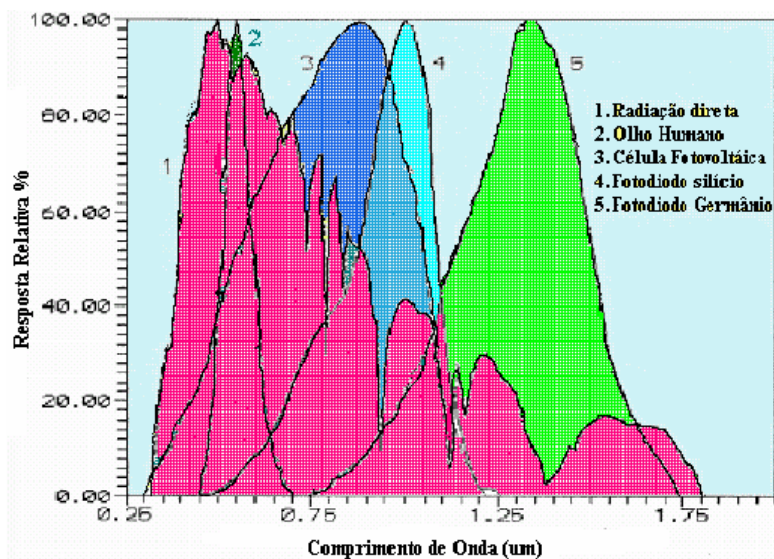


Figura 13 Espectro solar e faixas de detecção (adaptado de Rocha, 1992)

Como observado na Figura 13, as faixa de detecção da célula fotovoltaica, do fotodiodo de silício e do fotodiodo de germânio, correspondem a uma faixa larga do

espectro de radiação. Para a construção do sensor de radiação solar, foram escolhidos, com base na faixa espectral, um fotodiodo com a função de uma célula fotovoltaica, um fotoresistor e um fotodiodo de silício tipo fotocondutor.

3.3.10 Os fotoresistores

Os fotoresistores são constituídos simplesmente pelo material semicondutor, Sedra e Smith (2000), como o sulfeto de cádmio ou o sulfeto de chumbo. Também chamado de célula fotocondutiva, ou ainda de fotoresistência, o LDR (Light Dependent Resistor) é um dispositivo semicondutor de dois terminais, cuja resistência varia linearmente com a intensidade de luz incidente, de acordo com a equação (24)

$$R = C \times L \times a \quad (24)$$

Sendo: L é a luminosidade em Lux, C e a são constantes dependentes do processo de fabricação e do material utilizado.

Quando o fóton tem energia suficiente para quebrar a ligação elétron-lacuna, entre 0,2 e 3 eV, e comprimentos de onda de 400 a 600 nm, um elétron torna-se livre, podendo fluir pelo circuito. A energia luminosa desloca elétrons da camada de valência para a de condução, aumentando o número destes, o que diminui a resistência e aumenta a condutividade.

3.3.11 Os detectores quânticos

Estes detectores utilizam a conversão direta dos fótons incidentes em portadores de carga via transição eletrônica em um material semicondutor. Esses dispositivos podem ser construídos e operados sob duas formas diferentes:

Fotocondutor - Os fótons absorvidos acarretam um aumento na população de portadores de carga (*elétrons* ou *lacunas*) fazendo com que a resistência elétrica do dispositivo diminua, Sedra e Smith (2000). O circuito de operação é análogo ao empregado com um bolômetro, todavia a diferença fundamental é que para transição eletrônica, os tempos de resposta são bem menores que aqueles dependentes do acoplamento e inércia térmica do dispositivo. Uma outra diferença também fundamental é que para os detectores quânticos, principalmente aqueles fabricados com semicondutores de “gap” estreito, a taxa de portadores gerados devido à radiação

de fundo na temperatura ambiente é alta, impondo a condição de que, para operar eficientemente, o dispositivo precisa ser resfriado.

Fotodiodo - Consiste em uma junção $p-n$, onde ocorre a formação de uma zona de transição entre uma região de material semiconductor cuja condutividade elétrica é dominada por portadores de carga tipo- n (elétrons) e uma região cuja condutividade é dominada por portadores de carga tipo- p (buracos), Sedra e Smith (2000). A largura e a simetria dessa região, dependem dos processos de fabricação e dos materiais envolvidos.

4 O SISTEMA DE MONITORAMENTO

Um sistema de monitoramento é um conjunto de sistemas e componentes interligados de modo a executar uma atividade de medição completa de uma grandeza específica ou de várias grandezas dependentes ou não. Cada componente não executa apenas a sua tarefa mas também trabalha em conjunto com os outros componentes. O trabalho em conjunto salienta a importância da interligação entre todos os componentes que compõem o sistema de medição. Uma interface é definida como a junção de componentes de tal maneira que sejam capazes de funcionar de um modo compatível e coordenado. A maioria das grandezas é contínua e a maioria dos sensores produz saídas contínuas, de modo que uma interface deve compreender sistemas de condicionamento que executa diversos tipos de conversões, por exemplo uma conversão tipo analógico para analógico para possibilitar que os sinais sejam compatíveis em outras etapas.

Num sistema analógico a informação é processada e visualizada numa forma analógica, isto é, a informação apresenta uma variação contínua quer no tempo quer na sua amplitude. Num sistema digital a informação é processada numa forma digital, isto é, sob a forma de entidades discretas ou descontínuas, quer em termos de tempo quer em termos de amplitude. Num sistema digital há a necessidade de conversão do sinal condicionado na forma analógica para a forma digital para que este possa ser processado. Os elementos dos sistemas analógicos são as fontes de sinal, que pode ser um sinal elétrico de uma medição direta ou sinais de grandezas físicas convertidos para sinais na forma de grandeza elétrica, sistemas de condicionamento de sinal, que realizam a adaptação das características, sistemas de visualização e sistemas de armazenamento.

A interface entre instrumentos analógicos deve ter compatibilidade entre a fonte do sinal e o instrumento de medida. Alguns fatores devem ser observados num sistema de medição como a compatibilidade de impedâncias e de cargas e susceptibilidade a ruídos na transmissão de sinal. Os sinais não desejados como o ruídos podem ser atenuados com a utilização de filtros e aterramento adequados, a linearização é um recurso utilizado para compensar a saída de um transdutor não linear, pode ser utilizada uma tabela de correção durante a conversão analógica digital para compensar

os desvios de linearidade. Os desvios de zero também podem ser compensados após a conversão.

Atualmente os sistemas em que os dados mensurados são analógicos e convertidos para a forma digital antes da sua visualização, transmissão ou armazenamento tem tido uma aceitação generalizada. Normalmente eram utilizados apenas quando o sinal possuía variações lentas ao longo do tempo. Com a evolução dos dispositivos eletrônicos, os circuitos de conversão ganharam velocidade e exatidão com o aumento do número de bits disponíveis para representar o sinal.

A utilização de um multiplexador possibilita o uso de múltiplas entradas e uma única saída com ligação a um sistema de medição, o que possibilita o uso de um único circuito condicionador composto de um amplificador, um condicionador de sinais e um conversor A/D. Um multiplexador analógico é um conjunto de chaves ou interruptores controlados eletronicamente. Estes dispositivos, dependendo do tipo de construção, são caracterizados de acordo com o tempo de comutação dos interruptores até a estabilização do sinal. O tempo necessário para estabilização da comutação de um canal pode variar desde 1 ms para componentes baseados em relés até aproximadamente 20 ns em alguns circuitos integrados. Outras características que devem ser avaliadas no uso de um multiplexador são o tempo de estabelecimento, que é o tempo entre a aplicação em degrau e o instante que a saída atinge o valor equivalente à entrada, a resistência interna de contato e a faixa de valores de tensão admitidos.

4.1.1 Descrição do sistema

O sistema de monitoramento foi elaborado de modo a atender as necessidades de indicações citadas nos capítulos anteriores. Foi elaborado um sistema de monitoramento estruturado em três módulos:

Grupo de sensores dos equipamentos de conversão de energia;
seletor de canais, conversão e condicionamento de sinais e transmissão.

Software de controle e aquisição de dados com rotinas de configuração para fornecer indicações visuais do comportamento dos conversores de energia.

O circuito foi construído na forma de um protótipo experimental e na para utilização na interface de condicionamento e aquisição foram escolhidos componentes de custo reduzido por sua simplicidade e estarem no mercado há algum tempo. A Figura 14 mostra a estrutura do sistema de monitoramento. Inicialmente foi escolhido como linha de comunicação entre a placa de condicionamento e o microcomputador a interface paralela configurada no modo EPP, este modo permite a transmissão de dado nos dois sentidos. A outra razão para escolha desta interface é a velocidade de transmissão, pode chegar a 2 megabytes por segundo. Porém com a restrição da distância entre a interface e o microcomputador de no máximo de 3 m e muitos problemas no sincronismo na transmissão, foi escolhido como linha de comunicação a interface serial tipo RS-232 para a transferência dos dados, permanecendo o barramento em paralelo disponível para futuras aplicações, por exemplo, utilização de dispositivos para a comunicação sem fio. A possibilidade de conversão utilizando sistemas de comunicação sincronizada em série é uma das vantagens da interface RS-232, além de sua disponibilidade em qualquer computador.

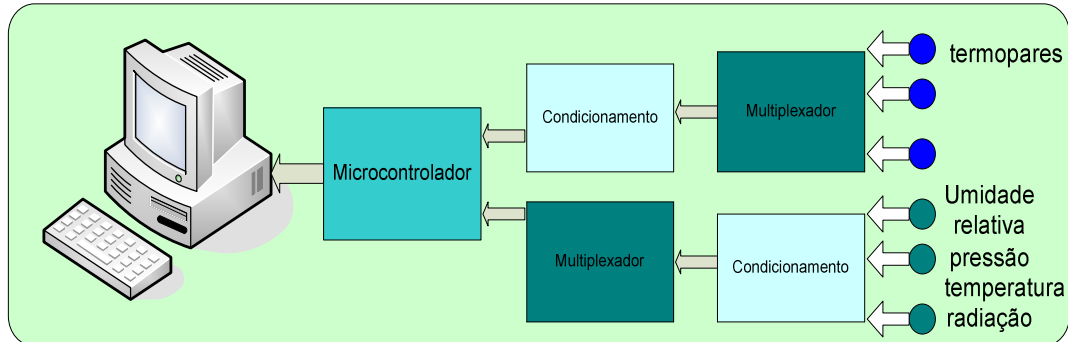


Figura 14 Estrutura do sistema de monitoramento

O *software* Labview é um ambiente de programação gráfica que permite o desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados, instrumentação e controle. A programação é desenvolvida através de diagrama de blocos, facilitando o desenvolvimento de sistemas de aquisição e controle de dados, análise e apresentação de soluções. É utilizada uma rotina disponibilizada pelo fabricante do *software* LabView, de controle da comunicação via interface RS-232, para obter os dados da placa de interface de controle e condicionamento de sinais.

O acesso aos dispositivos de medição é realizado através de uma placa de aquisição e condicionamento de sinais, onde são executadas rotinas de programação gravadas em um microcontrolador modelo PIC16F877A. O programa do microcontrolador controla as portas de conversão de sinal A/D, as portas de sinais digitais de controle e comunicação e os tempos necessários para estabilização dos sinais. O microcontrolador utiliza 5 bits digitais, para controlar os 32 canais correspondentes às entradas de dois multiplexadores, modelo CD4067. É utilizada uma porta de sinais analógicos para conversão A/D do microcontrolador para cada multiplexador de 16 canais. Os canais do multiplexador são selecionados seqüencialmente, disponibilizando um dispositivo de medição por vez para o canal de conversão analógico digital. O programa do microcontrolador, após a conversão A/D, transfere o valor para a interface serial, que por sua vez é transmitido para o microcomputador com as seguintes informações: o canal do multiplexador que realizou a medição em um *byte*, o valor do sinal convertido em 10 bits subdivididos no *nibble* inferior de três *bytes* seguintes.

O programa em LabView, que está sendo executado no microcomputador, recebe a informação pela interface serial, e seleciona o caminho da amostragem de acordo com a informação do canal do multiplexador. A monitoração é realizada com a coleta e armazenamento de dados dos seguintes sistemas: tensão, corrente e temperatura nas células fotovoltaicas, medição das temperaturas nos coletores térmicos, medição de tensão dos aerogeradores e medição das condições ambientais. Em tempo de execução, são mostrados na tela de visualização, os gráficos com os valores das grandezas físicas mensuradas sobre o comportamento dos conversores de energia e as condições climáticas do local. A Figura 15 mostra o monitoramento diário de algumas condições meteorológicas.

O sistema também armazena os dados em arquivos tipo ASCII (texto) que podem ser facilmente transportados para planilhas tipo Microsoft excel para facilitar o acesso aos dados para análises.

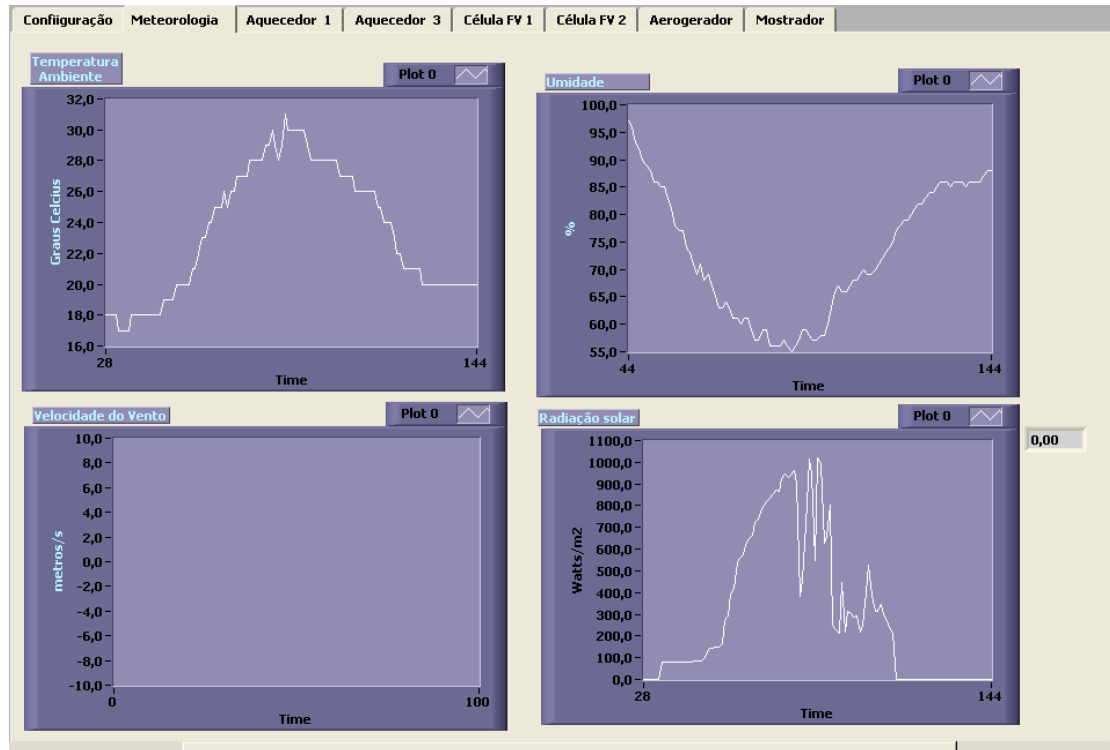


Figura 15 Monitoramento de condições meteorológicas

4.2 Os sensores

4.2.1 Sensores para indicação de temperatura

Foram utilizados termopares tipo K como sensores para indicação de temperatura. Os termopares fornecem uma tensão na faixa de zero a quatro milivolts para uma variação de temperatura zero a 100 °C. A escolha dos termopares baseou-se na sua robustez em relação a sua instalação externa sob diversas condições atmosféricas.

Para indicação da temperatura ambiente e para indicação da temperatura nos pontos de contato do termopar com a placa de condicionamento com o objetivo de informar a temperatura da junção de compensação ao *software* de controle, foi utilizado um circuito integrado modelo LM35, conforme

Figura 16 que fornece uma tensão de 10 mV/°C. Este componente foi escolhido devido a sua característica de exatidão e estabilidade de resposta.

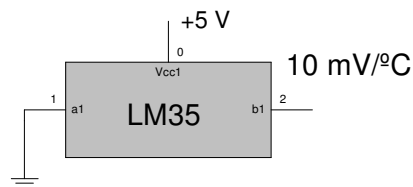


Figura 16 Sensor de temperatura modelo LM35

4.2.2 Sensores de condições ambientais

Com o alto custo dos instrumentos utilizados para a medição da radiação solar optou-se em desenvolver dispositivos para medição da radiação solar como parte dos requisitos de monitoramento das condições atmosféricas. Devido à complexidade de construção e a necessidade de valores correspondentes a radiação solar total em todo o espectro e na faixa de frequência para utilização em conversores fotovoltaicos. O modelo escolhido para o instrumento de medição foi o piranômetro, que mede a radiação solar global, ou seja, a radiação solar direta e a radiação solar difusa. O piranômetro foi construído com sensores de fotodiodos utilizados como células fotovoltaicas e fotodiodos utilizados como fotocondutores para detecção da radiação na faixa para conversão fotovoltaica e com sensores de fotoresistores, mostrados na Figura 17, para medição da faixa luminosa. Para monitoramento da radiação solar foi montado um circuito utilizando dois conjuntos de fotodiodos e um conjunto em série de fotoresistores. As equações de ajuste de curva são determinadas pela comparação dos resultados dos dois tipos de sensores e experimentais e piranômetros rastreados.



Figura 17 Painel com fotoresistores em série

Fotoreistência: Foram utilizadas fotoreistências modelo VT9000 com resistência típica para 10 lux de 24 kohms. A especificação típica para ausência de luz é de um valor de resistência de 500 kohms.

Fotodiodo: Fotodiodos são detectores de radiação nos quais o sinal elétrico é produzido pela geração de pares elétrons lacuna causada por absorção de fótons nas imediações da região de depleção de uma junção *p-n*. Foram utilizados fotodiodos de germânio com filtro infravermelho com resposta na faixa de 850 nm.

Sensor de umidade relativa: Utilizado um sensor tipo capacitivo modelo HIH-4000-003 com exatidão 3,5%, repetitividade de 0,5%. Este fornece uma tensão de saída linearizada de (0,8 a 5) V, para uma variação de umidade relativa de (0 a 95)%.

Sensor de pressão barométrica: Utilizado um sensor de pressão absoluta, conforme Figura 18, modelo MPXM2102-na faixa de (0 a 100) kPa com saída de tensão linear proporcional a pressão ambiente na faixa de (0 a 40) mV com uma tensão aplicada de 10 V.

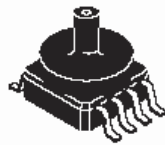


Figura 18 Sensor de pressão barométrica

Anemômetros: Os anemômetros de uso generalizado para medir velocidade de vento baseiam-se no princípio de transferência de quantidade de movimento, conhecidos como anemômetros mecânicos. Os anemômetros são usados e colocados em locais abertos, caracterizam-se pela inércia elevada, normalmente superior a $0,50 \text{ m.s}^{-1}$. O de uso generalizado é o anemômetro de copos, mostrado na Figura 19, que totaliza o vento que passa em um determinado local num intervalo de tempo considerado.



Figura 19 Anemômetro de copos experimental.

4.2.3 Os circuitos de condicionamento

Os sinais obtidos das fontes de energia, são níveis de tensão que devem ser condicionados para que possam ser inseridos no dispositivo de conversão para sinais digitais para serem processados pela interface de comunicação e enviados ao microcomputador para processamento e cálculos de conversão para que a informação possa ser inteligível pelo usuário.

Condicionamento dos sensores de temperatura: Uma parte do circuito de condicionamento, mostrado na Figura 22, é composto de amplificadores de instrumentação modelo INA2126 de dois dispositivos e um circuito integrado tipo multiplexador CMOS modelo CD4067 de 16 canais controlados por 4 bits. Neste circuito podem ser conectados até 16 termopares.

O amplificador de instrumentação modelo INA2126 é um dispositivo de alta exatidão para uso em sinais de baixo ruído. O ganho do amplificador pode ser determinado na faixa de cinco V/V até 10000 V/V através da alteração do resistor R_g . O erro de zero máximo é de 250 μV e a deriva em relação a temperatura é de 3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

O tipo de termopar utilizado é definido por *software*, o que possibilita que podem ser utilizados tipos diferentes de termopares nos canais de entrada. Conforme a Figura 20, o ganho é definido pelo resistor R_g , o multiplexador seleciona o canal do termopar antes da amplificação.

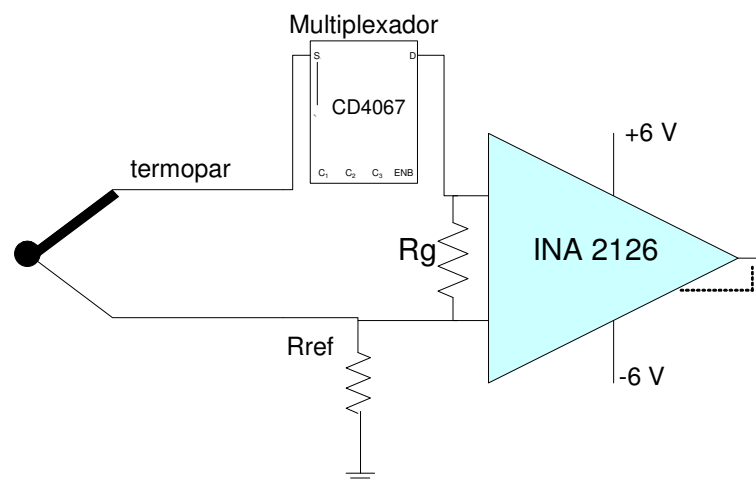


Figura 20 Circuito de condicionamento de termopares

O amplificador de instrumentação está configurado para um ganho de aproximadamente 800 vezes. Nesta configuração, a faixa de tensão na entrada do

conversor A/D fica limitada à faixa de zero a cinco volts, para uma variação de medição de temperatura de 0 a 150 °C. A tensão de alimentação do amplificador nos valores de ± 6 V possibilita um limite de tensão de ± 5 V sem ocorrer à saturação do sinal.

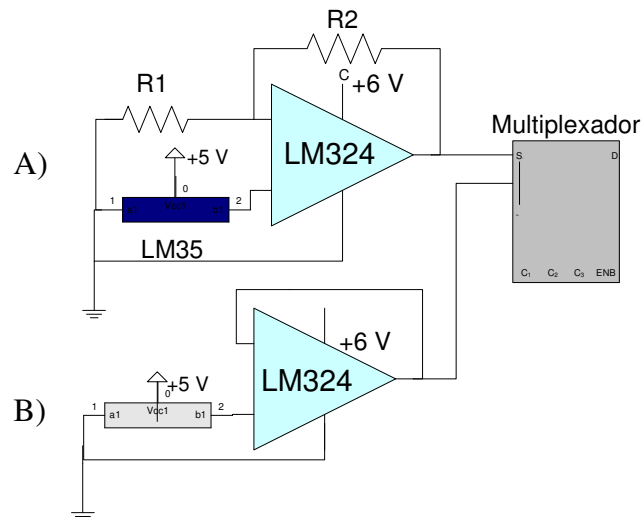


Figura 21 Circuitos de condicionamento com amplificador operacional

A Figura 21 mostra as configurações do amplificador operacional para o modo de amplificador não inversor, circuito A, que amplifica os sinais dos sensores de temperatura para a temperatura ambiente e para a compensação da junção de referência do termopar. É utilizado um circuito integrado modelo LM35, que fornece uma tensão de 10 mV/°C a partir de 0 °C. O uso do amplificador não inversor eleva o nível de tensão para a faixa de 0 a 5 V da entrada do conversor. Os amplificadores operacionais no modo seguidor de tensão estão ilustrados no circuito B da Figura 21. Estes amplificadores são utilizados para diminuir a impedância na entrada do sinal para o conversor AD.

4.2.4 Circuito de controle, conversão e transmissão de dados

O circuito experimental está ilustrado na Figura 22. Na face direita, nas indicações 1a e 1b, estão posicionados os contatos para as ligações dos sensores externos. As indicações com a letra *a* referem-se ao circuito de condicionamento de termopares e a indicação com a letra *b* referem-se ao circuito de condicionamento dos diversos sensores do sistema de aquisição. As indicações 2a e 3b correspondem aos multiplexadores de 16 canais cada. A fonte de tensão indicada por 0 alimenta o

circuito com as tensões de +8 volts para os multiplexadores, ± 6 volts para os amplificadores operacionais e +5 volts para alimentação do microcontrolador e referência de tensão para os conversores A/D e sensores. A indicação 3a corresponde aos amplificadores de instrumentação utilizados no condicionamento de sinais de termopares e sensores com baixas tensões de saída.

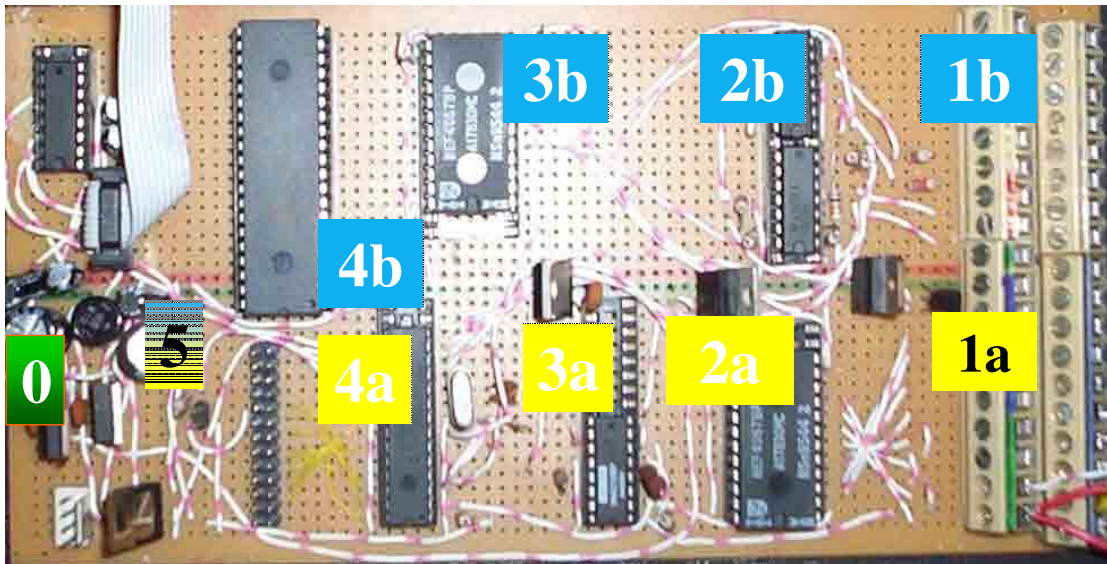


Figura 22 Circuito de controle, condicionamento e transmissão de dados

Conversores de sinais de tensão: Os valores de tensão típica nos geradores dos sistemas de cata-vento e dos painéis foto-voltaicos estão por volta de 14 V. A tensão fornecida pelos painéis foto-voltaicos não necessita de retificação, enquanto a saída de tensão do gerador deve ser retificada, para alimentação do circuito de tensão contínua e o sistema de carga para as baterias.

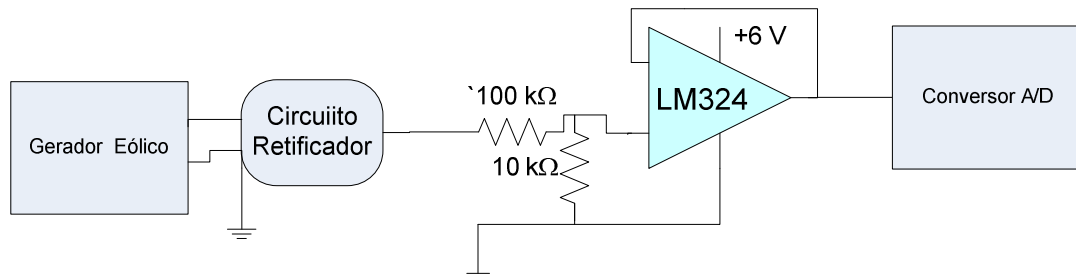


Figura 23 Escalonamento da tensão do gerador

São utilizados divisores de tensão com resistências, para dividir a saída das fontes numa proporção de 10:1 e com isso, evita-se danos à entrada do circuito de

conversão A/D. Os valores escalonados de tensão são compensados via *software* no processamento dos sinais. O circuito divisor é mostrado na Figura 23.

4.3 Software para controle de ensaios

Os requisitos básicos do programa de controle são: controlar os dispositivos de medição, coletar dados, executar rotinas de cálculo, fazer comparações em tempo real e armazenar valores em memória eletrônica.

O sistema de monitoramento foi desenvolvido em plataforma LabView e fornece um sistema visual gráfico para acompanhamento das condições das fontes de energias renováveis existentes no laboratório. O sistema verifica os níveis de temperatura da água nos sistemas de aquecimento solar, os níveis de tensão do gerador instalado no cata-vento principal, no cata-vento naval e no gerador da micro-hidroelétrica, monitora a velocidade de rotação do cata-vento. O sistema realiza medições que podem ser configuradas uma vez por segundo, dependendo da necessidade de volume de dados. Os dados são mostrados em forma de gráfico em tempo real e para facilitar a visualização no período de um dia são disponibilizados gráficos com o comportamento diário das fontes de energia.

O software utiliza um subprograma para controle da interface serial RS-232. Esta rotina monitora a porta de entrada até que sejam lidos 6 bytes em seqüência. Após o armazenamento desses seis bytes, o subprograma exclui as informações referentes aos caracteres de controle. O vetor contendo o número do canal e o valor da medição deste canal é transferido para o programa principal. Os dados são armazenados inicialmente em arquivos tipo texto. Os valores são armazenados em mídia eletrônica conforme a tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo dos resultados de medição.

	Umidade relativa	Radiação solar	Temperatura do ar	Temperatura da água	Pressão barométrica
14:21	60,638	921,712	35,032	33,057	94,796
14:21	60,679	968,761	34,672	33,045	94,761
14:22	60,681	992,334	34,728	32,941	94,753
14:22	60,686	999,984	34,666	32,959	94,753
14:22	60,728	886,621	34,998	32,964	94,781
14:22	60,769	889,285	34,615	32,857	94,761

5 Resultados experimentais e discussões

5.1 Configuração

A Configuração dos canais de entrada de sinais originados dos sensores de monitoramento está relacionada a seguir:

Canais 0 a 15: Estes canais estão destinados à entrada dos termopares. Conforme descrito no capítulo 4, é utilizado o multiplexador dos canais na entrada dos contatos dos termopares. Este dispositivo seleciona 1 canal por vez para a entrada do amplificador de instrumentação. Para condicionar o sinal que possibilite uma faixa entre 0 a 5 volts para entrada do conversor A/D do microcontrolador, o amplificador foi configurado de acordo com a equação (25) .

$$A = 5 + \frac{80k\Omega}{R_G} \quad (25)$$

O valor de R_G é de 100 ohms de forma que a amplificação estimada seja de 805 vezes o sinal de entrada. O ganho e o erro de zero do sinal de entrada são compensados em duas variáveis no *software* de controle.

Canal 16: Medição da temperatura na junção do termopar com o barramento de conectores da placa de aquisição de dados. É utilizado um circuito integrado modelo LM35 da National Components. Este circuito integrado fornece uma tensão de 10 mV/°C. O sinal é amplificado por um amplificador operacional modelo LM324 de 4 vias. A amplificação é necessária para que o conversor A/D faça a medição de tensão no centro da faixa. A amplificação é compensada no por *software* no microcomputador pela variável ganho, que também pode ser utilizada para correções na calibração do sistema. Uma função no programa em LabView no microcomputador fará a conversão para um valor de tensão correspondente a força eletromotriz da temperatura obtida na junção fria. A faixa de tensão de saída do sensor de temperatura é de 0 mV até 400 mV, considerando valores dentro da faixa de temperatura ambiente. A equação (26) determina o ganho do amplificador utilizado na configuração não inversora. Para os valores de resistências de $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, o ganho do amplificador é de aproximadamente 11 vezes.

$$A = u_e \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (26)$$

Canal 17: Medição de temperatura ambiente com circuito integrado LM35 que fornece uma tensão de 10 mV/°C. Este circuito está instalado na placa onde estão instalados os sensores de umidade relativa e pressão atmosférica. O sinal é amplificado em cerca de 10 vezes por um amplificador operacional LM324 na configuração não inversora. O amplificador é montado com duas resistências R1 e R2 de 10 kΩ e 100 kΩ respectivamente.

Canal 18: Medição da radiação solar utilizando como sensor um circuito com dois fotodiodos com a função de célula fotovoltaica. Os fotodiodos estão conectados em série e fornecem uma tensão de aproximadamente 1,2 volts para uma radiação de 1000 W/m². O circuito é amplificado em aproximadamente 3 vezes por meio de um amplificador operacional LM324 na função não inversora. É utilizada a equação 0 para a estimativa de amplificação e as resistências R1 e R2 possuem os valores de 1 kΩ e 2 kΩ respectivamente.

Canal 19: Medição da radiação solar utilizando como sensor um circuito com seis foto-resistências ligadas em série. O valor da resistência varia numa faixa de 600 a 4500 ohms entre a radiação máxima e mínima. Este componente tem a característica de diminuir a resistência com o aumento da radiação incidente. Este circuito é alimentado com uma tensão de 5 volts e está conectado em série com uma resistência de 2200 ohms. Como a medição da tensão está no meio da faixa do conversor A/D, é utilizado um amplificador operacional LM324 na função de seguidor de tensão para diminuir a impedância para a entrada do conversor A/D.

Canal 20: Medição da radiação solar utilizando como elemento sensor um circuito com 8 fotodiodos em ligações série e paralelo resultando em um valor médio de 4 fotodiodos na função de fotocondutores. Os fotocondutores caracterizam-se pela diminuição da sua resistência com o aumento da radiação solar incidente. A faixa de resistência do circuito varia de 2,7 kΩ a 16 kΩ para radiações máximas e mínimas respectivamente. É utilizado um resistor de 4,7 kΩ em série com o circuito e é mensurada a queda de tensão na resistência de referência. Como os valores resultantes

estão no centro da faixa do conversor A/D, o condicionamento é feito com um amplificador operacional LM324 no função de seguidor de tensão.

Canal 21: A medição de umidade relativa é realizada com a utilização de um sensor capacitivo modelo HIH4000. Este sensor é alimentado com uma tensão de 5 volts. A saída em tensão é proporcional à variação de umidade relativa com um erro de zero de aproximadamente 1,5 volts e um valor máximo de 4 volts para umidade de 100%. A incerteza máxima de indicação de umidade corresponde a $\pm 3,5\%$. Para o condicionamento é utilizado um amplificador no modo seguidor de tensão. O valor em umidade relativa é calculado de acordo com a equação (27):

$$umidade_relativa = \left(\frac{U_{saída}}{U_{entrada}} - 0,16 \right) \times 161,29 \quad (27)$$

Canal 22: a medição da pressão atmosférica é realizada com um sensor de pressão barométrica, modelo: MPXM2102, marca Motorola. Este dispositivo é um sensor de silício piezoresistivo de alta exatidão com uma saída linear proporcional e pressão aplicada. Este sensor possui uma saída linear proporcional de tensão de zero a 20 mV para um limite de pressão de 100 kPa com uma alimentação de 5 volts. O erro de zero corresponde a 2 mV e a incerteza de linearidade corresponde a $\pm 1\%$ do fundo de escala. O sinal é amplificado em 100 vezes com um amplificador de instrumentação modelo INA2126. Aplicando a equação (25), o valor de R_G é igual a 845 ohms.

Canal 23: Entrada de tensão proporcional a velocidade do vento mensurada com um anemômetro experimental. O anemômetro foi construído com 3 copos em formato de semi-hemisférico com um diâmetro de 0,1 metro, o raio entre os copos é de 0,11 metros. A medição de rotação é realizada através de pulsos de um LED (diodo emissor de luz) através de um disco com 50 perfurações. Os pulsos de luz alteram a resistência de um fotodiodo. O sinal é condicionado em um trem de pulsos que é convertido em uma tensão proporcional à frequência por um circuito integrado, modelo LM331. A contagem de 50 pulsos corresponde a uma distância de 0,7225 metros.

Canal 24: Utilizado para medição de tensão do módulo fotovoltaico. A saída da tensão do módulo fotovoltaico é dividida por um circuito divisor de tensão resistivo

para um valor na faixa de medição do conversor A/D. O sinal é condicionado por um amplificador operacional no modo seguidor de tensão. A tensão do módulo é mensurada nas pontas de uma resistência de carga calculada com base na curva ideal de potência do módulo.

Canal 24: Utilizado para medição de tensão de um shunt de referência em série com o resistor de carga. Com o valor do shunt e a queda de tensão obtém-se o valor da corrente elétrica fornecida pelo módulo. Com valor da tensão e corrente é calculada a potência máxima real fornecida pelo módulo.

5.2 Rastreabilidade

O valor da tensão de referência do conversor A/D do microcontrolador foi calibrada em relação a um multímetro marca Agilent, modelo 34401A. Os valores da conversão A/D também foram verificados com o mesmo instrumento. A resposta dos sensores de umidade relativa, pressão barométrica e radiação solar, foram verificadas em relação às indicações das estações meteorológicas do INPE próximas ao local de monitoramento.

O sistema de medição de termopares foi calibrado nos pontos de fusão e vaporização da água saturada na pressão local. O ponto de fusão foi obtido com uma mistura de água destilada e gelo triturado acondicionados em um recipiente com isolamento térmico de modo que o gradiente térmico provocado em relação à temperatura ambiente não interfira na estabilidade da temperatura de transição deste ponto.

5.3 Trabalhos Futuros

Este sistema estará disponível em plataforma aberta no Centro de Energias Renováveis da UNESP para desenvolvimento de trabalhos futuros que podem ser:

- Implantação de uma estação de monitoramento remoto;
- Inserir rotinas para possibilitar a execução de testes de conformidade;
- Melhorar a qualidade de medição com a utilização de conversores A/D com maior número de bits.
- Desenvolvimento de sensores de condições atmosféricas.

6 Conclusões

A presente dissertação descreveu o desenvolvimento de um sistema para monitoramento das fontes alternativas de energia do Centro de Energias Renováveis da FEG-UNESP de Guaratinguetá. Foram estudados os principais tipos de fontes alternativas, tais como energia eólica, energia solar para aproveitamento térmico e para aproveitamento elétrico. Foram estudados alguns tipos de conversores de energia, incluindo as suas características de conversão e características de desempenho.

Foi desenvolvida uma interface de medição baseada em um circuito eletrônico constituído de sensores, seletores, condicionadores de sinais e conversores analógicos digitais controlados por um microcontrolador, para realizar as medições das fontes de energia e das condições ambientais. Durante o desenvolvimento do sistema foi substituído o microcontrolador modelo PIC16F873 por um microcontrolador modelo PIC16F877A, que além das características do anterior possui 8 portas analógicas e 4 portas digitais de 8 bits e configuração maior de memória. Esta modificação possibilita um número maior de aplicações futuras para avaliação de conversores de energias alternativas e renováveis.

Foram configurados, especificados e montados sensores para medição das condições meteorológicas e verificado seu funcionamento no sistema de medição. Foram verificados em testes, os tempos de espera e velocidade de medição entre as medições dos sensores de modo a evitar interferências nos resultados.

Foram configurados e disponibilizados canais para entrada dos sinal das fontes de energia elétrica e equacionados os tipos de divisores de acordo com as características das fontes. Foram disponibilizados 15 canais para conexão de termopares e criadas rotinas no software de controle para determinação do rendimento instantâneo dos conversores térmicos

Após este trabalho, o Centro de Energias Renováveis da UNESP – Guaratinguetá conta com um recurso para análise de dispositivos desenvolvidos no laboratório para aproveitamento de fontes alternativas e renováveis de energia.

Deve-se acrescentar, que este trabalho de dissertação, pode contribuir na formação de recursos humanos na área de energia elétrica e mecânica, possibilitando uma oportunidade de trabalhos futuros utilizando este sistema.

Com a utilização das fontes dos programas que estão disponíveis para os usuários do Centro de Energias Renováveis, podem ser implementados novos recursos ao sistema, como um processo completo para avaliação de conformidade de dispositivos comerciais e desenvolvidos no laboratório.

Bibliografia

ASTM E-490-00, Standard Extraterrestrial Spectrum Reference, 2000.

ASTM G173-03e1, Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances, 2000.

ASTM Volume 14.03-05, Book of Standards Temperature Measurement, 2005.

BEN-2006, Balanço Energético Nacional 2006. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, Brasília: ano base 2005. Disponível em: <http://www.ben.epe.gov.br/ben2006/default.asp>. Acesso em: 27 dez. 2006

BENTLEY J.P., Principles of measurement systems. London, UK. Prentice Hall, 1995.

BOURGERON, R., 1300 Esquemas e circuitos eletrônicos. São Paulo, SP. Hemus, 2002.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, ELETROBRÁS. Rio de Janeiro: Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/apstenergiasolar.htm>. Acesso em 27 dez 2006.

DICKINSON, W. C.; CHEREMISINOFF, P. N., Solar energy technology handbook, part A, engineering fundamentals. New York: Marcel Dekker, Inc. ISBN 0-8247-6872-8, 1980.

DONATI S., Photodetectors: devices, circuits, and applications. Upper Saddle River, New Jersey. Prentice-Hall, Inc. 1999.

HALLIDAY D.; RESNICK R.; KRANE K.S., Física 4, Rio de Janeiro: LTC Livros técnicos e Científicos Editora S.A., 1996

GARCÍA, F. H., Análise experimental e simulação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos. 185p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LAMBERTS R., DUTRA L., PEREIRA F. O. R. Eficiência energética na arquitetura. PROCEL. PW Gráficos e Editores Associados Ltda., 1997.

HIRAHARA H., Testing basic performance of a very small wind turbine designed for multi-purposes. Renewable Energy. Elsevier Ltd. (2004).

FOX R.W., MCDONALD A.T. Introdução à mecânica dos fluídos, cap 9, LTC Livros técnicos e científicos, Rio de Janeiro, 2001.

GILLET, W.B., Solar Collectors, test methods and design guidelines, Swindon, Dordrecht, HOLLAND. D. Reidel Publishing Company, ISBN 90-277-2052-5, 1985.

GOMES F.G. Cadernos de dinâmica vol. II. Campina Grande – Paraíba. UFCG, 2002

HOLMAN J. P., Experimental Methods for Engineers. New York, NY. 2001.

JOHNSON G.L. Wind Energy Systems. Manhattan, KS: Prentice Hall, 2001.

NREL, National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy, Golden. CO. Disponível em: <<http://www.nrel.gov>>. Acesso em 30/01/2007.

PALZ, W., Energia Solar e fontes alternativas. São Paulo: Hemus, 2002.

PAULSON, C.A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. Seattle, US. Journal of applied meteorology, pg 857-861, 1970.

PRIEB, C. W. M., Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos. 54p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ROCHA F. J. M., Projeto e construção de um pireliômetro fotovoltaico para operação sistemática. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

SAYIGH, A. A. M., Solar Energy Engineering. New York: Academic Press, 1977.

SAMPAIO, C.A.P.; ULLMANN M.N.; CAMARGO M. Desenvolvimento e avaliação de anemômetro de copos de fácil construção e operação. Lages – SC. Revista de Ciências Agroveterinárias, pg 11-16, 2005.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. Microeletônica. Rio de Janeiro: Makron books, 2000.

TRIETLEY, H. L., Transducers in mechanical and electronic design. New York, NY. Marcel Dekker, 1986.

WIEDER S., An introduction to solar energy for scientists and engineers. Malabar: Krieger Publishing Company, 2005.

Bibliografia complementar

ALBADÓ, R. Energia Eólica São Paulo, SP. Artliber Editora Ltda, 2002;

AMARY H.D., Experimental and theoretical evaluation of the performance of a tar solar water heater. Renewable Energy. Elsevier Ltd., (2003).

BADESCU, V., Upper bounds for solar thermophotovoltaic efficiency. Renewable Energy. Elsevier Ltd., 2004.

DARYL R.M., Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality. Energy. Elsevier Ltd. (2005).

MITCHELL K. et al., Simulation and optimization of renewable energy systems. Energy Power & Energy Systems. Vol 27 pag 177-188, 2004.

MYERS D.R. Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality. Energy. Vol. 30, pag 1517-1531, 2005.

GTES, Grupo de trabalho de Energia Solar. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltáicos. Rio de Janeiro, RJ. CRESESB, 1999.

LANG T.T., Computerized instrumentation. Chichester, England. John Wiley & Sons Ltd. 1991.

SOUZA C. P., COSTA J. T., Controle por computador: desenvolvimento de sistema de aquisição de dados para PC. São Luís: EDUFMA, 2001.

SPIEGEL M.R. Estatística. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1977.

GLOSSÁRIO – adaptado de GILLETT, 1985)

Conversor A/D: conversão de um sinal elétrico de entrada analógico para um sinal elétrico com representação binária.

Albedo: designação aplicada à refletância total de um dado sistema, considerando o quociente entre o fluxo refletido e o fluxo incidente, integrados sobre o espectro solar

Ângulo horário: medida de posição do Sol no sistema equatorial horário de coordenadas. Consiste no ângulo contado sobre o Equador, de Leste para Oeste, a partir do meridiano local até o círculo horário do astro. Assume valores entre -180° e 180° , negativos antes e positivos após o meio-dia solar.

Atenuação: diminuição gradativa do fluxo radiante que se propaga num meio, decorrente da ação dos processos de espalhamento e de absorção de radiação.

BEN: O Balanço Energético Nacional é o documento que divulga, anualmente, a contabilidade relativa à oferta e ao consumo de energia no Brasil, contemplando as atividades de exploração e produção de recursos energéticos primários, sua conversão em formas secundárias, a importação e exportação, a distribuição e o uso final da energia.

Constante Solar: é a energia por unidade de tempo e de área recebida por uma superfície normal aos raios solares na região acima da atmosfera terrestre. O valor de 1367 W/m^2 é definido pelo Centro Mundial de Radiação Solar (WRC)

Corpo cinza: sistema físico cuja emissividade não apresenta dependência espectral.

Corpo negro: sistema físico capaz de produzir a radiação de corpo negro. Representa o sistema físico que, sob equilíbrio termodinâmico, possui a máxima capacidade de emitir e de absorver radiação.

Declinação: medida de posição do Sol no sistema equatorial horário de coordenadas. Consiste no ângulo contado a partir do Equador celeste até o paralelo celeste que contém o astro. Assume valores entre -90° (Pólo Sul) e $+90^\circ$ (Pólo Norte). O sol assume valores ao longo do ano entre $-23,5^\circ$ e $23,5^\circ$, aproximadamente.

Densidade espectral: indica a quantidade de energia por unidade de intervalo de comprimento de onda, ou equivalente, na região espectral de interesse. Radiâncias

espectrais são usualmente expressas em termos de comprimento de onda ou de frequência.

Elevação: medida de posição do Sol no sistema horizontal local de coordenadas. Consiste no ângulo contado no semiplano vertical que contém o astro, a partir do horizonte. É complementar da distância zenital, sendo igual a 0° no horizonte e a 90° no zênite.

Insolação: período de tempo durante o qual o feixe solar direto ilumina uma superfície.

Irradiação: quantidade de energia radiante que atravessa uma superfície durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área desta. É numericamente igual à integração da irradiância sobre uma superfície ao longo do intervalo de tempo em questão.

Irradiância: fluxo que atravessa uma superfície, por unidade de área desta [W.m^{-2}].

Irradiância difusa: consiste na irradiância descendente numa superfície horizontal, decorrente do espalhamento do feixe solar direto pelos constituintes atmosféricos (moléculas, material particulado, nuvens, etc). Pode ser avaliada experimentalmente empregando-se um piranômetro equipado de dispositivo de sombreamento do disco solar.

Irradiância direta: consiste no produto entre a irradiância direcional e o cosseno do ângulo zênite. Pode ser avaliada experimentalmente empregando-se dois piranômetros, um efetuando medições de irradiância global e outro de irradiância difusa.

Irradiância global: consiste na irradiância descendente numa superfície horizontal, constituída em parte por irradiância difusa e em parte por irradiância direta. Pode ser avaliada experimentalmente empregando-se um piranômetro.

Latitude: posição angular entre a referência em relação ao equador terrestre.

Longitude: arco do equador terrestre entre a referência o meridiano de Greenwich. Distância angular com base no centro da Terra entre a longitude do ponto de referência e a posição do meio dia solar correspondente. É considerado negativo no período matutino e positivo no período vespertino. Passo de 15° a cada hora

Massa de ar: comprimento relativo entre a trajetória dos raios solares e a espessura da atmosfera. É portanto igual a 1 quando o Sol está no Zênite a superfície ao nível do mar.

Meio-dia solar: instante de tempo correspondente à situação na qual o ângulo horário solar assume valor nulo.

Piranômetro: designação para instrumentos concebidos para medir irradiâncias numa superfície plana qualquer, estando o sensor em condições de receber radiação proveniente de todo um hemisfério (2π sr), considerando-se apenas o espectro solar. Uma vez instalado num plano horizontal e voltado para cima, fornece medições de irradiância global; nestas mesmas condições, pode fornecer medições de irradiância difusa caso o disco solar esteja sendo ocultado através de algum dispositivo de sombreamento (faixa, disco). Caso o plano de observação não seja horizontal, deve ser indicada sua inclinação.

Pireliômetro: designação recomendada pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia) para instrumentos concebidos para irradiâncias numa superfície plana perpendicular à incidência do feixe solar direto, estando o sensor em condições de receber radiação proveniente de um campo de visão pequeno, com ângulo sólido equivalente ou um tanto maior que aquele do disco solar, considerando-se apenas o espectro solar. Fornece medições de irradiância direcional.

Radiação: forma de transferência de energia através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons.

Radiação de corpo negro: denominação associada ao fluxo emitido por um corpo que, sob equilíbrio termodinâmico, seria capaz de absorver completamente radiação de qualquer comprimento de onda.. Constitui um campo de radiação isotrópico, não-polarizado, independente da natureza e da forma das paredes da cavidade, e dependente unicamente do comprimento de onda e da temperatura das paredes da cavidade. A lei de Planck descreve a radiância espectral emitida por um corpo negro como função de sua temperatura e do comprimento de onda. A lei de Stefan-Boltzmann descreve a irradiância emitida por um corpo negro, já integrada sobre todo o espectro eletromagnético, como função de sua temperatura. As duas leis

de Wien relacionam a temperatura do corpo negro à máxima radiância espectral por ele emitida.

Radiância: quociente entre a intensidade observada num certo elemento de superfície, numa dada direção, e a área da projeção ortogonal deste elemento de superfície num plano perpendicular àquela direção [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$].

Radiômetro: designação genérica freqüentemente aplicada aos mais diversos tipos de instrumento concebidos para medir quantidades de energia radiante, sem qualquer especificação no que diz respeito à grandeza radiométrica.

Transmitância: fração do fluxo incidente sobre um sistema que consegue atravessá-lo.

Zênite: interseção da linha vertical, perpendicular ao plano horizontal local, com a esfera celeste, no próprio hemisfério em que se encontra o observador.