

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA
ALIMENTADO POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

**CASCABEL – PARANÁ – BRASIL
JUNHO – 2007**

ROGER NABEYAMA MICHELS

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA
ALIMENTADO POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais.

Orientador: Profº. Dr. Reinaldo Prandini Ricieri.

**CASCABEL – PARANÁ – BRASIL
JUNHO – 2007**

ROGER NABEYAMA MICHELS

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA
ALIMENTADO POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Profº. Dr. Reinaldo Prandini Ricieri

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE.

Profº. Dr. Marcos Fischborn

Dept. de Tecnologia em Manutenção Eletromecânica,
UTFPR.

Profº. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE.

Profº. Dr. Suedêmio de Lima Silva

Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE.

Cascavel, 06 de junho de 2007.

Aos meus pais:
José Beno Michels e Rosalina Kazuko Nabeyama
por serem exemplos de generosidade e honestidade,
por minha educação e pelo incentivo à minha formação;

À minha namorada Tatiane,
pelo apoio, amor, compreensão e incentivo
em mais uma importante jornada.

Dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela força espiritual;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, por oportunizar a realização de um mestrado depositando investimentos em pesquisa;

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, por disponibilizar o espaço físico e os equipamentos para a realização do experimento;

Ao professor Dr. Reinaldo Prandini Ricieri, pela orientação, aprendizagem e convivência em todo este período;

Ao professor Ms^c. Estor Gnoatto, por sempre estar pronto a auxiliar e solucionar problemas, sendo indispensável para conclusão desta pesquisa;

Aos professores Dr. Suedêmio de Lima Silva e Samuel Nelson Melegari de Sousa, pelo auxílio na montagem do experimento;

Aos professores Ms^c. Edward Kavanagh, Jorge Kawahara e Dr. José Airton de Azevedo, por todo o apoio, mas principalmente pela amizade;

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UNIOESTE, pelo conhecimento transmitido e à Vera Celita Schmidt, por sempre estar pronta a esclarecer minhas dúvidas;

Às amizades formadas e às amizades mantidas, durante este período de grande importância para a minha vida profissional.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 ENERGIA.....	4
2.2 ENERGIA NA AGRICULTURA	6
2.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS	8
2.4 ENERGIA SOLAR.....	9
2.4.1 O Sol como Fonte de Energia.....	11
2.4.2 Histórico	12
2.4.3 Energia Solar Fotovoltaica	13
2.4.4 A Eficiência dos Sistemas Fotovoltaicos.....	18
2.4.5 Fatores que Afetam o Desempenho das Células Fotovoltaicas...19	19
2.4.6 Curva do Painel Fotovoltaico e Reta de Operação da Bomba.....21	21
2.5 BOMBEAMENTO DE ÁGUA POR MEIO DA ENERGIA SOLAR.22	22
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 LOCALIZAÇÃO	26
3.2 MATERIAIS.....	26
3.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO	27
3.3.1 Conjunto Fotovoltaico	28
3.3.2 Sistema de controle	30
3.3.3 Aplicativos.....	37
3.4 METODOLOGIA UTILIZADA NA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA E EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS ...37	37
3.5 METODOLOGIA UTILIZADA NA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA HIDRÁULICA.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39

4.1	IRRADIÂNCIA SOLAR.....	39
4.2	CORRENTE E TENSÃO.....	41
4.3	POTÊNCIA.....	42
4.4	VAZÃO.....	43
4.5	POTÊNCIA HIDRÁULICA.....	46
4.6	TEMPERATURA DO PAINEL FOTOVOLTAICO	47
4.7	EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	48
4.8	RETA DE OPERAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO, TRABALHANDO EM SITUAÇÃO REAL DE FUNCIONAMENTO.	49
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comportamento energético no setor agropecuário brasileiro (tep)	6
Tabela 2 -	Evolução do consumo de energia no setor agropecuário no Brasil (%)	7
Tabela 3 -	Comportamento da eficiência do sistema em diferentes períodos.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Distribuição regional do potencial hidrelétrico.....	5
Figura 2 -	Evolução do consumo de energia no setor agropecuário no Brasil (%)	7
Figura 3 -	Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	14
Figura 4 -	Configuração simples de um sistema fotovoltaico.....	16
Figura 5 -	Configuração híbrida de um sistema fotovoltaico.	17
Figura 6 -	Tensão dependendo da temperatura nos painéis fotovoltaicos utilizado no estudo.....	20
Figura 7 -	Potência máxima dependendo da temperatura nos painéis fotovoltaicos utilizado no estudo.....	20
Figura 8 -	Curvas características I x V dos módulos fotovoltaicos interceptadas pelas retas de operação da bomba.....	22
Figura 9 -	Regiões áridas e semi-áridas nos continentes.	23
Figura 10 -	Montagem do sistema de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos.....	28
Figura 11 -	Conjunto fotovoltaico.	29
Figura 12 -	Piranômetro.	31
Figura 13 -	Piranômetro no plano dos painéis.	31
Figura 14 -	Irradiação global, difusa e inclinada a 30 graus.....	32
Figura 15 -	Medidor de vazão e hidrômetro.	33
Figura 16 -	Hidrômetro.....	33
Figura 17 -	Transdutor de pressão.....	34
Figura 18 -	Divisor de tensão.	35
Figura 19 -	Localização de instalação do termopar.....	35
Figura 20 -	<i>Datalogger CR 23X da Campbell Scientific – INT.</i>	36
Figura 21 -	Microcomputador para as análises dos dados.....	36
Figura 22 -	Irradiância solar no plano do painel fotovoltaico.....	40
Figura 23 -	Irradiância solar em um dia nublado.	40

Figura 24 -	Corrente do sistema para dois dias de céu limpo no solstício de inverno e de verão.....	41
Figura 25 -	Tensão do sistema para dois dias de céu limpo nos solstícios de inverno e verão.....	42
Figura 26 -	Potência do sistema para dois dias limpos no solstício de inverno e de verão.....	43
Figura 27 -	Vazão do sistema para dois dias de céu limpo no solstício de inverno e de verão.....	44
Figura 28 -	Vazão total de água bombeada por mês pelo sistema.....	45
Figura 29 -	Vazão média de água bombeada por mês pelo sistema.....	45
Figura 30 -	Potência hidráulica para dois dias de céu limpo no solstício de inverno e de verão.....	46
Figura 31 -	Temperatura no painel fotovoltaico.....	47
Figura 32 -	Eficiência do sistema de bombeamento de água.	49
Figura 33 -	Curva do painel com a reta de operação da bomba.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

μm	- Micrômetros;
A	- Amperes;
CA	- Corrente alternada;
CC	- Corrente contínua;
Cd	- Cádmio;
CO	- Monóxido de carbono;
CO_2	- Dióxido de carbônico;
Cr	- Cromo;
Fe	- Ferro;
GLP	- Gás Liquefeito de Petróleo;
kg	- Quilograma;
$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	- Quilograma por metro cúbico;
km	- Quilômetro;
km^2	- Quilômetro quadrado;
kWh	- Quilowatts hora;
$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$	- Litro por minuto;
m^2	- Metro quadrado;
m^3	- Metro cúbico;
Mn	- Manganês;
mV	- Milivolts;
MW	- Mega watts;
Ni	- Níquel;
$^{\circ}\text{C}$	- Graus Celsius;
K	- Graus Kelvin;
ONG's	- Organizações Não Governamentais;
Pb	- Chumbo;
PSI	- Pé por polegada quadrada;
STC	- Condições padrão de teste;
tep	- Tonelada Equivalente em Petróleo;

V	- Volts;
VDC	- Tensão contínua;
W	- Watts;
W.m ⁻²	- Watts por metro quadrado;
Wp	- Watts pico.

RESUMO

A presente dissertação descreve o experimento desenvolvido com a finalidade de avaliar um sistema de bombeamento de água acionado por dois painéis fotovoltaicos instalado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, *Campus Medianeira*, estado do Paraná, Brasil. O município está localizado no oeste paranaense com 25°17'43" Latitude sul, 54°03'38" Longitude oeste e com altitude de 500,7 metros. O sistema trabalhou em situação real de funcionamento, bombeando água a uma altura de 20 metros. Foram coletados dados de fevereiro de 2005 a novembro de 2005; utilizou-se um coletor de dados computadorizado da marca *Campbell Scientific INC.*, o que possibilitou adquirir e armazenar os valores de irradiação no plano do painel, tensão e corrente gerada, temperatura no painel, pressão e vazão. A leitura dos dados foi realizada com freqüência de 1 hertz e armazenada a cada 1 minuto. Através de cálculos obtiveram-se os valores de potência e eficiência do sistema e a potência hidráulica. O solstício de inverno apresentou eficiência de 9,58% com bombeamento diário de 2.056,44 litros, enquanto que o solstício de verão apresentou eficiência de 9,07% com bombeamento diário de 2.377,21 litros. A maior eficiência nos dias de inverno está atrelada às menores temperaturas nestes dias se comparado aos dias de verão e o fator que provocou uma maior vazão de água bombeada nos dias de verão está ligado ao tempo de insolação solar que é maior se comparado aos dias de inverno. O total de água bombeada durante o período do experimento foi de 435.042,20 litros.

Palavras-chave: sistema fotovoltaico, sistema de bombeamento de água, energia solar

ABSTRACT

EVALUATION OF A WATER PUMPING SYSTEM FED BY PHOTOVOLTAIC PANELS

The current dissertation describes an experiment to evaluate a water pumping system activated by two photovoltaic panels installed at The Federal Technological University of Paraná – FTUPR, Medianeira *Campus*, in the State of Paraná, Brazil. The city of Medianeira's latitude and longitude are 25°17'43" south and 54°03'38" west respectively, with an altitude of 500.7 meters (1,642.72 feet). The system operated in a real working situation, pumping water to a 20 meters (65.62 feet) elevation. Data were collected, from February 2005 to November 2005, by means of a computerized data collector made by Campbell Scientific Inc that made possible collecting and applying irradiance values in the panel plane, generated current and tension, panel temperature, pressure and consume. Data readings were made at a 1-hertz frequency and stored every minute. Through calculi, the system efficiency and energy values and hydraulic strength were obtained. Winter solstice showed 9.58% efficiency with daily pumping of 2,056.44 liters (543.14 gallons) whereas summer solstice confirmed 9.07% efficiency with daily pumping of 2,377.21 liters (627.86 gallons). Winter day's highest efficiency is associated to the lowest temperature in those days compared to summer days, and the factor that prompted larger pumped water consume, during summer days, was related to solar insulation time that is longer if compared to winter days. Total water pumped during the experiment period was 435,042.20 liters (114,900.99 Gallons).

Key words: photovoltaic system, water pumping system, solar energy

1 INTRODUÇÃO

O setor agrícola vem se desenvolvendo devido à pesquisa e implementação de novas tecnologias que geram um maior consumo de energia. Atualmente a geração de energia no Brasil é, em sua maioria, sinônimo de impacto ambiental, por serem utilizadas fontes convencionais como o petróleo, usinas termoelétricas e hidroelétricas.

A forma de geração de energia mais utilizada no Brasil é a hidroelétrica, considerada uma fonte limpa, mas que também provoca danos. KAWAHARA (2003, p. 19) afirma que:

[...] o Brasil é um dos países que detém as maiores bacias hidrográficas, cuja energia elétrica proveniente de energia hidráulica também é limitada e ainda causa grandes inundações, para a formação dos reservatórios, em áreas que poderiam produzir mais alimentos, pois nesses locais os solos são mais ricos para a agricultura.

A Resolução n. 1, de 23 de janeiro de 1986, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA (2007, p. 01) considera impacto ambiental como:

[...] qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais.

Esses problemas ambientais vêm tomando espaço cada vez maior no cotidiano da população. Pesquisadores, ONG's e até mesmo empresas estão depositando maior atenção para a este assunto que diz respeito a todos.

Uma solução para esses problemas seria a utilização de fontes alternativas de energia, como a energia solar, que pode ser de grande ajuda para a diminuição do impacto ambiental que as fontes convencionais provocam. Segundo COMETTA (1978, p. 20):

Se o consumo de energia de origem térmica (de combustíveis fosseis ou nucleares) continuar a aumentar, prevê-se que numa centena de anos atingir-se-á uma situação em que a quantidade de calor dissipada não mais será desprezível em relação aquela de origem

solar e poderá, assim, causar uma elevação da temperatura média do globo, com consequências incalculáveis, pelo derretimento dos gelos polares e imediata elevação do nível dos mares.

SPENSE (2002, p. 05) afirma que “A energia do sol que alcança a terra em apenas duas semanas equivale à quantidade de energia contida em todas as reservas mundiais de carvão, gás e petróleo”.

Por esses e outros motivos a energia solar como fonte de energia alternativa, poderia ser utilizada para ajudar a solucionar problemas, como o aquecimento global, a poluição atmosférica,.. Atualmente essa fonte de energia é utilizada para o aquecimento d’água em residências por meio de placas solares, desidratação de frutas, legumes e ervas. A tecnologia dos painéis fotovoltaicos pode ser utilizada em estações espaciais, satélites de telecomunicação, estações meteorológicas, faróis de sinalização, eletrificação rural, entre outros. Porém, o rendimento de um painel fotovoltaico é baixo, por isso é necessário um estudo dirigido para a avaliação de qualquer sistema que utilize painéis fotovoltaicos.

A energia solar fotovoltaica está difundida em várias localidades do Brasil, aplicada a diversas finalidades. Por se tratar de uma fonte versátil, pode ser utilizada em locais remotos, onde a rede elétrica não é compensatória, sendo uma opção para pequenos agricultores. Para a sua utilização é necessário um dimensionamento correto dos painéis fotovoltaicos, conhecer os equipamentos que serão alimentados e o potencial solarimétrico da região. No caso do Brasil, essa preocupação só deve ser considerada na região sul, pois o restante do território, estando mais próximo da linha do Equador, possui a incidência solar em abundância.

Uma aplicação dessa forma de energia é o bombeamento de água, representando uma solução às famílias residentes em pequenas propriedades localizadas em regiões áridas e semi-áridas. Para essa aplicação é imprescindível conhecer a tensão, a corrente e, consequentemente, a potência gerada pelos painéis; tensão e potência necessárias para o acionamento da motobomba; a irradiação média da região em todas as estações do ano, principalmente no solstício de inverno, quando seu valor é reduzido; a vazão e a pressão da água fornecida pela motobomba.

Considerando as questões pontuadas acima, foi estabelecido como objetivo geral deste experimento: analisar um sistema de bombeamento de água alimentado por dois painéis fotovoltaicos instalados em Medianeira, região oeste do Paraná.

Os objetivos específicos para a realização deste trabalho são:

- Determinar o rendimento do painel fotovoltaico;
- Determinar a potência do painel fotovoltaico;
- Determinar a potência hidráulica da motobomba;
- Definir o ponto de estabilização do sistema;
- Verificar o comportamento do sistema nos períodos de solstício;
- Verificar a vazão mensal de água bombeada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA

A energia elétrica é a forma de energia mais utilizada e a que melhor se adapta às necessidades atuais, devido à sua versatilidade. Sua utilização ocorre em todo o mundo, mas principalmente, naquelas regiões tecnologicamente mais avançadas em que o seu uso é realizado em larga escala.

Mundialmente, a geração da eletricidade ocorre por meio de fontes fósseis não renováveis o que resultará no seu esgotamento, representando, dessa forma, uma ameaça ao meio ambiente.

No Brasil, essa situação é menos preocupante, devido à utilização da hidroeletricidade, que é a matriz energética nacional como mostra a Figura 1. Porém, mesmo a hidroeletricidade sendo uma fonte de energia elétrica limpa, o empreendimento provoca grandes transtornos ambientais: alagamento de grandes territórios para a formação dos reservatórios em áreas que poderiam produzir alimentos, pois nesses locais os solos são mais ricos para a agricultura. Sua instalação, freqüentemente é realizada longe do local de utilização, necessitando de longas linhas de transmissão, além das conseqüências devastadoras para a população atingida, como perdas patrimoniais, culturais e desestruturação das comunidades.

A geração de energia elétrica por meio de fontes fósseis também é praticada em larga escala no Brasil, sendo a segunda mais solicitada. Além da preocupação com o esgotamento dessas fontes, há o fator ambiental, sobre o qual ocorrem duas formas de agressão: a emissão de gases na atmosfera e o despejo de água com temperatura elevada no meio ambiente. Os gases produzidos são vários, muitos deles com emissão amplamente combatida

atualmente como o CO₂ (o gás carbônico). Mas o CO₂ não é o único, gerado em menor quantidade há o CO (monóxido de carbono) e carbono puro, que são lançados na atmosfera, contribuindo para o aumento do efeito-estufa e diminuindo a qualidade do ar.

CARVALHO (2000, p. 72) explica que:

[...] no Brasil os combustíveis fósseis são empregados pelas usinas termoelétricas e siderúrgicas acarretando na emissão de partículas enriquecidas em espécies químicas altamente tóxicas. Essas partículas podem causar sérios problemas ao meio ambiente e ao ser humano por permanecerem durante um longo período na atmosfera e por apresentarem em sua superfície concentrações elevadas de metais como Ni, Cr, Pb, Cd, Fe, Mn, etc.

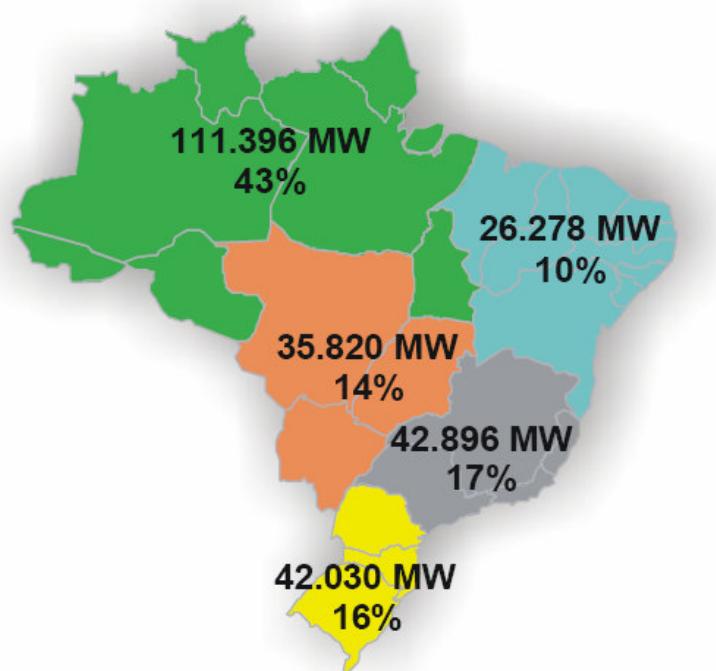


Figura 1 - Distribuição regional do potencial hidrelétrico.

Fonte: BRASIL (2002).

As usinas nucleares, que também são encontradas no Brasil e que muito se assemelham às termoelétricas, porém em vez de fontes fósseis produzem calor por fissão nuclear, de Angra dos Reis captam água do mar e nele a despejam. A usina de Angra II devolve a água do mar 60 °C mais quente do que a temperatura ambiente (COM CIÊNCIA, 2006).

Considerando-se os impactos ambientais provocados pelas fontes de energia convencionais e o temor pelo esgotamento do petróleo, estão sendo realizados estudos em relação a fontes de energia renováveis como a energia solar.

2.2 ENERGIA NA AGRICULTURA

A produtividade agrícola vem crescendo constantemente e isso é consequência da realização das inúmeras pesquisas direcionadas ao campo e à utilização das tecnologias obtidas nessas pesquisas. Consequentemente, mais energia é utilizada para implementar as novas tecnologias.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia, o setor agropecuário vem consumindo mais energia com o decorrer do tempo. O consumo do óleo diesel aumentou consideravelmente, devido à mecanização da agricultura, assim como a eletricidade, que teve seu consumo dobrado de 1991 a 2004 (BRASIL, 2005). As Tabelas 1 e 2 mostram o crescimento energético no setor agropecuário, o que também pode ser visualizado na Figura 2.

Tabela 1 - Comportamento energético no setor agropecuário brasileiro (tep)

Identificação	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Lenha	2107	1921	1875	1847	1884	1869	1851	1777	1724	1638	1638	1794	1990	2130
Óleo Diesel	3377	3462	3826	4014	4275	4480	4659	4475	4617	4452	4855	4775	4825	4767
Óleo Combustível Gás	21	32	35	63	94	83	80	45	87	106	144	106	83	71
Liquefeito de Petróleo	1	1	1	1	1	1	4	8	13	16	21	20	18	20
Querosene	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eletricidade	629	648	688	721	789	847	928	997	1089	1105	1066	1111	1228	1281
Carvão Veg.	13	9	8	6	7	8	6	6	5	5	5	5	5	6
Total	6148	6074	6433	6652	7051	7288	7528	7308	7536	7322	7729	7810	8150	8274

Fonte: BRASIL (2005).

Tabela 2 - Evolução do consumo de energia no setor agropecuário no Brasil (%)

Identificação	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Lenha	34,3	31,6	29,1	27,8	26,7	25,7	24,6	24,3	22,9	22,4	21,2	23	24,4	25,7
Óleo Diesel	54,9	57	59,5	60,3	60,6	61,5	61,9	61,2	61,3	60,8	62,8	61,1	59,2	57,6
Eletricidade	10,2	10,7	10,7	10,8	11,2	11,6	12,3	13,6	14,5	15,1	13,8	14,2	15,1	15,5
Outras	0,6	0,7	0,7	1	1,5	1,3	1,2	0,8	1,4	1,7	2,2	1,7	1,3	1,2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: BRASIL (2005).

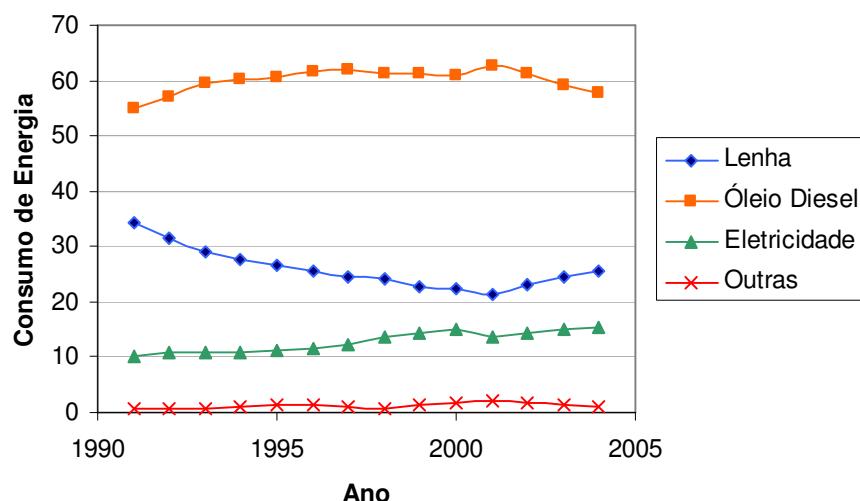


Figura 2 - Evolução do consumo de energia no setor agropecuário no Brasil (%)

Fonte: BRASIL (2005).

ALMEIDA e CLUA (2005, p. 04) relata que:

Só 33% da população das zonas rurais dos países em desenvolvimento têm acesso à eletricidade. A maior parte depende, quase que exclusivamente, da combustão de lenha, esterco, resíduos agrícolas, de forma bastante ineficiente, para suprir a necessidade de aquecimento, cocção de alimentos, iluminação.

A energia elétrica é de grande importância no meio rural para valorizar as atividades no campo, elevar a renda de pequenos produtores por agregar valores aos seus produtos, melhorando a vida do homem no campo. Porém, a obtenção dessa energia se torna cara, devido à transmissão, distribuição e manutenção. O custo da eletrificação rural convencional é diretamente

proporcional à distância das propriedades rurais das linhas de distribuição e inversamente proporcional ao número de propriedades beneficiadas.

Uma solução para esse problema é a geração de eletricidade descentralizada. Segundo um informe da FAO Y CONSEJO MUNDIAL DE LA ENERGIA (2006, p. 01), “A tecnologia do tipo eólica, solar, hidráulica e da biomassa oferece oportunidades para melhorar o abastecimento de energia nas zonas rurais”. Isto porque, essas formas de obtenção de eletricidade ficam instaladas próximas dos pontos de utilização, ou ainda, dentro da propriedade do pequeno agricultor, dispensando as longas transmissões, barateando o custo.

Para COSTA, COSTA, ECK (2000, p. 04):

No sistema fotovoltaico, os custos permanecerão constantes, pois o sistema é dimensionado para uso específico, não possuindo variáveis. Para um sistema residencial, o custo do investimento inicial é de US\$ 882,75 e, ao longo de 20 anos, as despesas correspondem a US\$ 1586,04.

O mesmo autor afirma que “é mais barato eletrificar 15 residências há dois quilômetros da rede, através da energia solar fotovoltaica, que estender a rede de distribuição até elas” (COSTA; COSTA; ECK, 2000, p. 04):

SERPA (2001, p. 35) expressa que:

A eletrificação rural em comunidades isoladas é uma questão essencialmente social. Economicamente não rentável, não fundamentada em esquemas de produção e distribuição de produtos agropecuários de larga escala, baixo consumo, necessidade não internalizada na cultura do cotidiano das famílias, a energia serve como referência de conforto e progresso nem sempre ao alcance de todos. Vista como um bem raro e caro até duas décadas atrás, hoje surge como um desejo coletivo de integração na sociedade nacional.

2.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS

A utilização de fontes renováveis para a obtenção de energia elétrica, principalmente a energia solar, cresceu muito nas últimas três décadas, principalmente após a crise do petróleo de 1973 e o acidente da usina de

Chernobyl, Ucrânia, ocorrido em 1986, quando os estudos nessas áreas receberam grande impulso nos Estados Unidos e em alguns países da Europa.

A busca por fontes de energia renováveis vem se intensificando no mundo inteiro, tendo em vista que as formas atuais de produção de energia normalmente trazem impactos negativos para o meio ambiente e para a população envolvida (BRASIL, 2004).

O termo ‘fonte renovável de energia’ não deriva apenas de uma alternativa eficiente, ele é sinônimo de uma energia limpa, pura, não poluente, a princípio inesgotável e que pode ser encontrada em qualquer lugar, pelo menos a maioria na natureza.

Uma das principais energias alternativas é a energia eólica. Conforme OSHIYAMA *et al.* (2005, p. 35):

A energia eólica consiste na energia cinética dos ventos, fonte de energia renovável e limpa. O sistema eólico é constituído principalmente pelo rotor, responsável por transformar a energia cinética dos ventos em energia mecânica através da rotação do eixo, pelo gerador elétrico, responsável por transformar a energia mecânica em energia elétrica, e pela torre que sustenta e posiciona o rotor na altura conveniente.

Uma fonte de energia em abundância no Brasil é a biomassa. Biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia, a biomassa é uma forma indireta de energia solar (ANEEL, 2005).

Há ainda outras fontes renováveis de energia como a maré-motriz e a geotérmica.

2.4 ENERGIA SOLAR

Atualmente, a energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras, por ser uma fonte de calor e luz renovável, não poluente e disponível em grande escala. O sol também é responsável pela origem de quase todas as outras fontes de energia.

Pela incidência dos raios solares ocorre o fenômeno da evaporação, originando assim, o ciclo das águas e possibilitando a formação das hidroelétricas. O aquecimento (excitação) das moléculas, situadas na atmosfera, provoca a sua expansão e a formação de ventos, dando origem à energia eólica. A cana-de-açúcar necessita do sol para se desenvolver e ser transformada em combustível. O petróleo, o carvão e o gás natural originaram-se de plantas e fósseis animais que utilizaram o sol para se desenvolver.

COMETTA (1978, p. 30) julga que:

A energia solar se apresenta sob forma disseminada, e não concentrada, e sua captação e aproveitamento, ao menos para potências elevadas, requerem instalações complexas e custosas. A energia, também, no local de instalação, é disponível de forma descontínua, sujeita a alternância periódica (dia-noite; verão-inverno) e casuais (céu claro-nebuloso) pelo que é indispensável prover dispositivos de acumulação. Como ulteriores complicações e elevação dos custos de instalação. As considerações econômicas não são atualmente favoráveis a um rápido desenvolvimento do uso da energia solar; os elevados custos iniciais de instalação e as dificuldades associadas com a disponibilidade descontínua continuam a obstaculizar sua utilização; a menos de um ulterior dramático aumento dos custos dos combustíveis tradicionais e nucleares. Por outro lado a energia solar é uma forma de energia absolutamente pura; não dá origem a fumaça, nem escórias de nenhuma espécie (e muito menos, a escórias radioativas, que apresentam a incógnita mais grave que obstaculiza a discussão das centrais nucleares) e tão pouco a descarga de gênero algum. Destes pontos de vista, o aproveitamento da energia solar constitui a solução ideal para a proteção do meio ambiente.

Qualquer equipamento solar trabalha com três tipos de irradiação: a direta, a difusa e a global. IQBAL (1983, p. 158) explica que “a irradiação global é a soma da irradiação difusa com a irradiação direta em uma superfície horizontal”.

Para GRIGOLETO (2001, p. 02):

A radiação solar que chega ao topo da atmosfera se propaga pela mesma até incidir na superfície da terra, passando pelos processos de espelhamento e absorção. Devido ao espalhamento observamos, ao nível da superfície do solo, não somente radiação solar direta na forma de feixes de raios solares paralelos, mas também a radiação solar difusa. A soma destas componentes é denominada radiação solar global. Os processos de absorção e espalhamento devem-se à interação da radiação solar com os gases e partículas existentes na atmosfera.

DE FINA e RAVELO (1979) citados por GRIGOLETO (2001, p. 02), afirmam que:

A absorção é o processo pelo qual um fluxo de radiação solar penetra em um corpo e se transforma em energia térmica, aumentando a sua temperatura. A radiação solar ao atravessar a atmosfera sofre uma absorção seletiva, que pode variar conforme seu comprimento de onda:

- a) A radiação de ondas curtas (ultravioletas), que é quase inteiramente absorvida pela camada de ozônio da atmosfera;
- b) A radiação de ondas médias, que atravessa facilmente a atmosfera;
- c) A radiação de ondas longas (infravermelho) que é absorvida de forma variável, sendo que quanto mais abundante for a quantidade de vapor d'água e gás carbônico existente na atmosfera maior será a absorção.

O Brasil, por ser um país de clima tropical, estende-se desde a latitude de 5º norte até 32º sul; possui 82% do território acima do trópico de Capricórnio; está em uma faixa privilegiada, em relação à disponibilidade de energia solar. Como o Brasil possui a maior extensão territorial entre os países que se encontram na faixa mencionada, conclui-se que ele possui a maior potencialidade relativa para o aproveitamento da energia solar, em quase todo o território e durante o ano inteiro.

2.4.1 O Sol como Fonte de Energia

O Sol é a estrela em torno da qual gravita a Terra e que emite luz e calor através de um espectro contínuo de radiação eletromagnético para os planetas do sistema solar.

Situa-se a cerca de 150 milhões de quilômetros da Terra. Com uma idade de aproximadamente 5 bilhões de anos, é uma estrela anã, que pertence à seqüência principal do sistema *Hertzsprung – Russell*.

“O diâmetro solar é de 1.390.000 km, 108 vezes maior que o da Terra (12.756 km). Em relação ao volume, o Sol é 1.300.000 vezes mais volumoso que a Terra. A sua composição química básica é de 85% de hidrogênio, 14,8% de Hélio e 0,2 de outros elementos” (OLIVEIRA, 1997, p. 49).

Sua emissão de radiação cobre todo o espectro eletromagnético com o máximo na vizinhança de 500 μm de comprimento de onda, o que explica a sua aparência amarela.

O Sol é uma esfera de gases incandescentes no centro da qual a temperatura (aproximadamente 15 milhões de graus Kelvin) e a densidade possibilitam o desencadeamento de reações nucleares, que realizam a fusão de núcleos de átomos de hidrogênio em núcleos de átomos de hélio, com perda de massa compensada por emissão de energia na forma de radiação eletromagnética. A região comumente visível, chamada fotosfera, é uma fina película de, aproximadamente, 100 km de espessura. Acima, se estendem a cromosfera e a coroa (DINIZ, 2002).

2.4.2 Histórico

Nas civilizações antigas, o Sol era cultural e religiosamente o corpo celeste mais cultuado. Diversos povos da antiguidade idolatravam o Sol, visto que esta estrela era considerada a mais perfeita imagem do Divino.

Com o decorrer do tempo, cientistas depositaram mais atenção a essa estrela, como no final do século XVIII, quando o cientista francês Lavoisier, usando uma lente grande de 52 polegadas e outro acessório de 8 polegadas, obteve temperaturas próximas de 1750 °C e por pouco não conseguiu fundir a platina. Foi, sem dúvida, a maior temperatura atingida naquela época pelo homem.

Lavoisier contribuiu também para a evolução da fornalha solar, quando provocou a combustão no vácuo e em atmosferas controladas empregando recipientes de quartzo. Observou também que o fogo das fornalhas comuns parece menos puro que o das solares, uma importante consideração, como mais tarde evidenciariam os pesquisadores.

De acordo com a USP (2006),

[...] De Caux com seu engenho primitivo, usava ar quente pra bombear água. Embora apenas muitos anos mais tarde viesse a construir um similar mais aperfeiçoado, as máquinas a ar quente são em geral interessantes sob o ponto de vista histórico. Diversos

inventores começaram a trabalhar com máquinas solares quase ao mesmo tempo. Com o apoio de Napoleão III, August Moucht arquitetou, entre 1866 e 1872, uma máquina a vapor movida pelo Sol. Seu trabalho foi exibido em Tous e testado mais tarde na Argélia em bombeamento de água.

São muitos os precedentes históricos, mas o interesse pela utilização da radiação solar como fonte de energia alternativa cresceu muito nas últimas três décadas do século XX. Hoje esse interesse está adquirindo maiores dimensões, abrangendo não só o aproveitamento da radiação como fonte de energia não poluente e renovável, mas também o estudo climático e sua influência no potencial produtivo agrícola.

2.4.3 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia gerada pela conversão direta da luz oriunda do Sol em eletricidade, que seria o efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico é o surgimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor alimentada pela irradiação solar. Esse fenômeno foi observado por Edmond Becquerel em 1839, mas o seu princípio de funcionamento só foi entendido no início dos anos 1950 (SARRUF; PIGA, 2006).

As células fotovoltaicas são dispositivos similares a semicondutores e são construídos segundo o princípio dos semicondutores, com o formato de uma junção P-N, ou seja, quando as impurezas presentes possuem excesso de elétrons diz-se que o material é um semicondutor tipo N. Se as impurezas adicionadas são elementos trivalentes como o boro, alumínio, gálio ou pentavalentes como o arsênio, antimônio, fósforo. As primeiras produzem buracos no semicondutor e são denominadas impurezas aceitadoras; as segundas fornecem elétrons aos semicondutores e denominam-se impurezas doadoras. Sua estrutura básica é demonstrada na Figura 3.

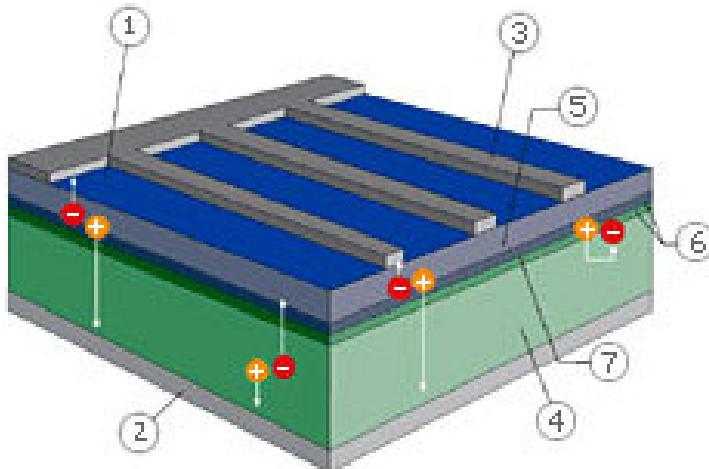


Figura 3 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Fonte: SUNTECHNICS (2006).

Legenda: 1. Capa anti-reflexo; 2. Superfície de contato posterior (contato positivo); 3. Grelha dianteira de contato (contato negativo); 4. Silício com carga positiva (Silício tipo "p"); 5. Silício com carga negativa (Silício tipo "n"); 6. Zona de transição (junção "pn"); 7. Película de separação.

A célula fotovoltaica é o dispositivo de conversão da energia solar em eletricidade. A união de várias células forma um painel fotovoltaico. NISHIMARU (2003, p. 25) afirma que:

Painéis fotovoltaicos são dispositivos semicondutores de estado sólido sem partes móveis e que convertem energia dos raios solares em eletricidade em corrente contínua. A potência de saída destes painéis está diretamente relacionada com a intensidade (W/m^2) dos raios solares, da temperatura de operação dos módulos e de mais alguns outros fatores.

TREBLE (1993, p. 01) afirma que “Um sistema fotovoltaico é uma montagem integrada de módulos e outros componentes, projetados para converter energia solar em eletricidade”.

Para PALZ (1995, p. 357):

A maioria das células solares de silício empregados para aplicações terrestres apresentam folhas em torno de 5 centímetros de diâmetro e espessura de 0,3 a 0,5 milímetros com tendência para maiores diâmetros. Para se conseguir maior potência e/ou tensão, certo número de células são ligadas em série. Para dobrar a corrente, sob tensão constante, as duas células são ligadas em paralelo.

Em relação a um sistema Costa, Eck e Silva (1998, p. 110) afirmam que:

O módulo fotovoltaico constitui no elemento mais confiável e praticamente não necessita de manutenção, dentre os componentes dos sistemas fotovoltaicos de eletrificação rural. Os outros componentes necessitam de manutenção em maior ou menor grau, e alguns requerem maior desenvolvimento e melhorias significativas no desempenho. O caso mais grave que pode ocorrer é a quebra do vidro de cobertura dos módulos. A infiltração de água é que pode, ao longo de dias (meses), debilitar o funcionamento do gerador, reduzindo assim a energia elétrica gerada.

Outro ponto que se deve considerar é a limpeza dos módulos fotovoltaicos, pois a sujeira acumulada pode influenciar negativamente na transformação da energia solar em elétrica.

Conforme HUACUZ (1999) citado por SERPA (2001), os esquemas de eletrificação com energia renovável, em zonas rurais, apresentam as denominações e características a seguir.

Sistemas dispersos: são os sistemas autônomos, residenciais que se destinam, principalmente, à iluminação. Compreendem o módulo fotovoltaico, a bateria, o controlador de carga, fiação e lâmpadas. Esses sistemas somente são competitivos quando as redes elétricas estão a mais de um quilômetro de distância e as casas estão dispersas.

Sistemas centralizados: são os sistemas destinados a fornecer eletricidade a um conjunto de casas ou sítios em regiões remotas. Esses sistemas podem ser de dois tipos: simples e híbridos.

- Sistemas simples: são instalações que usam um só tipo de gerador, como gerador fotovoltaico ou eólico, que proporciona toda a eletricidade requerida pela carga. Compreendem, geralmente, um banco de baterias para o armazenamento de carga, uma pequena rede de distribuição e outros acondicionadores de potência. Dado o alto custo dos componentes, esse sistema é pouco competitivo para proporcionar eletricidade com qualidade similar à da rede convencional. A Figura 4 mostra a configuração do sistema simples de um esquema de eletrificação com energia renovável.

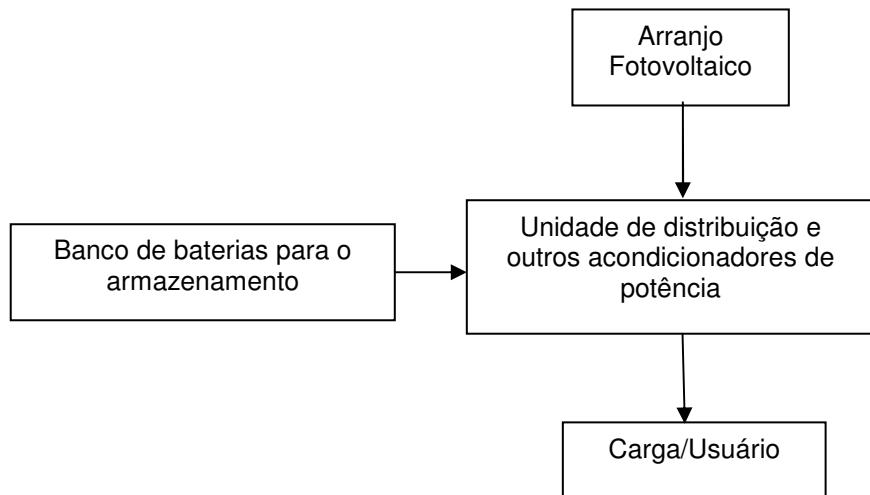


Figura 4 - Configuração simples de um sistema fotovoltaico.

- Sistemas híbridos: são sistemas concebidos para superar as limitações do sistema simples; apresentam as seguintes combinações, segundo o tipo de gerador utilizado: 1 - fotovoltaico; 2 - fotovoltaico-eólico; 3 - Ambos, com ou sem gerador auxiliar. Neste caso, podem ser usados: óleo diesel, gasolina, gás - GLP, biogás ou outro.

Ainda de acordo com SERPA (2001), os sistemas híbridos fornecem um melhor serviço a custos menores, quando comparados aos outros esquemas de eletrificação rural com energias renováveis, mas a complexidade do projeto e a dificuldade de integração impedem sua competitividade econômica. Porém, afirma o autor que estudos recentes têm estimado que os sistemas híbridos são competitivos quando instalados a mais de 15 quilômetros da rede elétrica. A Figura 5 mostra a configuração do sistema híbrido de um esquema de eletrificação com energia renovável.

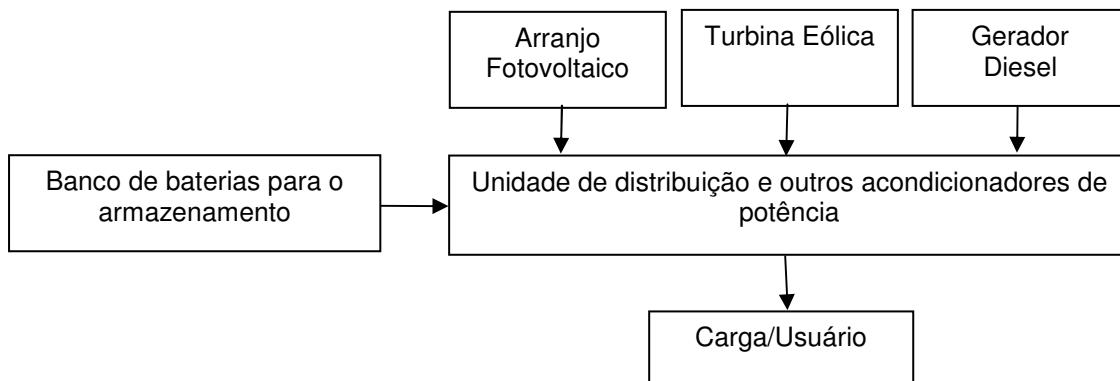


Figura 5 - Configuração híbrida de um sistema fotovoltaico.

Sistemas de aplicação específica: são sistemas de geração destinados ao bombeamento e purificação de água, preservação de produtos perecíveis - vacinas e alimentos - e operação de motores e outros equipamentos de uso agropecuário. Esses sistemas podem também beneficiar outros serviços comunitários como clínicas, escolas e centros comunitários, aparelhados com vídeo e TV, igrejas, iluminação pública.

Sistemas energéticos integrados: são sistemas em que os recursos renováveis disponíveis localmente: sol, vento, biomassa, pequenas quedas d'água, etc., são aproveitados, visando satisfazer todas às necessidades energéticas das comunidades. Esses sistemas são mais complexos e podem garantir benefícios com custos de geração mais baixos se projetados adequadamente.

De acordo com FEDRIZZI (1997), a geração fotovoltaica tem encontrado inúmeras aplicações no mundo inteiro, não somente para sistema de geração autônoma como também e cada vez com maior importância, em sistemas conectados à rede elétrica existente. Algumas das principais aplicações desta tecnologia são:

- Aplicações espaciais: sistemas fotovoltaicos em satélites e outras missões espaciais;
- Sistemas conectados à rede elétrica: sistemas residenciais, comerciais ou industriais que geram energia elétrica e a entregam ou recebem da rede, segundo seu balanço geração/consumo;
- Grandes centrais de geração: sistemas que entregam a energia gerada diretamente à rede elétrica;

- Produtos de consumo: células solares em calculadoras, relógios e outros pequenos objetos;
- Sistemas remotos autônomos: sistemas residenciais, comerciais, para pequenas comunidades, postos de saúde, estações meteorológicas, plataformas marinhas, sistemas de telecomunicação, carregadores de bateria e bombeamento de água.

2.4.4 A Eficiência dos Sistemas Fotovoltaicos

A eficiência dos sistemas fotovoltaicos depende dos rendimentos dos vários componentes ligados ao sistema, suas formas de ligação, além do tipo de carga alimentada pelos painéis. Seu desempenho, também, é altamente influenciado pela temperatura.

GNOATTO (2003, p. 20) cita Overstraeten e Mertens (1996) e Treble (1980) que afirmam:

[...] o rendimento do painel depende da radiação solar, da temperatura, da tensão e da sujeira acumulada do painel. O valor nominal do rendimento é fornecido pelos fabricantes. Caso não seja, pode ser deduzido diretamente a partir da potência máxima de pico e a área útil do painel (área total das células descontada as fitas de contato). Esse rendimento é para as condições de teste STC (Condições padrão de teste). A eficiência do painel fotovoltaico é dada pela comparação entre a potência produzida pelo painel e a irradiação incidente em seu plano.

MIGUEL *et al.* (2006) estudaram um sistema fotovoltaico avaliado em condições reais de funcionamento, instalado em Castilha e Leon – Espanha, no período de dezembro de 2000 a novembro de 2001 e obtiveram uma eficiência de 11,3% em agosto e 13,9% em janeiro.

CARDONA e LÓPEZ (1999) avaliaram durante um ano o desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede de energia elétrica convencional, instalado na universidade de Málaga – Espanha, no período de janeiro a dezembro de 1997 e obtiveram um rendimento médio mensal entre 8,8 e 10,3 %.

GNOATTO (2003) desenvolveu um estudo sobre um sistema fotovoltaico autônomo, com armazenamento de energia, instalado na Estação

Experimental Agrometeorológica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* de Cascavel sob condições reais de campo, durante o ano de 2002 e a eficiência durante o ano teve a média mensal oscilando entre 8,65% e 9,17%, com média anual de 8,84%.

Além de eficiente, o painel fotovoltaico deve ser econômico quando comparado com um sistema convencional. MARAFIA (2001, p. 567), ao realizar um comparativo econômico na geração de eletricidade por meio de um sistema fotovoltaico e turbina a gás convencional no Qatar, concluiu que:

Uma avaliação básica da economia da geração de eletricidade no Qatar sugere que a tecnologia fotovoltaica não está longe de ser economicamente possível. A avançada tecnologia e a larga demanda do mercado para sistemas fotovoltaicos devem resultar na eficiência melhorada da conversão além de abaixar o seu custo. Entretanto, deve-se enfatizar que os sistemas fotovoltaicos são fontes limpas de energia e seu impacto positivo no ambiente deve ser levado em consideração.

2.4.5 Fatores que Afetam o Desempenho das Células Fotovoltaicas

A temperatura e a irradiação solar são os dois principais fatores que influenciam a produção de energia pelos módulos fotovoltaicos. A corrente gerada pelo módulo varia linearmente com a irradiância, enquanto que a tensão varia logaritmicamente. Com o aumento da irradiação, aumenta a temperatura da célula e, consequentemente, ela tende a reduzir a eficiência do módulo. Isso ocorre porque a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que a corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível, usualmente, desconsiderada nas aplicações práticas (PALZ, 1995).

Segundo SOLAREX (2001) citado por GNOATTO (2003, p. 24), “[...] o módulo fotovoltaico MSX 56 tem um decréscimo na tensão de circuito aberto de (80 ± 10) mV, a potência máxima de pico diminui $(0,5 \pm 0,05)\%$ e a corrente de curto circuito aumenta $(0,065 \pm 0,015)\%$ para cada $^{\circ}\text{C}$ de aumento de temperatura”.

GXASHEKA, VAN DRY e MEYER (2005) estudaram a performance dos parâmetros de 5 módulos fotovoltaicos, observando os efeitos da temperatura e concluíram que tanto a tensão quanto a potência apresentaram um decréscimo com o aumento da temperatura (Figuras 6 e 7).

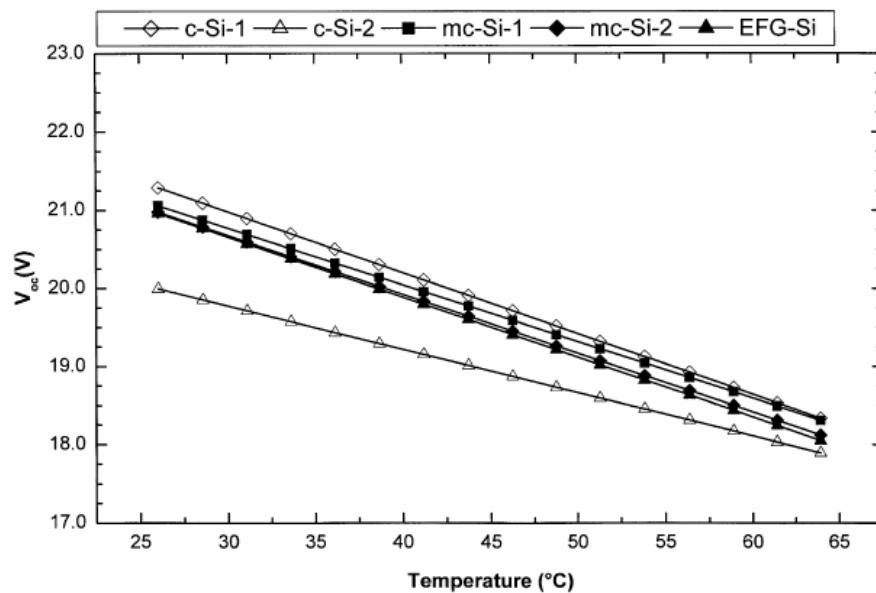


Figura 6 - Tensão de acordo com a temperatura nos painéis fotovoltaicos utilizado no estudo.

Fonte: GXASHEKA, VAN DRY, MEYER (2004).

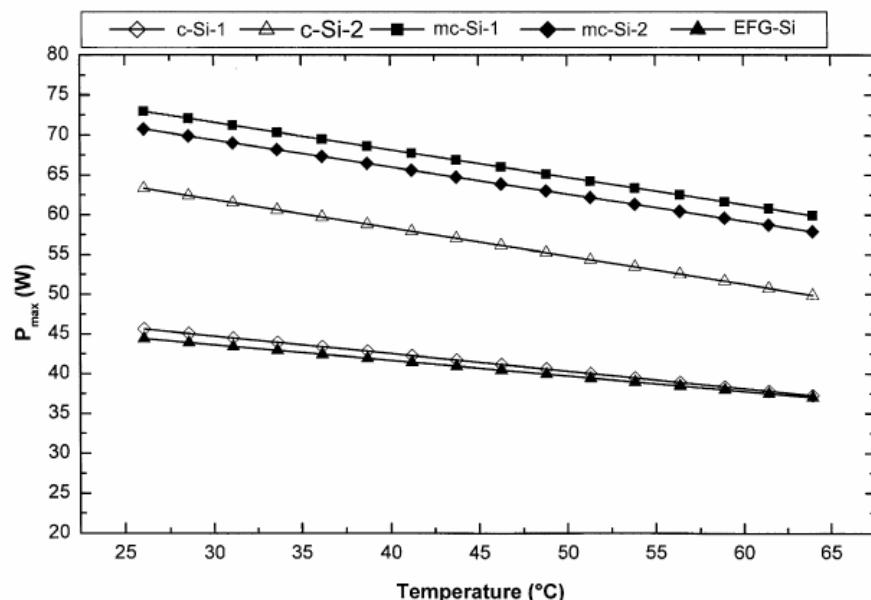


Figura 7 - Potência máxima de acordo com a temperatura nos painéis fotovoltaicos utilizado no estudo.

Fonte: GXASHEKA, VAN DRY, MEYER (2004).

2.4.6 Curva do Painel Fotovoltaico e Reta de Operação da Bomba

Conforme GNOATTO *et al.* (2005):

Para realizar a curva característica de um painel fotovoltaico, pode-se utilizar a fonte natural de radiação solar ou através de um simulador sendo que o procedimento padrão internacional é baseado na norma IEC 904-1, para uma célula ou conjunto de células As condições de irradiação solar devem ser estáveis com uma variação menor que 1%.

KAWAHARA (2003) obteve a curva do painel fotovoltaico, do fabricante Solarex, modelo MSX 56, tensão padrão 12 V, corrente padrão 3,81 A, potência de 115 W na Estação Experimental Agrometeorológica da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* de Cascavel, Paraná. Localizado a uma latitude de 24°59' sul, longitude de 53°26' oeste e altitude de 682 m. Juntamente com a curva do painel foram plotadas as retas de operação da bomba trabalhando com valores de pressão de 10, 14, 20, 25, 32 mca. Os dados coletados para o levantamento da curva do painel fotovoltaico foram obtidos conforme a seguinte descrição:

Os dados para a plotagem da curva característica do painel (tensão e corrente) foram obtidos através de uma carga variável (variando de curto circuito a circuito aberto), sendo que a corrente foi medida através de um resistor de precisão (shunt) ligado em série com a carga. A diferença de potencial da carga foi obtida por medida direta em paralelo com a mesma e a temperatura foi obtida por um termopar acoplado diretamente ao painel. Todos os dados são lidos e armazenados num sistema de aquisição de dados automaticamente KAWAHARA (2003, p. 46).

KAWAHARA (2003, p. 46), ainda descreve que

A determinação da curva foi efetuada em dois painéis fotovoltaicos (Solarex MSX 56 de silício policristalino com 36 células ligadas em série cada uma delas) formando o conjunto, com um termopar (tipo K) conectado em sua parte inferior e um piranômetro para medir a irradiação solar global na mesma inclinação do painel. Na aquisição utilizou-se um *datalogger* da *Campbell Scientific*, programado para realizar leituras com freqüência de 1 Hz e armazenar a média aritmética a cada cinco minutos. Os dados para a plotagem da curva característica foram coletados em dia de céu limpo com irradiação solar de 1000 W.m⁻² e, como carga, foi utilizado um motor de bomba, Solarjack - Modelo SDS-D-228.

A Figura 8 mostra a curva do painel e as retas de operação da bomba trabalhando em diferentes pressões manométricas.

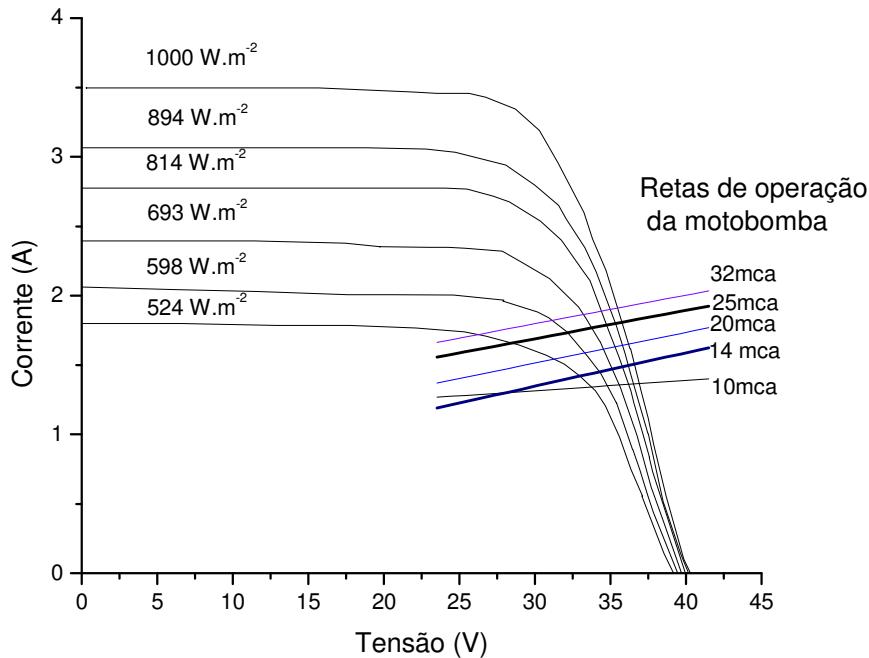


Figura 8 - Curvas características I x V dos módulos fotovoltaicos interceptadas pelas retas de operação da bomba.

Fonte: KAWAHARA (2003).

2.5 BOMBEAMENTO DE ÁGUA POR MEIO DA ENERGIA SOLAR

O perigo de escassez de água potável vem sendo bastante debatido nos últimos anos em todo o mundo. Tanto as nações industrializadas quanto as nações que ainda estão em desenvolvimento já se preocupam com essa questão, mas os efeitos são mais vivenciados e preocupantes nas nações em desenvolvimento, nas quais a infra-estrutura é deficiente. Esses problemas são ainda maiores em regiões com climas áridos e semi-áridos e presentes em todos os continentes, como mostra a Figura 9.

Confirmando essa afirmação, segundo MARINI e ROSSI (2005, p. 67):

O suprimento energético a comunidades rurais isoladas e a áreas remotas tem sido um constante desafio, principalmente nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, devido às enormes

disparidades econômicas e sociais e, muitas vezes, às dimensões geográficas desses países.

Entre as aplicações típicas para os sistemas de geração de energia alternativa, o bombeamento de água para uso humano, animal e até mesmo para a irrigação se destaca pelo seu apelo ambiental e social, pois o uso óleo diesel, para acionar bombas apesar de simples e inicialmente de baixo custo, demanda constante manutenção e suprimento de combustível, além de constituir uma solução geradora de poluição sonora e atmosférica.

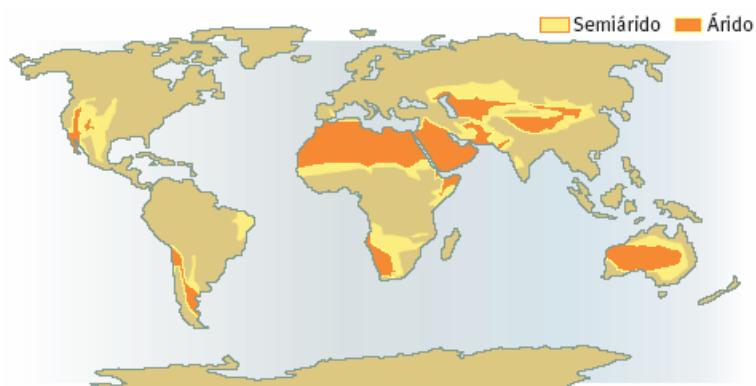


Figura 9 - Regiões áridas e semi-áridas nos continentes.

Fonte: CARVALHO (2000).

Uma das soluções é o uso de sistemas fotovoltaicos para o bombeamento de água, pois, além de ser uma fonte limpa, sem ruídos e sem peças móveis para a manutenção, possui uma característica única na relação natural entre a disponibilidade de energia solar e a demanda de água. Esses sistemas, geralmente, não demandam baterias de acumuladores e a energia gerada nos painéis em corrente continua é convertida por um inversor estático para corrente alternada que alimenta a bomba ou é utilizada diretamente em corrente continua, solicitando, assim, uma bomba que funcione com esta corrente.

Segundo SILVA (2000, p. 97):

[...] no caso particular do fornecimento de águas às populações rurais, as energias renováveis de geração autônoma desempenham um papel muito importante e tem contribuído para o desenvolvimento social de muitas regiões isoladas em todo o mundo. Em casos como este o suprimento é importante para a produtividade rural, bem como para as condições sanitárias do trabalhador rural.

Na região nordeste, a escassez de água é maior na área mais árida, o chamado “polígono da seca”, com cerca de 950 mil km² (60% da superfície total da região). No sertão nordestino, as soluções tradicionais para resolver os problemas da falta de água são as construções de açudes, para armazenar a água superficial e a perfuração dos poços, para buscar a água subterrânea. Poderiam ser extraídos do subsolo da região, sem riscos de esgotamento dos mananciais, pelo menos 19,5 bilhões de m³ de água por ano (40 vezes o volume explorado hoje), de acordo com estudos da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (CARVALHO; JABLONSKI, 2000).

Para SILVA e CARDOSO FILHO (1999, p. 07):

Sistemas de bombeamento de água por painéis fotovoltaicos vem sendo utilizados em diversas localidades e países. A Companhia de Fornecimento de Águas do Estado de Minas Gerais, Copasa, por exemplo, tem instalado sistemas de bombeamento de água de lençóis subterrâneos utilizando esta tecnologia. Comparados aos sistemas de energia eólica, os sistemas fotovoltaicos apresentam como vantagens a versatilidade em termos da definição do local de instalação (inclusive em áreas urbanas), maior robustez e menor necessidade de manutenção (mínimo de partes móveis). A principal vantagem dos sistemas eólicos é o baixo preço da energia gerada (US\$ 0,03/kWh contra US\$ 0,20/kWh para os sistemas fotovoltaicos). No entanto, esta diferença no custo da energia gerada por estes sistemas deve diminuir. Painéis fotovoltaicos são essencialmente componentes eletrônicos e seu custo deve seguir a tendência geral do setor: redução de custos com o aumento da produção e o aperfeiçoamento da tecnologia de produção.

ROGER (1984) citado por KAWAHARA (2003, p. 47) esclarece que “... a aplicação da potência elétrica fotovoltaica para bombeamento de água recebeu atenção recente devido à esperada redução de custo dos painéis solares fotovoltaicos. Na década de 60 o preço de um painel fotovoltaico terrestre de qualidade chegava a aproximadamente US\$ 4000/Wp e caiu para, aproximadamente, US\$ 50/Wp em 1970, estando disponível por US\$ 20/Wp por volta de 1975. Em 1980, quando muitas centrais de estação experimental de potência fotovoltaica estavam previstas para construção, o preço chegou a US\$ 9,50/Wp. Uma pequena bomba elétrica móvel, acionada por painel fotovoltaico poderá ser economicamente viável quando o preço da geração fotovoltaica estiver, aproximadamente, entre US\$ 4 e US\$ 5 o Wp.

O bombeamento fotovoltaico no Brasil, de acordo com FEDRIZZI (1997, p. 24):

Apesar de até pouco tempo não ter tido uma marcada importância na implantação de sistemas de bombeamento fotovoltaico, o Brasil começa a tomar uma posição expressiva no cenário mundial, graças aos processos institucionais. Os primeiros sistemas instalados no país datam de 1981 e estima-se que até 1994 tenham sido instalados não mais do que 150 unidades. Nos últimos nove anos, no entanto, o setor experimentou um considerável crescimento devido à atuação do Ministério de Minas e Energia com o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios.

BAKTHAVATSALAM, HART e PARTHAN (1997, p. 1930) realizaram um estudo na Índia e afirmam que “O sistema de bombeamento solar pode ser apresentado como a solução mais apropriada e econômica para uma grande perspectiva de aplicação dos subsídios ligados diretamente e indiretamente ao setor de energia convencional”. O bombeamento de água a partir da energia solar fotovoltaica, além de substituir o acionamento por energia convencional, apresenta mais economia do que um sistema de bombeamento de água a diesel, conforme o estudo desenvolvido por SHRESTHA (1996, p.1659) no Nepal:

Geralmente o sistema fotovoltaico de bombeamento d’água apresenta vantagens sobre o sistema a diesel devido a:

O diesel é um combustível caro e apresenta a necessidade de transporte de confiança e com preço alto. O sistema fotovoltaico não necessita de combustível;

A poluição através do ruído e do ar não é gerada pelos painéis fotovoltaicos; o sistema a diesel gera ambos;

O sistema a diesel necessita de pessoas capacitadas para realizar a manutenção; o sistema fotovoltaico apresenta manutenção menos complexa e não necessita de pessoas especializadas.

Mas, para a utilização nesse tipo de aplicação é necessária a realização de estudos, como afirmam MOHANLAL KOLHE e KOTHARI (2004, p. 618) “O estudo da performance de uma motobomba ligada diretamente a painéis fotovoltaicos será útil para selecionar o motor e a carga para o bombeamento d’água em áreas remotas”.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO

A presente pesquisa foi realizada nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Unidade Oeste, *campus* de Medianeira, Paraná, Brasil. O município está localizado no oeste paranaense com 25°17'43" latitude sul, 54°05'38" longitude oeste (AONDEFICA, 2006) e apresenta uma altitude de 500,7 metros.

3.2 MATERIAIS

Para a montagem do sistema de bombeamento de água com os conjuntos fotovoltaicos foram necessários os seguintes equipamentos:

- Dois painéis solares, fabricante Solarex, modelo MSX 56, tensão padrão de 12 V, corrente padrão de 3,35 A e potência de 56 W;
- Uma bomba, fabricante SolarJack, modelo SDS-D-228, tensão de 30 v.
- Um transdutor de pressão, fabricante Dicket-John, modelo 46570-0010, faixa de atuação de 0 a 100 PSI, tensão de entrada de 0 a 16VDC, tensão de saída de 0,5 a 5,0 VDC;
- Um medidor de vazão, fabricante LAO, tipo turbina, classe 0,1;
- Um transdutor de vazão aferido com precisão;
- Um *micrologger* da marca Campbell Scientific-INC, modelo CD23X;

- Um termopar do tipo K (cromo/alumínio) aferido para a aquisição de dados.
- Um microcomputador;
- Um piranômetro Kipp & Zonen CM3;
- Um divisor de tensão;
- Uma resistência Shunt.

É importante esclarecer que as citações dos equipamentos, suas marcas e modelos não constituem, de forma alguma, recomendações comerciais, mas somente a identificação do material utilizado neste experimento.

3.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Foram instalados 10 painéis fotovoltaicos da Marca *Solarex*, modelo MSX 56, sendo que somente dois painéis foram utilizados, ligados em série devido à configuração do sistema. O conjunto fotovoltaico foi montado sobre uma estrutura metálica e fixado em colunas de concreto situadas sobre a cobertura do laboratório do Curso de Tecnologia em Laticínios e Carnes da UTFPR. Para a fixação foram utilizados *parabolds*, objetivando um maior apoio e segurança para os painéis.

Uma bomba do tipo diafragma, do fabricante *SolarJack*, modelo SDS-D-228, de trabalho submerso com funcionamento de tensão próxima de 30 Vcc foi alimentada pelos dois painéis e bombeou água a uma altura de 20 metros, altura entre a cisterna e a caixa de água na qual foi está instalada.

Devido ao fato do sistema de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos trabalhar de forma direta, ou seja, sem a utilização de inversores (CC – CA) e/ou bancos de baterias para o armazenamento da energia elétrica, o restante dos equipamentos foram utilizado para a aquisição e armazenagem de dados. A Figura 10 mostra o fluxograma que obedece à montagem do sistema, indicando o posicionamento de cada equipamento, tanto do conjunto fotovoltaico quanto do sistema de controle.

3.3.1 Conjunto Fotovoltaico

O conjunto fotovoltaico é formado por dois painéis *Solarex*, modelo MSX 56. O fornecimento da potência nesse modelo de painel pode chegar a 115W em *Standard Test Conditions – STC* (Condição Padrão de Teste).

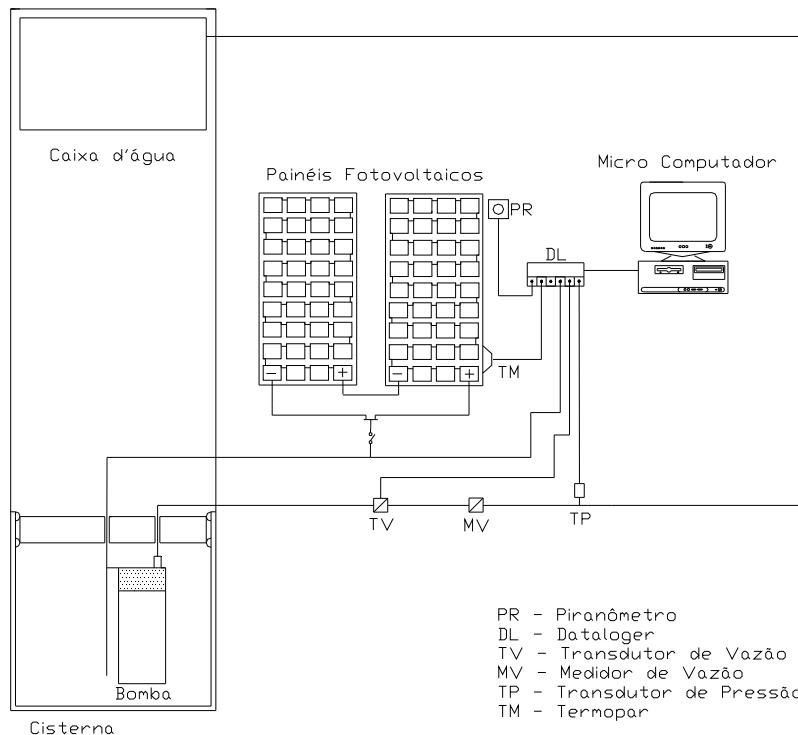


Figura 10 - Montagem do sistema de bombeamento de água acionado por painéis fotovoltaicos.

Os módulos fotovoltaicos foram instalados sobre uma estrutura metálica rígida e fixa no telhado do Laboratório do Curso de Tecnologia em Laticínios e Carnes na UTFPR. O local foi escolhido devido à proximidade à caixa de água e por não apresentar árvores ou estruturas que pudessem fornecer sombra sobre as células fotovoltaicas, prejudicando o desempenho.

Teve-se uma maior preocupação com o posicionamento dos painéis em relação ao seu alinhamento com o norte geográfico, pois seu posicionamento incorreto pode acarretar uma diminuição da eficiência do sistema fotovoltaico. Para isso, foi determinado o horário oficial do meio-dia

real do dia do alinhamento, no caso, 9 de novembro de 2004. O valor do meio-dia real foi obtido por meio do *site* do Laboratório de Ensino de Ciências e Tecnologia – LECT, USP/LECT (2006) (latitude sul de 25°17'43" e longitude oeste de 54°05'38"). O valor encontrado foi de 12 horas, 43 minutos e 49 segundos. Com o valor do meio-dia real foi possível determinar o norte geográfico e consequentemente o posicionamento do conjunto fotovoltaico pela sombra de uma haste vertical projetada sobre um plano horizontal.

Outra preocupação foi com o ângulo necessário entre o painel e o plano horizontal em que está apoiado. GNOATTO (2003) sugere que os módulos sejam instalados com um ângulo igual à latitude do local de instalação. Essa inclinação é importante para evitar o acúmulo de sujeira e obter uma maior eficiência do sistema fotovoltaico, pela maior exposição à radiação solar, principalmente, no período de inverno. A Figura 11 mostra o sistema fotovoltaico montado no telhado do Laboratório do Curso de Tecnologia em Laticínios e Carnes; deve-se considerar que a caixa de água está a sul dos painéis e que os módulos estão voltados com sua face para o norte geográfico.

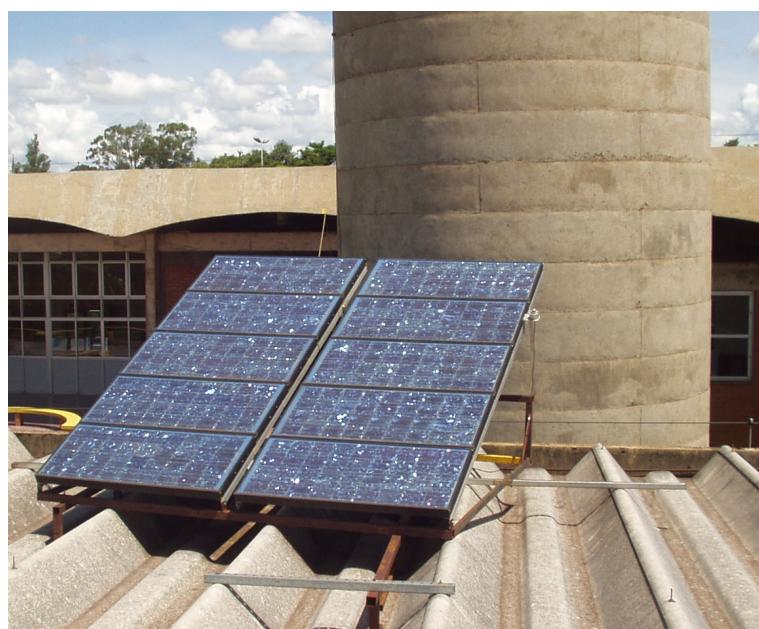


Figura 11 - Conjunto fotovoltaico.

3.3.2 Sistema de controle

Para a realização do estudo sobre o comportamento do sistema de bombeamento d'água para o município de Medianeira, foi necessária a instalação de equipamentos para a aquisição e armazenamento de dados para posterior avaliação. Foram obtidas as seguintes informações:

- Irradiação solar global incidente nos painéis fotovoltaicos;
- Vazão da água proporcionada pela bomba;
- Pressão da água proporcionada pela bomba;
- Tensão e corrente emitida pelos dois painéis fotovoltaicos;
- Temperatura nos painéis fotovoltaicos.

Foram coletados dados durante 10 meses, com início em 1 de fevereiro de 2005, quando as leituras eram realizadas de 5 em 5 s. Os dados gravados no computador representam a média a cada minuto.

3.3.2.1 Irradiação solar global

Junto aos painéis fotovoltaicos montou-se uma estrutura para a fixação e instalação de um piranômetro da *KIPP & ZONEN CM3* objetivando a obtenção dos valores de irradiação solar global incidente nos painéis fotovoltaicos. PALZ (1981, p. 59) afirma que:

A radiação solar global é registrada por um piranômetro, que recebe a energia solar de todo o hemisfério celeste, isto é, de horizonte a horizonte, em todas as direções. A faixa aproximada de comprimentos de onda diretamente medida por um piranômetro é de 0,3 µm a 3 µm.

A Figura 12 mostra o piranômetro instalado no experimento. É importante destacar que o piranômetro está disposto no mesmo plano dos painéis (Figura 13), pois a leitura da irradiação é diferenciada quando o equipamento está na horizontal e comparada quando instalado no plano inclinado. Em relação à importância de se posicionar o painel fotovoltaico no plano inclinado MAGALHÃES ROSA (2003, p. 47) diz que "... pode-se instalar

os geradores com diferentes inclinações de maneira a aumentar a geração no inverno, gerar o máximo de energia anual ou ainda distribuir a geração durante o ano todo”.

O ponto crítico quando se trabalha com energia solar ocorre no período de solstício de inverno. Ao se trabalhar com o painel inclinado, adapta-se o sistema para trabalhar nesse período, pois a geração de energia elétrica será maior. Essa afirmação é comprovada na Figura 14, que mostra uma maior irradiação global, quando posicionado em plano inclinado no período de solstício de inverno, em relação à irradiação global em plano horizontal.



Figura 12 - Piranômetro.



Figura 13 - Piranômetro no plano dos painéis.

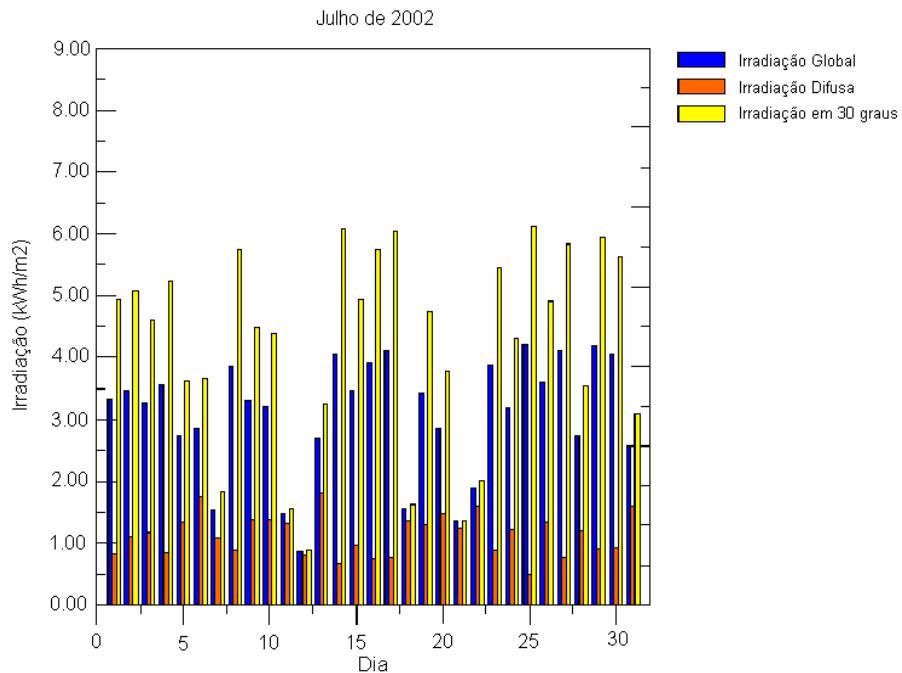


Figura 14 - Irradiação global, difusa e inclinada a 30 graus.

Fonte: MAGALHÃES ROSA (2003).

3.3.2.2 Vazão

O transdutor foi construído pela adaptação de um *encoder* com 8 furos com um emissor-receptor ligados a um hidrômetro para que, por meio de pulsos, fossem coletados o valor da quantidade de água que foi bombeado pelo sistema da cisterna para a caixa de água. Deve-se destacar que o transdutor foi aferido para uma leitura correta da vazão, para isso disponibilizou-se a passagem de valores conhecidos de água sob o hidrômetro, verificando-se a quantidade de pulsos emitidos pelo equipamento, posteriormente obteve-se uma equação com o fator multiplicativo para a obtenção do valor de vazão.

Um medidor de vazão, fabricante Lao, tipo turbina, classe 0,1 também foi instalado para a informação do valor total da vazão. A Figura 15 ilustra os equipamentos destinados para a medição e monitoramento da vazão de água e a Figura 16 mostra em detalhe o Hidrômetro.



Figura 15 - Medidor de vazão e hidrômetro.

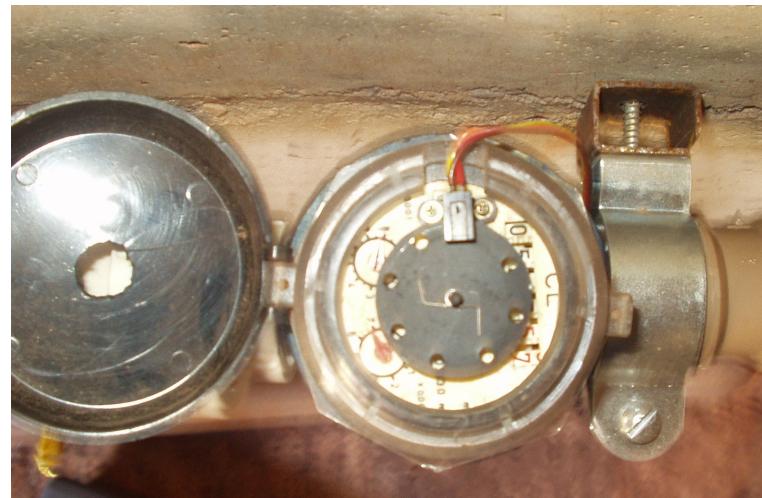


Figura 16 - Hidrômetro.

3.3.2.3 Pressão

Um transdutor de pressão foi instalado com o objetivo de indicar o valor com que a água estava sendo bombeada da cisterna até a caixa de água. O transdutor apresenta as seguintes características: Fabricante *Dicket – Jonh*, modelo 46570-0010, faixa de atuação de 0 a 100 PSI, tensão de entrada de 0 a

16 VDC, tensão de saída de 0,5 a 5,0 VDC. A Figura 17 mostra esse transdutor.



Figura 17 - Transdutor de pressão.

3.3.2.4 Tensão e corrente

Com uma resistência Shunt, obteve-se o valor de corrente elétrica e utilizando-se um divisor de tensão ligado em série com o *datalogger* foram obtidas as informações de tensão gerada pelo sistema fotovoltaico. Na Figura 18 pode-se observar o divisor de tensão utilizado, pois o *datalogger* só admite uma tensão máxima de 5 V.

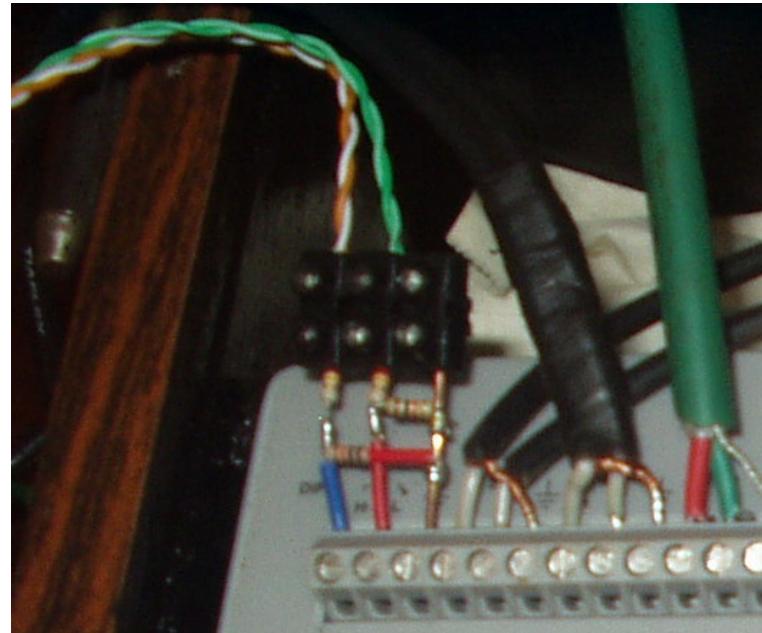


Figura 18 - Divisor de tensão.

3.3.2.5 Temperatura dos painéis fotovoltaicos

O termopar do tipo K foi aferido e instalado atrás de um painel fotovoltaico e forneceu os dados de sua temperatura. A Figura 19 identifica o local onde foram instalados e coletados os dados em relação à temperatura nos painéis fotovoltaicos.



Figura 19 - Localização de instalação do termopar.

Todos esses equipamentos foram ligados a um coletor de dados computadorizado, no qual foi efetuada a aquisição e a armazenagem dos dados de tensão, corrente, pressão, vazão, temperatura e irradiação. O computador teve como finalidade, processar e analisar os dados coletados no período de funcionamento do experimento. Na Figura 20 observa-se o coletor de dados computadorizado (*datalogger*) com a entrada de todos os transdutores e a Figura 21 mostra o computador utilizado para o processamento e análise dos dados coletados.

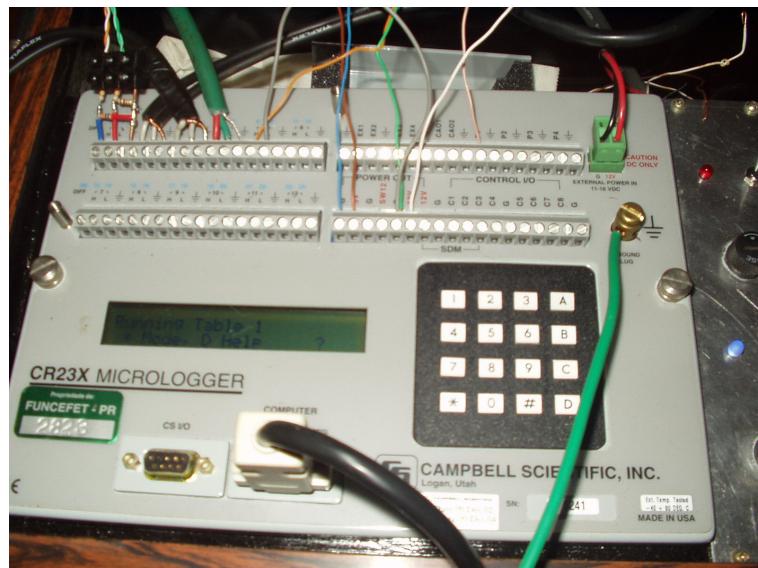


Figura 20 - *Datalogger CR 23X da Campbell Scientific – INT.*



Figura 21 - *Microcomputador para as análises dos dados.*

3.3.3 Aplicativos

O programa utilizado para a aquisição de dados foi o *PC208W 3.2*, que acompanha o *datalogger*. Para a análise e avaliação dos dados foram utilizados os softwares estatísticos.

3.4 METODOLOGIA UTILIZADA NA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA E EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Para a obtenção dos valores de potência gerada pelos painéis fotovoltaicos multiplicaram-se os valores de tensão pela corrente, conforme a equação (1).

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

A eficiência do sistema fotovoltaico ligado a um sistema de bombeamento de água foi determinada pela divisão da potência gerada no painel pelo produto da área útil da célula fotovoltaica e a irradiação solar, multiplicado por 100 para obter o valor em porcentagem. Segundo CAMUS e EUSÉBIO (2006) a eficiência do sistema fotovoltaico pode ser obtida pela equação (2).

$$\eta = \frac{V \cdot I}{I_s \cdot A} \cdot 100 \quad (2)$$

em que:

V – Tensão (V);

I – Corrente (A);

I_s – Irradiação Solar Global ($W \cdot m^{-2}$);

A – Área Útil do Módulo (m^{-2}).

3.5 METODOLOGIA UTILIZADA NA DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA HIDRÁULICA

Para a obtenção do valor da potência hidráulica é necessário multiplicar a constante 0,1634 pela vazão dada em $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ e pela altura manométrica dada em metros. A potência hidráulica é dada pela equação (3).

$$Ph = 0,1634 \cdot Q \cdot H \quad (3)$$

em que:

Ph – Potência hidráulica (W)

Q – Vazão ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$);

H – Altura Manométrica (m).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de tensão, corrente, vazão, temperatura no painel fotovoltaico e irradiância no plano do painel foram coletados de 5 em 5 segundos, sendo que os dados armazenados eram a média de cada minuto. O restante dos parâmetros analisados: potência do painel, eficiência do sistema e potência hidráulica foram obtidos a partir de cálculos. A coleta de dados teve início em 1 de fevereiro de 2005 e ocorreu até o dia 31 de novembro de 2005.

Para a análise dos dados foram selecionados dois dias limpos, ou seja, sem a influência de nuvens, em estações do ano opostas e o mais próximo dos solstícios de inverno e verão. Os dois dias selecionados foram 3 de julho de 2005 para o solstício de inverno e 26 de novembro de 2005 para o solstício de verão. Para a análise de vazão utilizou-se todo o período de coleta de dados.

4.1 IRRADIÂNCIA SOLAR

Analizando-se os dados do dia 3 de julho de 2005, verifica-se que o início da irradiância solar ocorre às 7h25min e se estende até às 18h04min, atingindo seu valor máximo às 12h54min com um valor de 907 W.m^{-2} . Para o dia 26 de novembro de 2005, o início da irradiância solar ocorre às 6h45min e estende-se até às 18h47min, com valor máximo de 1070 W.m^{-2} às 12h28min.

Esses dados podem ser verificados na Figura 22. Por meio desse gráfico, pode-se ainda, comprovar que os dois dias analisados estão livres da influência de nuvens, provando que os dias analisados possuem céu limpo. A Figura 23 ilustra o gráfico de irradiância para um dia nublado, para este caso, foi utilizado o dia 13 de março de 2007.

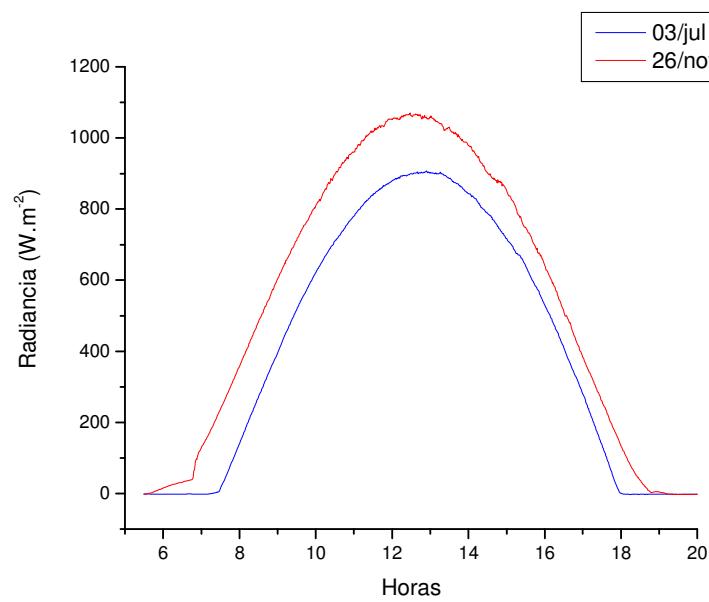


Figura 22 - Irradiância solar no plano do painel fotovoltaico.

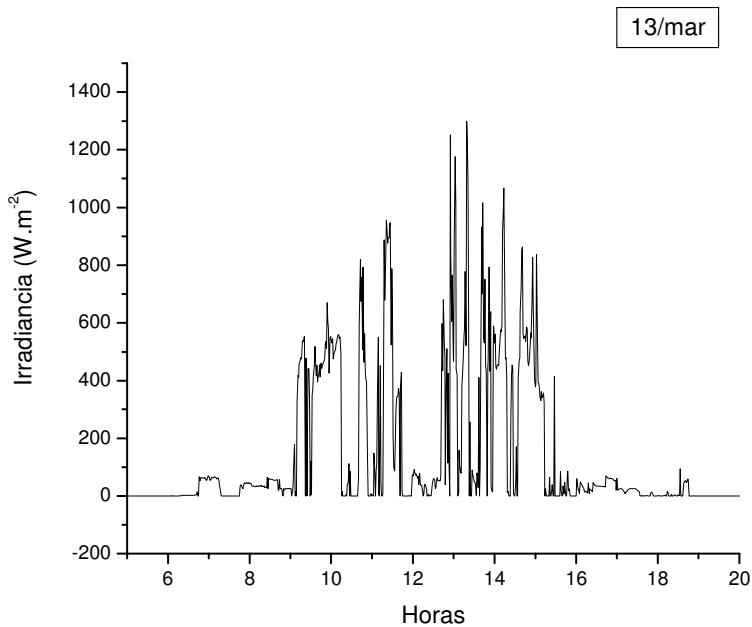


Figura 23 - Irradiância solar em um dia nublado.

4.2 CORRENTE E TENSÃO

Os valores de corrente elétrica do sistema foram obtidos com o auxílio de uma resistência *shunt*. Na Figura 24 verifica-se o seu comportamento para os dias analisados. Nota-se que, para o dia 3 de julho de 2005, o ponto de estabilização da corrente iniciou-se às 9h36min e se estendeu até às 15h53min com um valor médio de 1,60 A. Para o dia 26 de novembro de 2005, a estabilização inicia às 8h42min e se estende até às 16h13min com valor médio de 1,56 A.

De acordo com METWALLY e ANIS (1996), que avaliaram um sistema constituído por um painel fotovoltaico, um motor de corrente contínua e uma bomba centrífuga, a corrente estabilizou com um valor de 1,56 A e com uma irradiância solar de 350 W.m^{-2} .

Para o dia 3 de julho, considerando-se o horário de início de estabilização e observando-se a Figura 22, verifica-se que a estabilização da corrente inicia-se com o valor de irradiância solar de $541,4 \text{ W.m}^{-2}$. Para o dia 26 de novembro esse valor é de 530 W.m^{-2} .

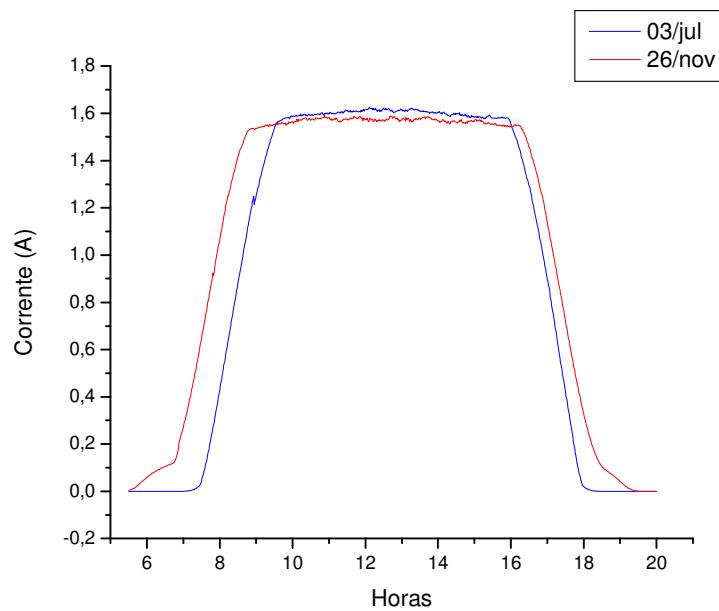


Figura 24 - Corrente do sistema para dois dias de céu limpo no solstício de inverno e de verão.

A tensão, assim como a corrente, possui um ponto de estabilização que, para o dia 3 de julho de 2005, teve início às 10h00min e seu término ocorreu às 15h33min com valor médio de 33,32 V e temperatura média de 47,12 °C. Para o dia 26 de novembro de 2005, o início da estabilização ocorreu às 9h11min e se estendeu até às 16h06min com valor médio de 32,62 V e temperatura média de 54,29 °C, como se verifica na Figura 25. A irradiância solar encontrada para o início da estabilização da tensão para o dia 3 de julho é de 621,6 W.m⁻² e para o dia 26 de novembro é de 648,5 W.m⁻².

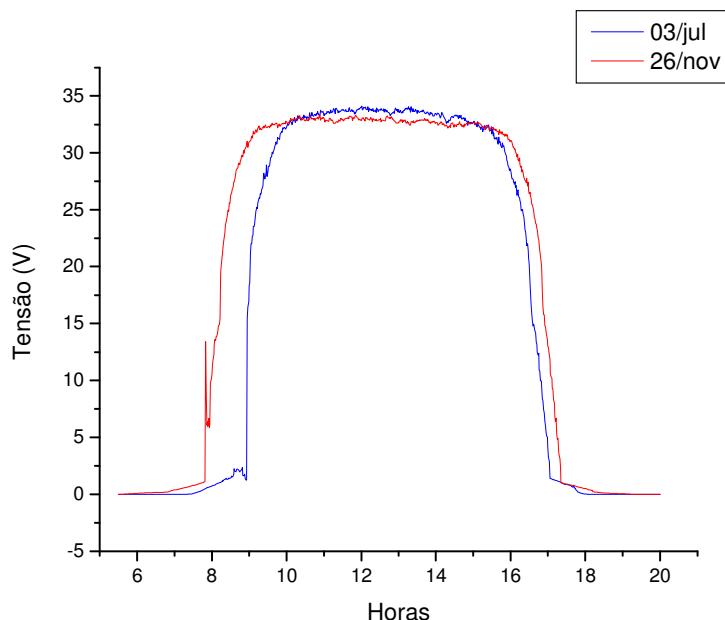


Figura 25 - Tensão do sistema para dois dias de céu limpo nos solstícios de inverno e verão.

4.3 POTÊNCIA

Para a obtenção da potência, foi realizada a multiplicação da corrente pela tensão, assim, o seu comportamento não se distingue de forma abrupta dos itens tensão e corrente.

Para o dia 3 de julho de 2005, o ponto de estabilização da potência ocorreu às 10h07min e se estendeu até às 15h40min, com valor médio de

53,32 W. Para o dia 26 de novembro de 2005, o ponto de estabilização teve início às 9h07min e término às 15h45min, com valor médio de 51,29 W. O comportamento da potência pode ser verificado na Figura 26.

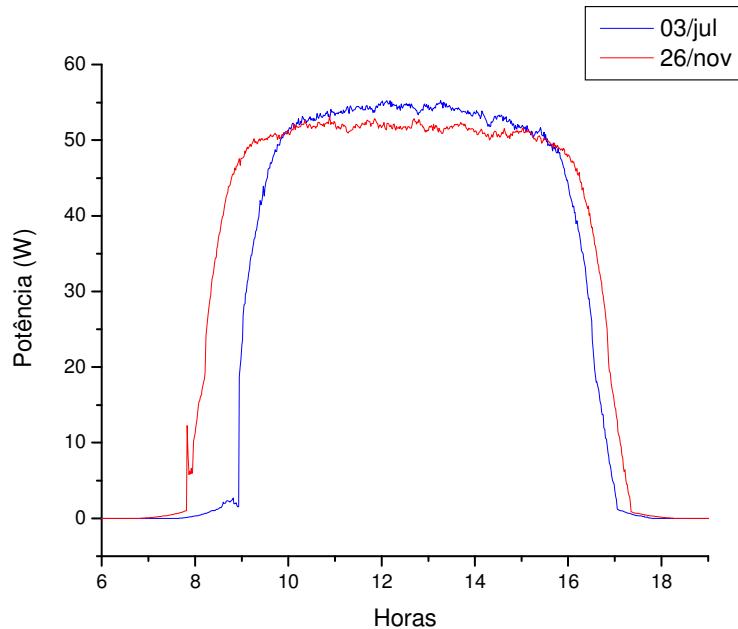


Figura 26 - Potência do sistema para dois dias limpos no solstício de inverno e de verão.

4.4 VAZÃO

Analizando-se os valores da vazão pela Figura 27, verifica-se que, para o dia 3 de julho de 2005, o sistema inicia o bombeamento às 8h57min e atinge sua estabilização às 9h51min, estendendo-se até às 15h47min. Durante o período de estabilização, a média da vazão foi de $4,64 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. O final do bombeamento ocorre às 17h02min. Para o dia 26 de novembro de 2005, o sistema entra em funcionamento às 7h50min, o período de estabilização tem início às 9h11min e se estende até às 15h53min. Durante esse período a média de vazão foi de $4,59 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. O final do bombeamento ocorre às 17h20min.

A quantidade de água bombeada pelo sistema, para o dia 3 de julho, foi de 2.056,44 litros e mesmo o dia 26 de novembro, apresentando uma média de bombeamento de água menor, durante a estabilização, no final, apresentou um total de água bombeada de 2.377,21 litros, isso está atrelado a maior quantidade de horas de insolação para os dias de verão, resultando em um maior tempo de funcionamento do sistema.

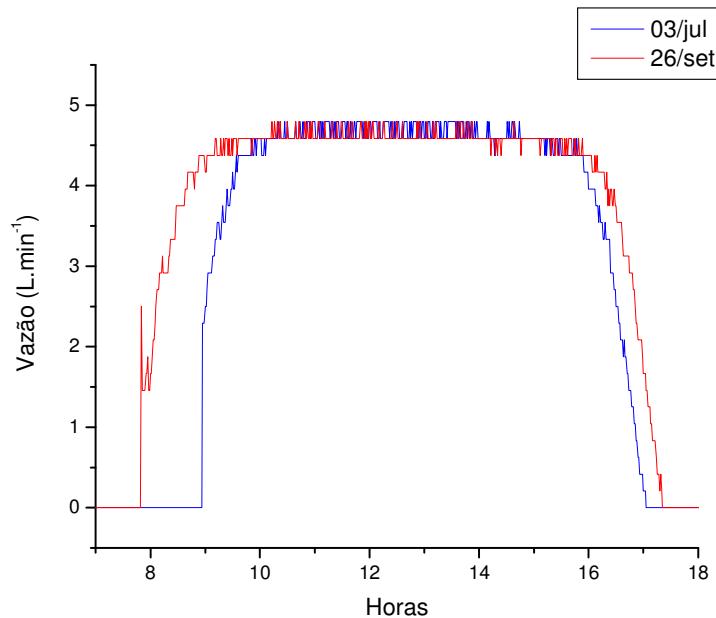


Figura 27 - Vazão do sistema para dois dias de céu limpo no solstício de inverno e de verão.

Na Figura 28 pode-se observar o total de água bombeada para cada mês, entre fevereiro e novembro de 2005. Nota-se que, no verão a quantidade de água bombeada pelo sistema é maior que nos meses de inverno. Esse resultado se deve ao total de insolação existente nos meses de verão, os meses de julho e agosto se mostram com alta quantidade de água bombeada, mesmo possuindo dias mais curtos. Isto está atrelado à quantidade de chuva, que é reduzido nesses meses. O mês que apresentou a maior quantidade de água bombeada foi novembro com 53.053,51 litros e o mês que apresentou a menor quantidade foi junho com 32.439,59 litros.

Na Figura 29 é apresentada a média de água bombeada em cada mês, nos períodos de fevereiro a novembro de 2005. O comportamento da média

quando comparado com o total de água bombeada é semelhante. Os meses que apresentaram melhores médias foram fevereiro e novembro de 2005 e a quantidade total foi de 435.042,20 litros de água.

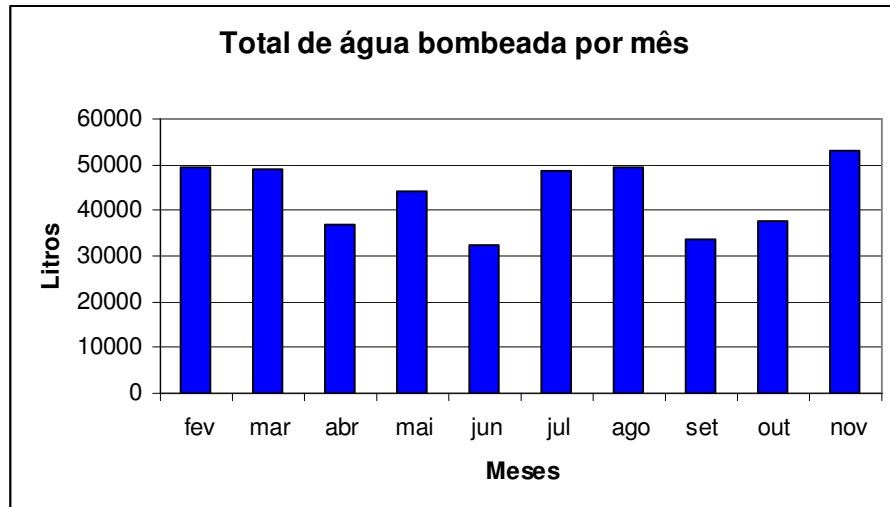


Figura 28 - Vazão total de água bombeada por mês pelo sistema.

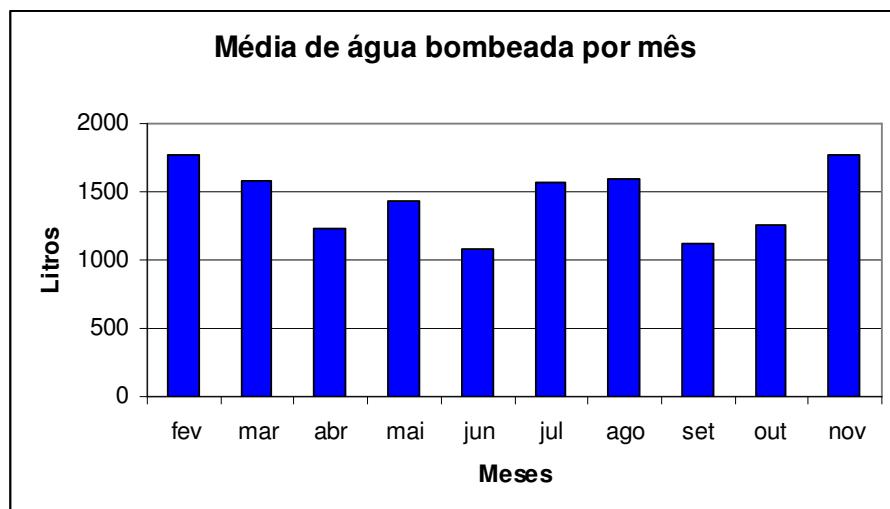


Figura 29 - Vazão média de água bombeada por mês pelo sistema.

4.5 POTÊNCIA HIDRÁULICA

A potência hidráulica, obtida pelos dados de vazão e altura manométrica (20 metros) apresenta um valor máximo de 15,66 W no ponto de estabilização, tanto para o dia 3 de julho de 2005 quanto para 26 de novembro de 2005. O que distingue em valores as duas datas é o período de estabilização, que, para o dia 3 de julho tem início às 9h39min e se estende até às 15h47min e, para o dia 26 de novembro, o ponto de estabilização da potência hidráulica tem início às 8h53min e o seu final ocorre às 16h09min. Essas afirmações podem ser verificadas na Figura 30.

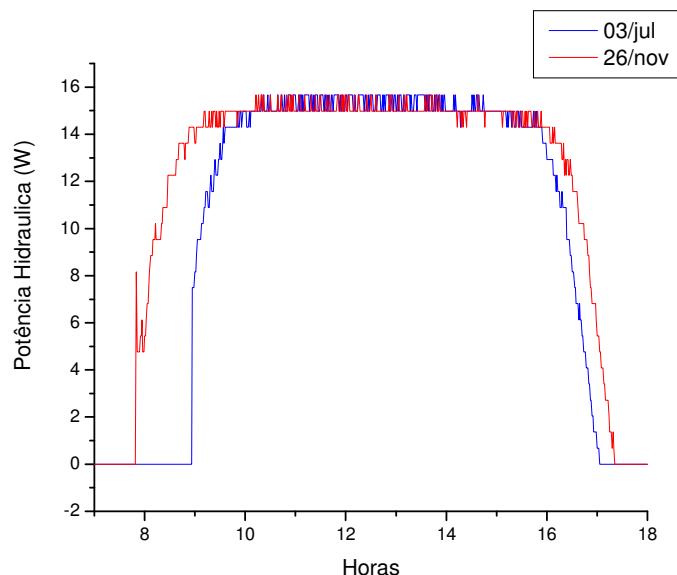


Figura 30 - Potência hidráulica para dois dias de céu limpo no solstício de inverno e de verão.

4.6 TEMPERATURA DO PAINEL FOTOVOLTAICO

A temperatura máxima para o dia 3 de julho de 2005 foi de 51,16 °C e atingiu esse valor às 14h19mn. Para o dia 26 de novembro de 2005, a temperatura máxima encontrada foi de 59,89 °C às 13h19min, como pode ser observado na Figura 31.

O fator temperatura influência na potência e consequentemente na eficiência do sistema. Segundo GNOATTO *et al.* (2004, p. 02), “Um módulo fotovoltaico não é fonte linear de potência, depende da temperatura e do nível de radiação”. Completando a informação acima tem-se GOETZBERGER *et al.* (1998) citados por RIFFEL (2005, p. 12), os quais descrevem que “A temperatura faz com que a banda de energia do material semicondutor diminua, resultando em um acréscimo da fotocorrente gerada de aproximadamente 1%”. Entretanto, a tensão de circuito aberto decresce a uma taxa de 0,3%, fazendo que a potência diminua em 1% a cada 2,7 °C de elevação de temperatura.

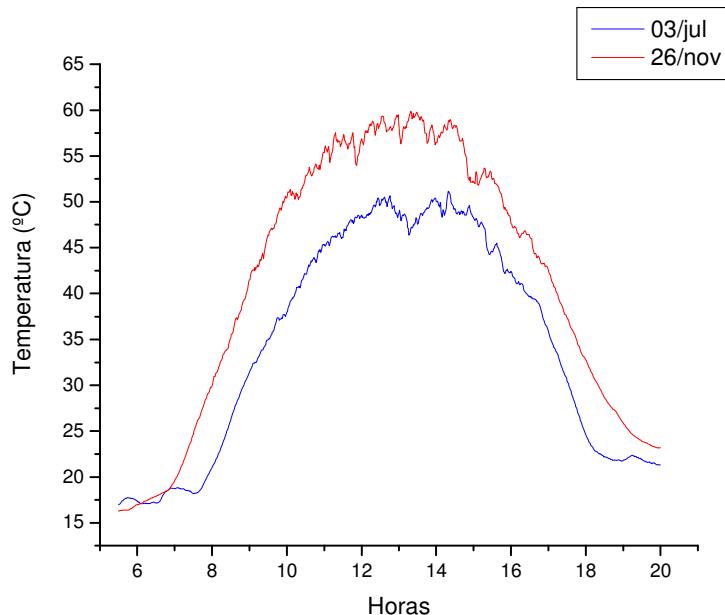


Figura 31 - Temperatura no painel fotovoltaico.

4.7 EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADO POR PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os valores da eficiência do sistema são encontrados pela divisão da potência e pela multiplicação da irradiância e da área útil do painel fotovoltaico, cujo valor é de 0,90288 m² (Equação 2).

Analizando-se os dados da eficiência para o dia 3 de julho de 2005, encontra-se um pico máximo durante o período da manhã com um valor de 9,58% às 9h34min. A partir desse momento, o valor de irradiância aumenta, diminuindo a eficiência. Esse fenômeno ocorre, pois o painel fotovoltaico já está saturado, ou seja, a partir de aproximadamente 533 W.m⁻² de irradiância o painel fotovoltaico não aumenta a conversão e o excesso de irradiância é dado como perda. No período da tarde, quando a irradiância está decrescendo, a eficiência apresenta outro aumento e, no seu pico máximo, apresenta o valor de 9,34% às 15h47min.

Para o dia 26 de novembro de 2005, o pico máximo encontrado no período da manhã foi de 9,07% às 8h43min e no período da tarde o valor máximo encontrado foi de 8,57% às 16h28min. O fator que atribui uma eficiência maior ao dia 3 de julho, se comparado ao dia 26 de novembro é a temperatura, mesmo fator que faz o pico da manhã apresentar um valor maior que o da tarde, como pode ser verificado na Tabela 3. Esse fenômeno é explicado por GOETZBERGER (1998), citado por RIFFEL (2005). Na Figura 32 pode-se verificar essas afirmações.

Tabela 3 - Comportamento da eficiência do sistema em diferentes períodos

Dia	Período	Eficiência (%)	Temperatura (°C)
03/07/2005	Manhã	9,58	35,34
	Tarde	9,34	42,83
16/11/2005	Manhã	9,07	37,69
	Tarde	8,57	46,44

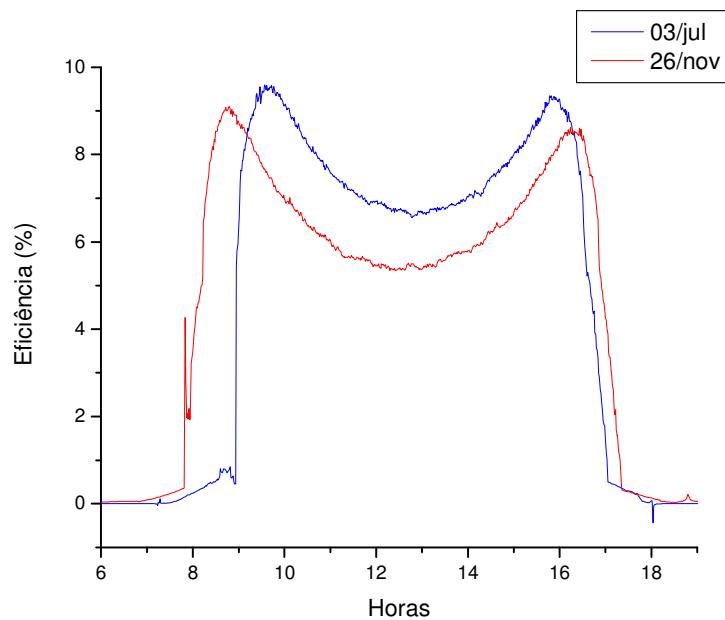


Figura 32 - Eficiência do sistema de bombeamento de água.

4.8 RETA DE OPERAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO, TRABALHANDO EM SITUAÇÃO REAL DE FUNCIONAMENTO.

A reta de operação da bomba foi plotada junto à curva do painel fotovoltaico. A curva do painel foi obtida do estudo de KAWAHARA (2003) e com base nesses dados foi plotada a reta de operação. Para isso foram selecionados os dados de tensão e corrente dos dias de céu limpo obtidos no experimento, relacionado-os aos valores de irradiância solar de 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 W.m⁻² com 5% de significância. Na Figura 33 pode-se visualizar a reta de operação da bomba com r^2 de 0,96696.

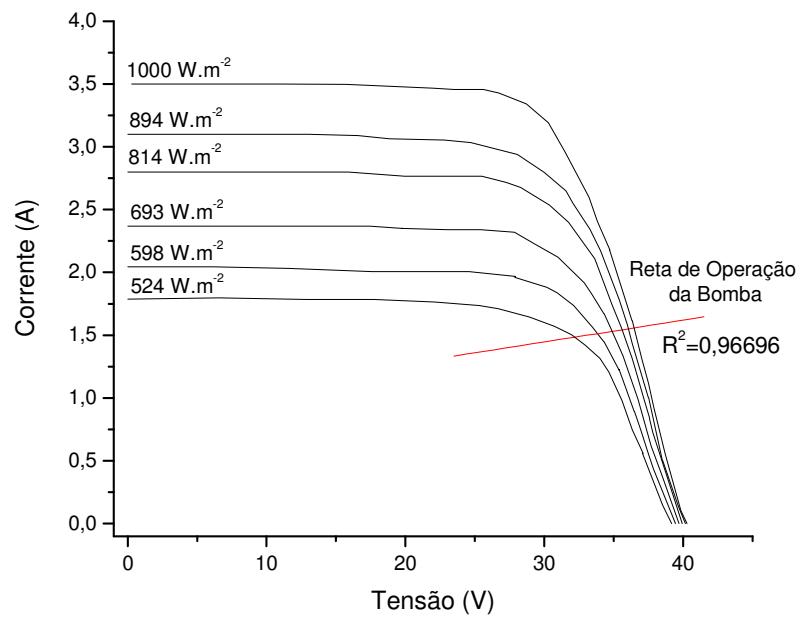


Figura 33 - Curva do painel com a reta de operação da bomba.

5 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados obtidos no experimento é possível concluir que:

- A corrente possui um ponto de estabilização que é atingida com um valor de irradiância de $541,5 \text{ W.m}^{-2}$ e os valores de corrente encontrados são 1,60 A para o solstício de inverno e 1,56 A para o solstício de verão;
- O valor de irradiância solar necessário para atingir a estabilização da tensão é de $648,5 \text{ W.m}^{-2}$ e os valores médios de tensão para esta região são de 33,32 V para o solstício de inverno e 32,62 V para o solstício de verão;
- A potência, assim como a corrente e a tensão, possui o ponto de estabilização com valores médios de 53,32 W para o solstício de inverno e 51,29 W para o solstício de verão;
- A vazão apresenta uma média de $4,64 \text{ L.min}^{-1}$ para o solstício de inverno, apresentando uma vazão diária de 2.056,44 litros de água bombeada para o dia 3 de julho de 2005 e vazão média de $4,59 \text{ L.min}^{-1}$ no solstício de verão e total de 2.377,21 litros de água bombeada para o dia 26 de novembro de 2005.
- O mês que apresentou a maior quantidade de água bombeada foi novembro com o valor de 53.053,51 litros; julho foi o mês com o menor bombeamento com valor de 32.439,59 litros; isso associado ao maior tempo de insolação solar para os dias de verão se comparado aos dias de inverno;
- O total de água bombeada entre os meses de fevereiro e novembro de 2005 foi de 435.042,20 litros;
- A temperatura máxima atingida pelo painel fotovoltaico no solstício de inverno foi de $51,16^{\circ}\text{C}$; no solstício de verão o valor máximo foi de $59,89^{\circ}\text{C}$;

- A temperatura influencia negativamente a potência e consequentemente na eficiência do sistema;
- A irradiância solar para os dias de inverno pode atingir um valor máximo de 907 W.m^{-2} e para os dias de verão atingem um valor de 1070 W.m^{-2} ;
- O valor de irradiância solar ideal para o funcionamento do sistema é de 533 W.m^{-2} ;
- Para o dia 3 de julho de 2005 a eficiência máxima atingida no período da manhã foi de 9,58% e no período da tarde de 9,34%; para o dia 26 de novembro de 2005 o valor da eficiência para o período da manhã foi de 9,07% e no período da tarde o valor foi de 8,57%;
- A temperatura é o fator que faz com que a eficiência no período da manhã seja maior que no período da tarde.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 2 ed. Brasília: ANEEL, 2005. p. 77.

ALMEIDA, S. C. A.; CLUA. E. W. G. **Perspectivas do uso da biomassa para geração descentralizada de energia no Mercosul.** Trabalho submetido ao Premio Mercosul de Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, RJ: COPPE/UFRJ, 2005. p. 4.

AONDEFICA. **Latitudes e longitudes de cidades e vilas no estado do Paraná.** Disponível em: www.aondefica.com/lat_long_est_r.asp. Acesso em: 7 de maio de 2006.

BAKTHAVATSALAM, V.; HART, T. J.; PARTHAN, B., The Indian solar pumping experience and commercialization initiatives. INTERSOCIETY ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE, 32., 1997. Honolulu, Hawaii, **Proceedings of the 32nd Intersociety.** Honolulu, Hawaii: IECEC, 1997. v. 3, p. 1930.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional, 2004,** Brasília: Secretaria de Energia, 2005. p. 71.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano decenal de expansão.** Brasília: Secretaria de Energia, 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Estudo do potencial da geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil.** Brasília: Secretaria de Energia, 2004. p. 1.

CAMUS, C.; EUSÉBIO, E. **Gestão de energia:** energia solar. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação, 2006.

CARDONA, M. S.; LÓPEZ, M. L. Performance analysis of a grid-connected photovoltaic system. **Energy**, New York, v. 24, p. 93-102, 1999.

CARVALHO, F. G.; JABLONSKI, A. Estudo das partículas totais em suspensão e metais associados a áreas urbanas. **Química Nova**, Piracicaba, SP, v. 23, n. 5. p. 614. 2000.

CARVALHO, P. Água potável via energia solar. **Ciência Hoje.** v. 27, n. 128, p. 72, 2000.

COM CIÊNCIA – Revista Eletrônica de Jornalismo Científico: **Usinas de energia impactam meio ambiente.** Disponível em: <http://www.comciencia.br/reportagens/energiaeletrica/energia07.htm>. Acesso em: 21 de julho de 2006.

COMETTA, E. **Energia solar:** utilização e empregos práticos. Hemus: São Paulo, 1978. p. 20-30.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução n. 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acessado em: 9 de junho de 2007.

COSTA, H. S.; COSTA, R. A.; ECK, M. Análise econômica comparativa da eletrificação rural comercial e fotovoltaica. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, SP, n. 315. p. 4, junho 2000.

COSTA, H. S.; ECK, M.; SILVA, G. F. Sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos residenciais a experiência do NADER no semi-árido. **Ciência e Engenharia**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, v. 2 n. 2, p.110, 2º Semestre de 1998.

DINIZ, D. J. C. **Contribuição da tecnologia digital no estudo da insolação nas edificações.** 2002. 58 f. Dissertação (Especialização em Geoprocessamento) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG. 1997

FAO Y CONSEJO MUNDIAL DE LA ENERGIA. **Mayor prioridad a los problemas de energía en las zonas rurales.** Disponível em: http://www.fao.org/WAI/CENT/OIS/PRESS_NE/PRESSPA/2000/prsp0001.htm. Acesso em: 10 de janeiro de 2006.

FEDRIZZI, M.C., **Fornecimento de água com sistema de bombeamento fotovoltaico.** 1997. 150 f. Dissertação (Mestrado em Interunidades em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo/SP. 1997.

GNOATTO, E. **Desempenho de painel fotovoltaico para geração de energia elétrica na região de Cascavel.** 2003. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, 2003.

GNOATTO, E., FERRUZZI, Y., RICIERI, R.P., JUNIOR, M.M. OLIVEIRA, T.E. Desempenho de painel fotovoltaico em um sistema isolado. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUIDORA, 5 AGRENER, 2004. Campinas. **Anais...** Campinas/SP: UNICAMP, 2004.

GNOATTO, E.; DALLACORT, R.; RICIERI, R. P.; SILVA, S. L.; FERUZZI, Y. Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho. **Acta Scientiarum**, Maringá/PR, v. 27, n. 2, p. 192, 2005.

GRIGOLETO, M. W. **Comportamento do potencial de energia solar na região de Cascavel/PR**. 2001. 46 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, 2001.

GXASHEKA, A. R.; VAN DYK, E. E.; MEYER, E. L. Evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors. **Renewable Energy**. Amsterdam, Netherlands, n. 30, p. 614, 2005.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Vancouver, Canada: Academic Press, 1983.

KAWAHARA, J., **Desempenho de uma motobomba acionada por um painel fotovoltaico**. 2003. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel/PR, 2003.

MAGALHÃES ROSA, D. J. **Caracterização da radiação solar: o caso da Cidade Universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéia**. 2003. 162 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2003.

MARAFIA, H. A., Feasibility study of photovoltaic technology in Qatar. **Renewable Energy**. Amsterdam, Netherlands, v. 24, p. 567, 2001.

MARINI, J. A. ROSSI, L. A. Sistematização do dimensionamento técnico e econômico de sistemas fotovoltaicos isolados por meio de programa computacional. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal/SP, v. 25, n. 1, p 67. 2005.

METWALLY, H. M. B., ANIS, W. R. Dynamic performance of directly coupled photovoltaic water pumping system using D.C. shunt motor. **Energy Convers and Management**. Cambridge, USA, v. 37. p. 1411, 1996.

MIGUEL, A.; BILBAO, J.; CAZORRO, J. R. S.; MARTÍN, C. **Performance analysis of a grid connected pv system in a rural site in the northwest of Spain**. Disponível em: <http://www3.uva.es/renova/esp/congresocolonia.pdf>, Acesso em: 18 de janeiro de 2006.

MOHANLAL KOLHE, J. C. J.; KOTHARI, D. P. Performance analysis of a directly coupled photovoltaic water-pumping system. **Transaction on Energy Conversion**, Cambridge, USA, v. 19, n. 3, p. 618 2004.

NISHIMARU, R. S. **Opções energéticas de pico-geração na RDS Mamirauá**. 2005. 176 f. Monografia (Engenharia de Energia e Automação Elétrica) Universidade de São Paulo. São Paulo/SP. 2003.

OLIVEIRA, S. H. F. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos:** ênfase na eletrificação de residências de baixo consumo. 1997. 240 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 1997.

OSHIYAMA, N. F.; VILELA, T. M.; LENÇONI, T. E.; SALARO, V.G. Análise da viabilidade de implantação de energia eólica na Faculdade de Engenharia Elétrica (FEEC), UNICAMP. **Revista Ciência do Ambiente On-Line.** Campinas/SP. v. 1, n. 1, p. 35. 2005.

PALZ, P. C., **Energia solar e fontes alternativas.** Hemus: São Paulo/SP. 1995.

PALZ, W. **Energia solar.** Hemus: São Paulo/SP. 1981.

RIFFEL, D. B. **Unidade de osmose reversa acionada por energia solar fotovoltaica sem baterias:** simulação, projeto e validação experimental. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza/CE. 2005. p 12.

SARRUF, G. A.; PIGA, L. P. R. Viabilidade da energia solar na UNICAMP. **Revista Ciência do Ambiente On-Line**, Campinas/SP. v. 2, n. 2, p. 69, 2006.

SERPA, P. M. N. **Eletrificação fotovoltaica em comunidades caiçaras e seus impactos sócioculturais.** 2001. 252 f. São Paulo/SP. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo. 2001.

SHRESTHA, J. N. Solar PV water pumping system for rural development in Nepal: problems and prospects. INTERSOCIETY ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE, 31, 1996. Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C: IECEC, 1996. v. 3, p. 1659.

SILVA, C. D. Potência gerada e eficiência dos módulos fotovoltaicos em função da radiação global incidente para bombeamento de água. SEMINÁRIO DE ENERGIA NA AGRICULTURA. Fazenda Energética, 2000, Uberaba/MG. **Anais...** Uberaba/MG: Fazenda Energética, 2000. p. 97.

SILVA, S. R.; CARDOSO FILHO, B. J. O estado da arte em fontes de energia alternativa; **Planilha**, Belo Horizonte; v. 1; p. 7-10, 1999.

SPENSE, M. **Energia Solar.** Melhoramentos: São Paulo/SP. 2002.

SUNTECHNICS. **Funcionamento dos sistemas fotovoltaicos.** Disponível em: http://www.suntechnics.com/pt/photovoltaik_4tg.htm. Acesso em: 25 de julho de 2006.

TREBLE, F. C. Photovoltaic systems. WORKSHOP ON MATERIALS SCIENCE AND PHYSICS OF NON-CONVENTIONAL ENERGY SOURCES. 1993, United Kingdom. **Proceedings...** United Kingdom: ICTP, 1993. p. 1.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP. Escola do futuro. Laboratório de Ensino de Ciências e Tecnologia - LECT. **Calculadora solar.** Disponível em: www.darwin.futuro.usp.br/site/sky/atividades/c_calculadora.htm. Acesso em: 7 de maio de 2006.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP. **Um breve histórico do uso da energia solar.** Disponível em <http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo6A/Histsol.htm>. Acesso em: 16 de janeiro de 2006.