MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DUAS BOMBAS ACOPLADAS DIRETAMENTE A GERADORES FOTOVOLTAICOS

por

Marco Antônio Steigleder

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, agosto de 2006

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE DUAS BOMBAS
ACOPLADAS DIRETAMENTE A GERADORES FOTOVOLTAICOS

por

Marco Antônio Steigleder
Engenheiro Operacional Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia
Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger
Co-orientador: Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alexandre Beluco

Prof. Dr. João Carlos Vernetti dos Santos

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 04 de agosto de 2006

Dedico esse trabalho à minha amada esposa Margared e aos meus queridos filhos Daniel Henrique e Ana Paula, que são a justificativa para o meu empenho, e também à minha mãe Rosalina e ao meu saudoso pai Romeo, pela importância que sempre deram à minha educação.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, por tudo que tem feito por minha família e por mim.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - PROMEC, pela oportunidade de realizar esse trabalho e à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, que o apoiou.

Aos colegas professores MS Sílvia Costa Dutra, Doutor Leandro Dalla Zen e MS Jerzy Pawlowski, que me recomendaram junto ao PROMEC.

Aos professores Doutores Arno Krenzinger e Mário Henrique Macagnan, pela paciente orientação e pronta ajuda nos momentos necessários.

Ao engenheiro MS César Wilhem Massen Prieb, funcionário do Laboratório de Energia Solar da UFRGS, pelo auxílio técnico prestado.

Ao colega Doutor Daniel Sampaio Figueira (em memória), pela colaboração e incentivo.

Aos engenheiros Diogo Alberto Borges e Flávio Roberto Andara que, quando funcionários da UNISINOS, ajudaram na construção da bancada de testes e na manutenção dos instrumentos e equipamentos nela usados.

Ao secretário do PROMEC, Paulo Kutter e às funcionárias Gracinda de Jesus Gonçalves e Elen Flores, pela disponibilidade e atenção.

Ao amigo engenheiro MS Luis Horácio Vera, pelo desprendimento, disponibilidade, paciência, colaboração e incentivo.

Finalmente, desejo agradecer a todos que de uma ou de outra forma cooperaram para a conclusão desse trabalho.

“Feliz do homem que encontrou a sabedoria, é uma árvore de vida para aqueles que lançarem mão dela... quem a ela se apega é um homem feliz.[Provérbios 3,13;18]

RESUMO

No Brasil, assim como em outros países que recebem abundantes quantidades de radiação solar durante todo o ano, há um grande potencial para os sistemas que usam a tecnologia fotovoltaica para promover o bombeamento de água. Entretanto, a escolha dos conjuntos de motores e bombas mais adequados para cada situação passa pela análise do desempenho dos sistemas de bombeamento. Portanto, devem ser analisadas tanto as melhores configurações de geradores fotovoltaicos destinados a operar os conjuntos formados pelos motores e bombas, quanto às eficiências das bombas e da conversão fotovoltaica.

Nesse trabalho são apresentadas medidas e comparações do desempenho de dois sistemas de bombeamento diretamente acoplados a geradores fotovoltaicos. Para tanto, foi construída uma bancada destinada a realizar uma série de experimentos. Um dos sistemas usou uma bomba centrífuga acoplada a um gerador fotovoltaico formado por três módulos fotovoltaicos. O outro, utilizou uma bomba volumétrica de diafragma acoplada a um único módulo fotovoltaico. Os experimentos foram conduzidos em duas etapas distintas. A primeira foi feita com os motores acoplados a uma fonte de potência em corrente contínua e serviu para a determinação das curvas de desempenho de cada uma das bombas, das curvas dos sistemas, assim como das curvas de corrente (I) e de tensão (V) de cada um dos motores que acionavam as bombas. A segunda foi realizada com os sistemas acoplados diretamente aos geradores fotovoltaicos.

A determinação da configuração dos geradores fotovoltaicos destinados a acionar os diferentes sistemas de bombeamento em análise nesse trabalho foi feita por meio da sobreposição das curvas de corrente e tensão dos motores e dos módulos fotovoltaicos.

A parte experimental, estando os sistemas acoplados aos geradores, constou de medidas realizadas em intervalos de tempo de cinco segundos, para cada bomba e em várias alturas, das seguintes variáveis: temperatura ambiente, irradiância, temperatura dos módulos, corrente e tensão do motor, rotação do motor, temperatura da água, diferencial de pressão entre entrada e saída da bomba e vazão. As diversas alturas foram simuladas por meio da abertura e/ou fechamento de uma válvula de controle de vazão colocada na extremidade tubulação de descarga, operada manualmente.

Os procedimentos adotados nessa dissertação permitiram caracterizar os sistemas de bombeamento propostos, assim como determinar quais os arranjos mais adequados para operar cada sistema. Verificou-se que o melhor arranjo para operar o conjunto motor e bomba centrífuga foi aquele formado por três módulos fotovoltaicos ligados em paralelo, enquanto que a melhor opção para operar o conjunto motor e bomba de diafragma foi com somente um módulo fotovoltaico.

De posse dos dados medidos foi possível determinar as eficiências: instantâneas, máximas instantâneas e diárias da conversão fotovoltaica assim como dos conjuntos motores e bombas, em diferentes alturas. Relativamente à conversão fotovoltaica, verificou-se que o conjunto motor e bomba centrífuga operou com eficiência instantânea máxima de 5,74% e eficiência diária de 4,70%, enquanto que o conjunto motor e bomba volumétrica de diafragma operou com eficiência instantânea máxima de 7,66% e eficiência diária de 5,82%. Relativamente à eficiência dos conjuntos motores e bombas, verificou-se que o conjunto motor e bomba centrífuga operou com eficiência instantânea máxima de 19,19% e eficiência diária de 16,79%, enquanto que o conjunto motor e bomba volumétrica de diafragma operou com eficiência instantânea máxima de 38,88% e eficiência diária de 34,30%. Verificou-se ainda que a altura foi determinante na eficiência do conjunto motor e bomba centrífuga e pouco influenciou na eficiência do conjunto motor e bomba de diafragma.

Além dessas, outras considerações sobre o comportamento dos sistemas de bombeamento ao longo de um dia também foram ser registrados, tais como: limiares de irradiância para início e final de vazão, correntes de pico ou de arranque dos motores e correntes de início de vazão ou escoamento.

ABSTRACT

PERFORMANCE COMPARISON OF TWO PUMPS DIRECTCLY COUPLED TO PHOTOVOLTAIC GENERATORS

In Brazil as well as in other countries which receive a great amount of solar radiation during all year long there is a great potential for the systems which use the photovoltaic technology for water pumping. However, the performance of the motors and pumps should be accordingly analyzed for each situation. Therefore, should be analyzed the best configurations of photovoltaic arrays which will be used to drive the motors and pumps as well as the efficiency of the pumps and of the photovoltaic conversion.

This work shows the measurements made during the experiences and compares the performance of two water pumping systems directly coupled to the photovoltaic arrays. A laboratory test facility was built to evaluate the photovoltaic pumping systems. One of the systems used a centrifugal pump directly coupled to an array assembled with three photovoltaic modules. The other system used a volumetric diaphragm pump directly coupled to an only one photovoltaic module. The experiences were made in two stages. On the first stage the motors and pump were coupled to a DC power source. In this stage all the experiments and data were used to evaluate the characteristic performance of the pumps as well as their current and voltage performances. On the second stage the motors and pumps were directly coupled to the photovoltaic arrays.

The determination of the best array to be used to drive the different sets of motors and pumps were made by superimposing the current and voltage curves of the motors to the current and voltage curves of the photovoltaic arrays.

The following measurements of the variables were made with the motors and pumps directly coupled to the photovoltaic arrays: weather temperature, solar radiation, cell and module temperature, current and voltage of the motors, velocity of the motors in rpm, water temperature, pressure differential between entrance and exit of the pump and water flow. All the experiences were made for several pump heads and the measurements were made at each five seconds. The several pump heads were simulated by a control valve manually operated.

The procedures adopted in that work allowed characterizing the proposed pumping systems, as well as determining which the arrays more adapted to operate each system. It was verified that the best array to operate the motor and centrifugal pump set was that formed by three photovoltaic modules connected in parallel, while the best option to operate the motor and diaphragm pump set was with only a photovoltaic module.

With all the measured data was possible to determinate the instantaneous efficiency, the maximum instantaneous efficiency and the daily efficiency of the photovoltaic conversion as well as of the motors and pumps sets. Relatively to the photovoltaic conversion, it was verified that motor and centrifugal pump set operated with a maximum instantaneous efficiency of 5,74% and a daily efficiency of 4,70%, while motor and volumetric diaphragm pump operated with a maximum instantaneous efficiency of 7,66% and a daily efficiency of 5,82%. Relatively to the efficiency of motors and pumps sets, it was verified that the motor and centrifugal pump set operated with a maximum instantaneous efficiency of 19,19% and a daily efficiency of 16,79%, while the group motor and bomb diaphragm volumetric operated with a maximum instantaneous efficiency of 38,88 % and a daily efficiency of 34,30%. It was also verified that the head pumping is strongly decisive in the efficiency of motor and centrifugal pump set and little influenced in the efficiency of motor and volumetric diaphragm pump set.

A series of considerations about the behavior of the pumping systems along the day could also be registered, such as: irradiance threshold for the beginning and flow stop, peak current of the motors and current for the beginning of flow.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Aspectos Gerais 1
1.2 Objetos em estudo nesse trabalho 4
1.3 Objetivos 5
1.4 Escopo do trabalho 6

2 ENERGIA SOLAR 8

1.1 Aspectos Gerais 8
1.2 O Sol 9
1.3 Radiação Solar e Espectro Eletromagnético 10
1.4 Radiação Solar Extraterrestre e Constante Solar 11
1.5 Atenuação da Radiação Solar e Radiação Solar na Superfície Terrestre 12

3 DISPOSITIVOS USADOS EM BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO DE ACOPLAMENTO DIRETO 14

3.1 Aspectos Gerais 14
3.2 A célula fotovoltaica 14
3.2.1 Funcionamento simplificado de uma célula fotovoltaica 16
3.2.2 Curvas características da célula solar 18
3.2.3 Fator de forma ou de preenchimento de uma célula solar fotovoltaica 19
3.3 Módulos Fotovoltaicos 19
3.4 Arranjos fotovoltaicos 24
3.5 Sistemas de bombeamento 29
3.6 Bombas 30
i. Bombas Centrífugas 30
ii. Bombas Volumétricas de Diafragma 32
iii. Características operacionais das bombas estudadas 33
3.7 Acoplamentos 38

4 ABORDAGEM EXPERIMENTAL 42

4.1 Equipamentos e acessórios utilizados nos ensaios 43

4.1.1 Gerador fotovoltaico ... 44
4.1.2 Circuito hidráulico ... 45
4.1.3 Circuito elétrico ... 48
4.1.4 Conjunto motor e bomba centrífuga ... 49
4.1.4.1 Motor ... 49
4.1.4.2 Bomba centrífuga ... 49
4.1.5 Conjunto motor e bomba de diafragma ... 50
4.1.6 Medidor de vazão ... 52
4.1.7 Medidor de diferencial de pressão ... 53
4.1.8 Medidor de radiação solar ... 54
4.1.9 Medidas de tensão e corrente ... 55
4.1.10 Medidor de rotação do motor ... 55
4.1.11 Medidores de temperatura dos módulos, do ambiente e da água ... 55
4.1.12 Sistema de aquisição de dados ... 56
4.1.13 Fonte de potência ... 57
4.1.14 Microcomputador ... 57
4.2 Caracterização das bombas ... 59
4.2.1 Teste de desempenho ... 60
4.2.1.1 Procedimentos antes do teste ... 60
4.2.1.2 Procedimentos durante o teste ... 60
4.2.1.3 Procedimentos após o teste ... 60
4.2.2 Determinação da curva de altura do sistema ... 61
4.2.3 Determinação do ponto de trabalho da bomba ... 61
4.2.4 Determinação da curva de tensão e corrente ... 62
4.3 Procedimentos com as bombas acopladas aos geradores fotovoltaicos ... 62

5 ANÁLISE DOS ACOPLAMENTOS ... 64

5.1 Aspectos Gerais ... 64
5.2 Comportamento elétrico dos motores ... 67
5.3 Análise dos acoplamentos ... 70
5.3.1 Análise do acoplamento direto do arranjo fotovoltaico com o sistema de bombeamento – caso da bomba centrífuga ... 71
5.3.1.1 Escolha do arranjo mais adequado para operar a bomba centrífuga ... 75

5.3.2 Análise do acoplamento direto do arranjo fotovoltaico com o sistema de bombeamento – caso da bomba de diafragma 79
5.3.2.1 Escolha do arranjo mais adequado para operar a bomba de diafragma 81
5.4 Acoplamento das bombas com os arranjos fotovoltaicos 81
5.4.1 Acoplamento da bomba centrífuga com três módulos fotovoltaicos 82
6.1.1 Acoplamento da bomba de diafragma com um módulo fotovoltaico 83

6 ANÁLISE DOS DESEMPENHOS 84

6.1 Curva altura & vazão – H & Q 84
6.1.1 Bomba centrífuga 84
6.1.2 Bomba de diafragma 85
6.2 Curva potência & vazão – Pot & Q 88
6.2.1 Bomba centrífuga 88
6.2.2 Bomba de diafragma 89
6.3 Curvas de eficiência e vazão – η & Q 91
6.3.1 Bomba centrífuga 92
6.3.2 Bomba de diafragma 93
6.4 Curvas dos sistemas 94
6.4.1 Bomba centrífuga 94
6.4.2 Bomba de diafragma 95
6.5 Relação entre bomba e sistema 96
6.6 Curvas de corrente & tensão 98
6.7 Análise do desempenho dos módulos Siemens SP 75 99
6.8 Análise do desempenho das bombas 101

7 CONCLUSÕES 114

BIBLIOGRAFIA 118

ANEXO 1 122

ANEXO 2 123

ANEXO 3 124

ANEXO 4 125

ANEXO 5 126

ANEXO 6 127

ANEXO 7 128

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag	Área do gerador	[m^2]
E_{dgf}	Energia radiante diária recebida pelo gerador fotovoltaico	[J]
E_{ed}	Energia elétrica diária	[J]
E_{hd}	Energia hidráulica diária	[J]
FF	Fator de forma ou preenchimento	[-]
g	Aceleração da gravidade	[9,81 m/s^2]
G	Irradiância	[W/m^2]
G_{gf}	Irradiância instantânea incidente no gerador fotovoltaico	[W]
G_{SC}	Constante Solar	[W/m^2]
H	Altura	[mca]
I	Corrente elétrica	[A]
I_0	Corrente de saturação reversa	[A]
I_D	Corrente que circula pelo diodo	[A]
I_L	Corrente fotogerada	[A]
I_{MP}	Corrente no ponto de máxima potência	[A}
I_{pico}	Corrente de pico do motor	[A]
I_{SC}	Corrente de curto-circuito (short circuit)	[A]
$I_{vazão}$	Corrente de início de vazão	[A]
k	Constante de Boltzmann	[J/K]
K	Constante de proporcionalidade	[-]
L	Litro	[-]
LGf	Limiar de irradiância para o final de vazão	[W/m^2]
LGi	Limiar de irradiância para o início de vazão	[W/m^2]
LGp	Limiar de irradiância de pico	[W/m^2]
m	Massa de ar	[-]
m*	Fator de idealidade do diodo	[-]
min	Minuto	[-]
N	Rotação	[rpm]
N_m	Número de módulos do arranjo	[-]
p	Pressão	[Pa]
P_{MAX}	Potência máxima	[W]
P_{MP}	Potência no ponto de máxima potência	[W]

P_{PT}	Potência no ponto de trabalho	[W]
P_{T}	Ponto de trabalho	[-]
Pot	Potência	[W]
Pot_{e}	Potência elétrica	[W]
Pot_{gf}	Potência do gerador fotovoltaico	[W]
Pot_{h}	Potência hidráulica	[W]
Q	Vazão	[L/min], [m^3/s]
Q_{bomba}	Vazão da bomba	[L/min], [m^3/s]
$Q_{máxa}$	Vazão máxima	[L/min], [m^3/s]
$Q_{sistema}$	Vazão do sistema	[L/min], [m^3/s]
R	Resistência elétrica	[Ω]
R_{MP}	Resistência de carga de máxima potência	[Ω]
R_{P}	Resistência em paralelo	[Ω]
R_{S}	Resistência em série	[Ω]
s	Segundo	[-]
T	Temperatura do cristal	[K]
T_{CEL}	Temperatura da célula	[°C]
T_{m}	Temperatura do módulo	[°C]
V	Tensão elétrica	[V]
v	Velocidade	[m/s]
V_{MP}	Tensão no ponto de máxima potência	[V]
V_{OC}	Tensão de circuito-aberto (open circuit)	[V]
V_{pico}	Tensão de pico do motor	[V]
$V_{vazão}$	Tensão de início de vazão	[V]
Vol	Volume	[m^3]
Z	Altura em relação a um plano de referência	[m]

LETRAS GREGAS

γ	Peso específico	[N/m^3]
η	Eficiência	[decimal] ou [percentual]
$\eta_{acoplamento}$	Eficiência do acoplamento	[decimal] ou [percentual]
η_{ehd}	Eficiência energética hidráulica diária	[decimal] ou [percentual]
η_{fv}	Eficiência instantânea da conversão fotovoltaica	[decimal] ou [percentual]
$\eta_{fv\ diária}$	Eficiência diária da conversão fotovoltaica	[decimal] ou [percentual]

θ_Z	Ângulo de zênite	[°]
λ	Comprimento de onda	[μm]
ρ	Massa específica da água	[kg/m^3]

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ligações entre a energia solar e outros tipos de energia..... 8
Figura 2.2 Representação esquemática da estrutura do Sol. Na *fotosfera*, camada mais acima da *zona convectiva*, se origina a maioria da radiação solar. Adaptado de Macagnan,1995. Tanto na *cromosfera* quanto na *corona*, a temperatura aumenta da base para o topo..... 9
Figura 2.3 Espectro da radiação eletromagnética. Adaptado de Iqbal, 1983. 10
Figura 2.4 Distribuição da energia ao longo do espectro da radiação extraterrestre 11
Figura 2.5 Massa de ar atmosférico. 13

Figura 3.1 Desenho esquemático de uma célula fotovoltaica. Adaptado de Lorenzo, 1991. 15
Figura 3.2 Desenho esquemático de uma célula fotovoltaica sob efeito da radiação solar (a), símbolo usual para a célula e/ou módulo fotovoltaico (b). 16
Figura 3.3 Circuito equivalente ideal de uma célula fotovoltaica. Adaptado de Krenzinger, 1998. 17
Figura 3.4 Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica em operação. Aparecem a resistência em paralelo R_P e a resistência em série R_S. 17
Figura 3.5 Curvas características I & V e Pot & V de uma célula fotovoltaica. 18
Figura 3.6 Representação do fator de forma de uma célula e sua fórmula de cálculo. 20
Figura 3.7 Corte esquemático de um módulo fotovoltaico. 21
Figura 3.8 Conexão de células ou módulos em série. 21
Figura 3.9 Conexão de células ou módulos em paralelo. 22
Figura 3.10 Curvas de corrente e tensão, do módulo SP 75, dados do fabricante. 23
Figura 3.11 Curvas características I & V e Pot & V de um módulo fotovoltaico. Adaptado de Sandia, 2001. 23
Figura 3.12 Representação esquemática simplificada do módulo (a) e do arranjo fotovoltaico (b). 24
Figura 3.13 Associação de módulos em série e em paralelo. 25
Figura 3.14 Curvas características de irradiâncias medidas ao longo de dois dias com condições atmosféricas distintas, módulos inclinados em relação ao plano horizontal e orientados para o Norte. 28
Figura 3.15 Instalação típica de motor e bomba de superfície. 29

Figura 3.16 Corte esquemático de uma bomba centrífuga, aparecendo os principais componentes, as regiões de formação de pressões, a voluta e a linha de fluxo ou vazão. 31
Figura 3.17 Corte esquemático de uma bomba volumétrica de diafragma, aparecem em destaque a membrana flexível ou diafragma, a câmara e as válvulas que controlam a admissão e expulsão do líquido. As linhas pontilhadas indicam sucessivas posições do diafragma. Adaptado de Pumps & Systems, 2000..... 32
Figura 3.18 Características de vazão e altura para as bombas centrífuga e volumétrica. Adaptado de Karassik et al., 1998. 33
Figura 3.19 Curvas características de uma bomba centrífuga. Essas curvas são obtidas com velocidades constantes. 35
Figura 3.20 Curvas características H & Q de uma bomba centrífuga (a) e de um sistema de bombeamento (b). A curva da bomba é obtida com velocidade constante e a curva do sistema com velocidade variável. 36
Figura 3.21 A sobreposição da curva da bomba com a curva dos sistema determina o ponto de trabalho da bomba (a), os pontos A e B representam possíveis variações na posição do ponto de trabalho (b). 36
Figura 3.22 Sobreposição da curva de altura do sistema às curvas características da bomba. Nessas condições a bomba tem, no ponto de trabalho, a vazão Q_T, a altura H_T, a potência Pot_T e a eficiência η_T. 37
Figura 3.23 Variação da corrente com a vazão, para uma bomba centrífuga 38
Figura 3.24 Sobreposição de curvas I & V de um arranjo e de duas bombas. Adaptado de Duffie et al., 1991. 41

Figura 4.1 Laboratório de Energia Solar da Unisinos. Aparecem em destaque dois arranjos fotovoltaicos montados sobre a cobertura do prédio. 42
Figura 4.2 Ilustração da distribuição das células no módulo Siemens SP 75. 44
Figura 4.3 Ilustração da montagem do arranjo configurado com quatro módulos. Note-se a inclinação da estrutura em relação ao plano da cobertura do laboratório. 45
Figura 4.4 Esquema da montagem experimental para testes das bombas e da posição dos transdutores. 46
Figura 4.5 Desenho isométrico da montagem das tubulações de sucção e de recalque para os testes das bombas. 47

Figura 4.6 Ilustração da bancada de testes com as duas bombas e equipamentos complementares. 48
Figura 4.7 Ilustração do conjunto motor e bomba centrífuga. 49
Figura 4.8 Desenho mostrando as pás do impelidor e ilustração do impelidor plano fechado usado nesse trabalho. 50
Figura 4.9 Bomba de diafragma Shurflo modelo 8000 - 443 - 136 51
Figura 4.10 Vista explodida do conjunto motor e bomba de diafragma Shurflo modelo 8000 – 443 – 136. O desenho foi fornecido pelo fabricante. 52
Figura 4.11 Ilustração do sensor com flanges (a) e do conversor de sinal de vazão (b), ambos da marca DANFOSS. 53
Figura 4.12 Ilustração do medidor de diferencial de pressão marca ABB Série 600 T. 53
Figura 4.13 Ilustração do piranômetro EPPLEY modelo PSP instalado junto aos arranjos fotovoltaicos. 54
Figura 4.14 Ilustração da vista frontal do instrumento para aquisição de dados marca HP modelo 34970 A.. 56
Figura 4.15 Ilustração da planilha (*scan setup*) usada para configurar os diferentes canais do multiplexador 56
Figura 4.16 Ilustração das fonte de potência KEPCO modelo BOP 20 – 20 M. 57
Figura 4.17 Arranjo dos equipamentos e instrumentos de medidas usados nos experimentos e suas correspondentes vinculações. 58
Figura 4.18 Ilustração da planilha onde aparecem os dados das variáveis medidas conforme consta na Tabela 4.8..... 58
Figura 4.19 Curva I &V do motor da bomba centrífuga, para uma altura de 5,50 mca..... 62

Figura 5.1 Curvas características de comportamento da irradiância e da vazão, em função da hora local, para um dia completamente sem nuvens. 65
Figura 5.2 Curva da vazão em função da irradiância, para mesmo dia do gráfico da Figura 5.1. O limiar de irradiância para o início de vazão é maior do que para o final de vazão. 65
Figura 5.3 Curvas de irradiância e de vazão, em função da hora local, para um dia com nuvens. Observe-se que não houve interrupção no bombeamento ao longo do dia. 66
Figura 5.4 Curvas de irradiância e de vazão, em função da hora local, para um dia típico com nuvens. É importante observar a intermitência no bombeamento. 67

Figura 5.5 Curvas I & V do motor acoplado à bomba centrífuga, para diferentes aberturas da válvula de controle de vazão. 68
Figura 5.6 Curvas I & V para a bomba de diafragma, para diferentes aberturas da válvula de controle de vazão. 68
Figura 5.7 Sobreposição de curvas I & V das duas bombas, para as condições especificadas no gráfico. 69
Figura 5.8 Linhas de tendências e equações de ajustes para as curvas I & V das duas bombas, para as condições especificas no gráfico. 70
Figura 5.9 Curvas I & V para duas alturas de operação da bomba centrífuga. 71
Figura 5.10 Curvas I_{SC} & G para as quatro configurações de arranjos fotovoltaicos. Dados extraídos da tabela 5.2. 73
Figura 5.11 Sobreposição das curvas I & V do motor e do gerador formado por um módulo fotovoltaico. 75
Figura 5.12 Sobreposição da curva I & V do motor com as curvas do arranjo formado por dois módulos fotovoltaicos ligados em paralelo. 77
Figura 5.13 Sobreposição da curva I & V do motor com as curvas do gerador fotovoltaico formado por três módulos ligados em paralelo. 77
Figura 5.14 Sobreposição da curva I & V do motor com as curvas do gerador fotovoltaico formado por quatro módulos ligados em paralelo. 78
Figura 5.15 Curvas de acoplamento do motor da bomba centrífuga com os arranjos fotovoltaicos, para diversas irradiâncias. 78
Figura 5.16 Curvas I & V para duas alturas s de operação da bomba de diafragma. 79
Figura 5.17 Curvas I_{SC}& G para duas configurações de arranjos fotovoltaicos. Dados extraídos da tabela 5.2. 80
Figura 5.18 Sobreposição de curvas I & V do motor e do arranjo formado por um módulo fotovoltaico. 81
Figura 5.19 Sobreposição da curva I & V do motor com as curvas do gerador fotovoltaico formado por dois módulos ligados em paralelo 82
Figura 5.20 Acoplamento da bomba centrífuga com o arranjo de três módulos fotovoltaicos. 83
Figura 5.21 Acoplamento da bomba de diafragma com o arranjo de um módulo fotovoltaico. 84

Figura 6.1 Curvas características H & Q para a bomba centrífuga. 85
Figura 6.2 Variação da altura com a vazão para a bomba centrífuga. 86

Figura 6.3 Curvas características H & Q para a bomba de diafragma, obtidas nos experimentos. 87
Figura 6.4 Sobreposição das curvas H & Q, da bomba de diafragma, obtidas com dados fornecidos pelo fabricante e com medidas feitas durante esse trabalho. 87
Figura 6.5 Variação da altura com a vazão para a bomba de diafragma. 88
Figura 6.6 Sobreposição de curvas H & Q da bomba centrífuga e da bomba de diafragma. 88
Figura 6.7 Curvas características Pot & Q para a bomba centrífuga. 89
Figura 6.8 Variação da potência com a vazão para a bomba centrífuga. 90
Figura 6.9 Curvas características Pot & Q para a bomba de diafragma. 91
Figura 6.10 Variação da potência com a vazão para a bomba centrífuga. 91
Figura 6.11 Sobreposição de curvas da H & Q e Pot & Q das duas bombas. 92
Figura 6.12 Curvas η & Q da bomba centrífuga. 93
Figura 6.13 Curvas η & Q da bomba de diafragma. 94
Figura 6.14 Sobreposição de curvas da η & Q das duas bombas. 95
Figura 6.15 Curvas do sistema operado pela bomba centrífuga, para duas aberturas da válvula de controle de vazão. 96
Figura 6.16 Curvas do sistema operado pela bomba de diafragma, para duas aberturas da válvula de controle de vazão. 96
Figura 6.17 Sobreposição das curvas de altura e do sistema para a bomba centrífuga. 97
Figura 6.18 Sobreposição das curvas de desempenho da bomba centrífuga, para a tensão de 9 V e velocidade de 1950 rpm, com a curva do sistema. 98
Figura 6.19 Sobreposição das curvas de altura e do sistema para a bomba de diafragma. 98
Figura 6.20 Sobreposição das curvas de desempenho da bomba centrífuga, para a tensão de 9 V e velocidade de 1950 rpm, com a curva do sistema. 99
Figura 6.21 Curvas de corrente e de potência em função da tensão, obtidas no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, para um módulo Siemens SP75. ... 100
Figura 6.22 Curvas características de corrente e tensão obtidas por dois métodos distintos. 101
Figura 6.23 Curvas características de corrente e tensão para um módulo sob várias irradiâncias e temperaturas. 102
Figura 6.24 Curvas de irradiância G e vazão Q em função da hora local, para a bomba de diafragma. 103

Figura 6.25 Curvas de irradiância G e vazão Q em função da hora local, para a bomba de centrífuga. 104
Figura 6.26 Curvas da eficiência instantânea dos conjuntos motores e bombas, em função da hora local, para duas bombas em diferentes alturas. 105
Figura 6.27 Curvas de eficiência instantânea dos conjuntos motores e bombas, em função da irradiância, para duas bombas em diferentes alturas. 106
Figura 6.28 Áreas representativas das eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas em função da irradiância, para as duas bombas em diferentes alturas. 106
Figura 6.29 Curvas da eficiência instantânea dos conjuntos motores e bombas em função da altura para as duas bombas em diferentes alturas. 107
Figura 6.30 Curvas de eficiência instantânea dos conjuntos motores e bombas em função da vazão, para as duas bombas em diferentes alturas. 108
Figura 6.31 Curvas de eficiência instantânea dos conjuntos motores e bombas em função da potência, para as duas bombas em diferentes alturas. 108
Figura 6.32 Distribuição de eficiência instantânea da conversão fotovoltaica em função da hora local, para as duas bombas em diferentes alturas. 109
Figura 6.33 Eficiências máximas e diárias da conversão fotovoltaica, verificadas em duas alturas diferentes para cada bomba. 111
Figura 6.34 Energia solar diária recebida no plano dos módulos fotovoltaicos, para os dias considerados na Tabela 6.3. 111
Figura 6.35 Eficiências instantâneas máximas e diárias dos conjuntos motores e bombas verificadas em duas alturas diferentes para cada bomba. 113
Figura 6.36 Volumes diários bombeados, em duas alturas diferentes, para cada bomba. ... 113
Figura 6.37 Curvas de vazão em função da irradiância e da altura para as duas bombas. ... 114
Figura 6.38 Curvas do quociente entre potência e vazão em função da vazão para as duas bombas em diferentes alturas..... 114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 Características do módulo solar usado na configuração dos geradores. 43
Tabela 4.2 Acessórios e equipamentos dos circuitos hidráulicos dos dois sistemas de bombeamento. 45
Tabela 4.3 Características do motor. 49
Tabela 4.4 Características da bomba centrífuga. 50
Tabela 4.5 Características do conjunto motor e bomba de diafragma. 51
Tabela 4.6 Características do piranômetro marca EPPLEY modelo PSP. 54
Tabela 4.7 Características da fonte Kepco modelo BOP 20 – 20 M. 57
Tabela 4.8 Variáveis medidas nos experimentos. 57

Tabela 5.1 Dados relativos à bomba centrífuga. 72
Tabela 5.2 Dados relativos aos arranjos fotovoltaicos. 72
Tabela 5.3 Limiares de picos de irradiância para diferentes arranjos. 74
Tabela 5.4 Dados relativos à bomba de diafragma. 80

Tabela 6.1 Dados de limiares de irradiância das curvas da Figura 6.24. 103
Tabela 6.2 Dados de limiares de irradiância das curvas da Figura 6.25. 104
Tabela 6.3 Eficiência da conversão fotovoltaica e energia solar diária. 110
Tabela 6.4 Eficiências hidráulicas e volume bombeado ao longo do dia. 112

1 INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

A eletricidade que hoje sustenta o crescimento da economia mundial utiliza como fontes primárias, além da energia hidráulica, os combustíveis fósseis e também os nucleares. Todos esses recursos são limitados e a capacidade de absorção dos resíduos provenientes da sua exploração é restrita. O sistema ecológico da Terra está em delicado estado de equilíbrio e para a sua manutenção há necessidade de uma mudança de atitude, o gerenciamento ambiental deve tomar o lugar dos métodos rudes de exploração. Isso é uma condição necessária para a nossa sobrevivência e das gerações seguintes.

Nos lugares em que hoje existe potencial hidráulico, as construções das centrais hidrelétricas são responsáveis por problemas sociais e ambientais. Os problemas de ordem social são causados pelo desalojamento e deslocamento de populações de cidades inteiras, para dar lugar às grandes obras civis de construção das barragens. Os problemas ambientais, com profundos reflexos na fauna e na flora, são causados pelos desmatamentos e inundações de extensas áreas. Os mananciais hídricos não estão uniformemente distribuídos no planeta e isso acarreta altos custos na extensão e manutenção de redes de distribuição para regiões remotas e longínquas.

A energia gerada pelos combustíveis fósseis tem sido responsável pelo crescimento e desenvolvimento de muitos países. As nações não produtoras ainda dependem, em grande parte, da importação de países do Oriente Médio, onde se situam as maiores reservas mundiais e de onde diariamente o produto é movimentado em navios, oleodutos, trens e caminhões. Isso onera a distribuição e o preço final para o consumidor. Essa dependência leva a lembrar da crise de 1973 que criou uma ruptura no fornecimento mundial. Tecnicamente, o uso de combustíveis fósseis como fonte primária de energia, leva ao lançamento na atmosfera de grandes quantidades de poluentes e gases que, além de agir como agentes poluidores são responsáveis pelo aquecimento global, comprometendo tanto a qualidade como a continuidade da vida no planeta.

A energia nuclear pode ser um meio inesgotável de gerar eletricidade. De acordo com a National Geographic Society, 1998, existem hoje centenas de reatores em operação em todo o mundo. Contudo, o medo de acidentes catastróficos e de vazamentos ameaça o uso dessa fonte de energia. Além disso, a sua utilização exige tecnologia alta e não acessível para todos os países.

Diversas fontes renováveis de energia têm se apresentado como alternativas viáveis e capazes de conciliar a produção com uso racional, protegendo o meio ambiente, incluindo o

aquecimento global. Dentre essas, a energia solar em particular. Ela é global e não regional, é abundante, é inesgotável, é limpa e não produz qualquer espécie de resíduo ou poluente.

O uso da energia solar, por meio da tecnologia fotovoltaica, como fonte de energia para bombear água é considerada uma das mais promissoras aplicações da energia emanada do sol. O uso da energia fotovoltaica para essa finalidade se mostra apropriada, pois existe uma natural relação entre a disponibilidade de energia solar e as necessidades de água. As necessidades de água aumentam durante os períodos de calor quando a intensidade de radiação solar é alta e a entrega de potência por parte dos geradores fotovoltaicos é máxima. Por outro lado, as necessidades de água diminuem quando a temperatura diminui e a radiação solar é menos intensa.

O aproveitamento da água para uso humano, animal e de irrigação, muitas vezes fica comprometido devido às dificuldades de bombeamento e distribuição, especialmente em pequenas comunidades localizadas em regiões remotas e de difícil acesso. Nessas regiões, que não são beneficiadas por redes convencionais de energia elétrica e para onde o acesso é difícil, por qualquer meio de transporte, o provimento e distribuição de água ainda é feito, em muitos casos, por meio da potência derivada do homem e de animais domésticos.

A potência emanada do homem e dos animais provém do seu metabolismo, ou seja, do conteúdo calorífico de sua alimentação. Segundo Fraenkel, 1986, a capacidade de trabalho humana está ao redor de 250 Wh/dia, logo, são necessários quatro dias de trabalho para produzir 1,0kWh. Ora, essa quantidade de energia pode ser entregue por um pequeno motor em menos de uma hora, usando como fonte de energia a eletricidade ou óleo combustível, sem citar outros. Vale ressaltar ainda, que a capacidade de produzir trabalho, tanto do homem quanto do animal, durante um determinado período de tempo não é constante devido à fadiga ocasionada pela carga de trabalho e também em função de sua estrutura física, emocional, idade e condição de saúde física. Por tudo isso, a técnica de bombeamento e distribuição de água usando a potência humana ou animal é cara e cada vez mais inviável.

No Brasil, que recebe uma abundante quantidade de radiação solar durante o ano e devido à sua vasta extensão territorial onde muitas vezes existem pequenas populações isoladas, há um grande potencial para os sistemas que usam a tecnologia fotovoltaica para promover o bombeamento de água, assim como para gerar eletricidade para uso doméstico. Os conjuntos de motores e bombas acionados por essa tecnologia oferecem uma série de vantagens sobre os seus concorrentes cujos combustíveis são oriundos do petróleo. Para os usuários, os custos durante o ciclo de vida dos sistemas são menores do que os dos outros sistemas, pois não há necessidade da compra e do transporte do combustível até o local de utilização, a manutenção é bastante

reduzida e a vida útil do sistema é maior. Os módulos fotovoltaicos, que geram a eletricidade, são formados por uma quantidade padronizada células, ligadas eletricamente entre si e montadas em uma estrutura de proteção e sustentação. O módulo é compacto e assim sendo não possui partes móveis, o que facilita a sua instalação e manutenção. Outra vantagem está no fato de que os módulos fotovoltaicos de mesma referência são padronizados, tanto nas dimensões quanto na potência de saída e isso permite que o crescimento das necessidades de água seja acompanhado pelo aumento de potência do gerador, pelo acréscimo de módulos. Existem também, vantagens no que diz respeito ao controle do meio ambiente. Eles são silenciosos e por não necessitarem combustíveis não produzem poluentes, são limpos e os perigos de vazamentos não existem. Por tudo isso, o uso da energia solar fotovoltaica para o bombeamento de água é viável e pode cooperar para diminuir a dependência no uso da energia produzida por outros combustíveis. O uso da tecnologia fotovoltaica no bombeamento de água tem uma adicional vantagem sobre outras aplicações da mesma tecnologia, tais como iluminação e refrigeração. Quando ela é usada com a intenção de gerar eletricidade para iluminação e refrigeração requer acondicionamento em baterias para uso posterior, enquanto que para o bombeamento de água não são necessários tais equipamentos, pois o uso pode ser imediato ou o produto final, a água, pode ser armazenado em depósitos, para uma futura utilização (acumulação gravitacional).

A produção de água, em termos de volume bombeado diariamente, deve atender às expectativas dos usuários e para que isto aconteça o sistema deve ser adequadamente dimensionado em todos os seus aspectos, para cada situação em particular. É impraticável projetar um dimensionamento genérico que atenda às infinitas combinações possíveis das variáveis de radiação solar e correspondentes alturas de bombeamento. Além disto, o volume bombeado varia com as distintas combinações dos componentes do sistema, tais como: geradores de eletricidade fotovoltaica, tipos de bombas, tipos de motores, componentes da linha de sucção e de recalque, fiação e outros que comumente fazem parte em um sistema de bombeamento. Portanto, é necessário analisar os parâmetros mais importantes como: eficiências dos conjuntos motores e bombas e da conversão fotovoltaica, limiar de radiação para o qual começa o bombeamento, características elétricas do gerador, o acoplamento entre o gerador e o conjunto motor e bomba, as perdas de potência, etc., que permitem concluir sobre o desempenho dos sistemas de bombeamento estudados e fazer a comparação entre eles.

Faz-se necessário levar em conta que o dimensionamento de um sistema de bombeamento que usa tecnologia fotovoltaica depende, em muito, das condições climáticas do local de operação. Se dois sistemas que apresentem as mesmas características forem montados em regiões diferentes, poderão não apresentar os mesmos resultados práticos.

O grau de aceitação dos sistemas que usam energia solar para o bombeamento de água, por parte dos usuários, é baixo. Existem vários fatores que impedem a implementação em larga escala desses sistemas. Esses são: o alto custo inicial, a insuficiente conscientização para o uso da tecnologia, o desconhecimento das possibilidades dos sistemas, a inabilidade técnica, a falta de conhecimento exato da necessidade da produção diária, a deficiência de dados estatísticos e estimativos sobre a radiação solar e temperatura local, como também uma história de falhas causadas pela inadequação nos dimensionamentos dos sistemas já implantados. Para que um sistema de bombeamento seja implantado com sucesso é necessário conhecer com profundidade o comportamento de todos componentes quando acoplados a um gerador fotovoltaico assim como da radiação solar incidente no local da instalação, ao longo de um ano.

Existe uma ligação muito forte entre crescimento econômico e consumo de energia. O desafio de hoje não é somente o de enfrentar a redução dos recursos energéticos não renováveis, como decorrência da falta de conservação ou de mau uso, mas também de encontrar maneiras de usar de maneira adequada os mais diversos tipos de energias alternativas, em aplicações essenciais na nossa vida diária e das gerações seguintes. Conforme Szokolay, 1997, "...talvez mais importante: é que nós deixemos para a próxima geração um mundo que não seja pior que aquele que nós herdamos da geração anterior à nossa".

1.2 Objetos em estudo nesse trabalho

Os objetos do estudo dessa dissertação foram dois sistemas de bombeamento de água instalados junto ao Laboratório de Energia Solar da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos. Um dos sistemas utilizou uma bomba centrífuga e o outro uma bomba volumétrica de diafragma, sendo que cada bomba era acionada por motores elétricos em corrente contínua.

Foram montadas duas bancadas experimentais constituídas de componentes elétricos, eletrônicos, mecânicos e hidráulicos, que permitiram, além de executar os bombeamentos, monitorar e coletar periodicamente os dados das variáveis de importância fundamental dentro do processo de conversão fotovoltaica e de bombeamento. Cada uma dessas bancadas configurava um sistema de bombeamento.

Os trabalhos da parte experimental foram executados em duas fases. Na primeira, os conjuntos de motores e bombas foram acoplados diretamente a uma fonte de potência em corrente contínua. Na segunda, os conjuntos de motores e bombas foram acoplados diretamente aos geradores fotovoltaicos, ou seja, a geração de energia era atribuição exclusiva dos módulos fotovoltaicos sem o uso de acumuladores de energia, baterias eletroquímicas, para o caso da utilização quando da insuficiência ou de ausência de radiação solar. Em particular, chama-se a

esse sistema de autônomo sem acumuladores ou baterias. É importante citar que não foram instalados quaisquer dispositivos de segurança destinados a proteger os conjuntos motores e bombas, assim como as instalações de problemas que poderiam ser ocasionados por sobrecorrentes e/ou sobretensões provenientes de elevadas radiações solares incidentes no plano dos módulos fotovoltaicos.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é comparar, por meio de análises experimentais, o comportamento de dois sistemas de bombeamento de água que utilizam a energia solar fotovoltaica, com acoplamento direto aos geradores. Ao final deste trabalho as variáveis envolvidas em todo o processo, tais como: a altura desenvolvida, a vazão, a potência e as eficiências dos conjuntos motores e bombas e da conversão fotovoltaica, ficarão perfeitamente caracterizadas, em cada um dos sistemas de bombeamento.

Os objetivos específicos desse trabalho são os seguintes:

1 determinar a corrente de pico ou corrente de arranque, para diferentes aberturas da válvula de controle de vazão, para cada um dos motores das bombas;
2 determinar a corrente de início de vazão, para diferentes aberturas da válvula de controle de vazão, para cada um dos motores das bombas;
3 determinar a configuração dos geradores necessários para acionar cada um dos sistemas de bombeamento;
4 caracterizar cada uma das bombas por meio do traçado e interpretação das curvas características de cada uma delas;
5 comparar, quando possível, as curvas características obtidas experimentalmente com as curvas fornecidas pelos fabricantes ou constantes em catálogos;
6 analisar o desempenho dos conjuntos motores e bombas por meio da interpretação das curvas de eficiência instantânea em função da hora local, da irradiância, da altura, da vazão e da potência;
7 determinar a eficiência da conversão fotovoltaica nas modalidades instantânea, máxima instantânea e diária, para cada sistema de bombeamento;
8 determinar a eficiência dos conjuntos motores e bombas nas modalidades instantânea, máxima instantânea e diária , para cada sistema de bombeamento.
9 analisar o comportamento dos conjuntos motores e bombas em função das curvas que relacionam o quociente entre potência e vazão com a vazão.

1.4 Escopo do trabalho

Para atingir os objetivos e como forma de apresentar a dissertação, esse documento é dividido em capítulos, como segue:

O capítulo 2 apresenta a ligação da energia solar com os demais recursos energéticos. Descreve a estrutura do Sol, são apresentados alguns conceitos básicos no estudo da radiação solar e que são importantes para o entendimento do trabalho e também aborda aspectos envolvidos na atenuação da radiação solar que atinge a superfície da Terra.

O capítulo 3 tem por finalidade estudar os dispositivos fotovoltaicos usados em bombeamento fotovoltaico e os acoplamentos diretos entre os sistemas de potência e de bombeamento. Os dispositivos fotovoltaicos são estudados a partir da célula solar, passando pelo módulo onde são enfatizadas as suas curvas características, finalizando com a maneira como os módulos podem ser conectados entre si, para dar origem aos arranjos. Os acoplamentos são estudados a partir das sobreposições das curvas I & V dos arranjos com as curvas das mesmas variáveis dos motores.

O capítulo 4 trata da abordagem experimental. Inicia com a localização geográfica do laboratório onde foram realizados os experimentos, descreve as instalações, os equipamentos, a maneira como foram obtidas as curvas que caracterizam as bombas e os sistemas de bombeamento. Ao final do capítulo é descrita a metodologia usada para a aquisição dos dados das variáveis envolvidas.

O capítulo 5 é reservado para analisar os acoplamentos entre os conjuntos motores e bombas com os arranjos fotovoltaicos. Faz-se uma apreciação da distribuição da irradiância ao longo de um dia, considerando para isso, tanto os dias completamente sem nuvens assim como os dias nublados. Mostra-se o comportamento elétrico dos conjuntos motores e bombas. A partir da análise do comportamento elétrico dos conjuntos dos motores e bombas e com base nos módulos fotovoltaicos disponíveis para a realização desse trabalho, determina-se qual o melhor acoplamento para cada um dos conjuntos dos motores e bombas.

O capítulo 6 trata da análise do desempenho dos diversos equipamentos. Inicia com a interpretação das curvas características das bombas, obtidas nos experimentos e compara, quando possível, com os dados fornecidos pelos fabricantes. Ainda nesse capítulo analisa-se o seguinte:

1 a relação entre as bombas e os sistemas de bombeamento;
2 as curvas características de um dos módulos fotovoltaicos usado nos experimentos, fazendo para isso uma comparação entre as curvas características construídas por dois métodos distintos;

3 as curvas de irradiância e vazão em função da hora local, para as duas bombas;

4 a eficiência instantânea dos conjuntos motores e bombas em função da vazão, da altura e da potência;

5 a eficiência instantânea e diária tanto dos conjuntos motores e bombas, quanto da conversão fotovoltaica;

6 o comportamento dos conjuntos motores e bombas em função das curvas que relacionam o quociente entre potência e vazão com a vazão.

O capítulo 7 é reservado para as conclusões e considerações finais.

2 ENERGIA SOLAR

2.1 Aspectos Gerais

A energia solar, em uma ou outra forma, é a fonte de quase todos os recursos energéticos da Terra. Os combustíveis fósseis, o carvão mineral, o gás natural, a biomassa, a energia eólica e mesmo a hidroeletricidade são, em última instância, derivadas do Sol.

O petróleo, o carvão e o gás natural, tiveram sua origem a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária para o seu desenvolvimento a partir da energia solar. A biomassa que usa os recursos orgânicos para gerar energia com a finalidade de aquecimento, cozinha, transporte e eletricidade, tem como base a fotossíntese, onde a energia solar capturada pelas plantas é transformada em energia química. A radiação solar induz à circulação do ar atmosférico, causando juntamente com a rotação da Terra, os ventos cuja energia pode ser usada para gerar eletricidade. A partir do aquecimento da Terra, ocasionado pela radiação solar, é que acontece a evaporação e posterior precipitação, origem do ciclo das águas e que possibilita, entre outras coisas, o represamento para a conseqüente geração de energia elétrica.

A Figura 2.1 mostra que várias formas de energia têm a sua origem da energia solar.

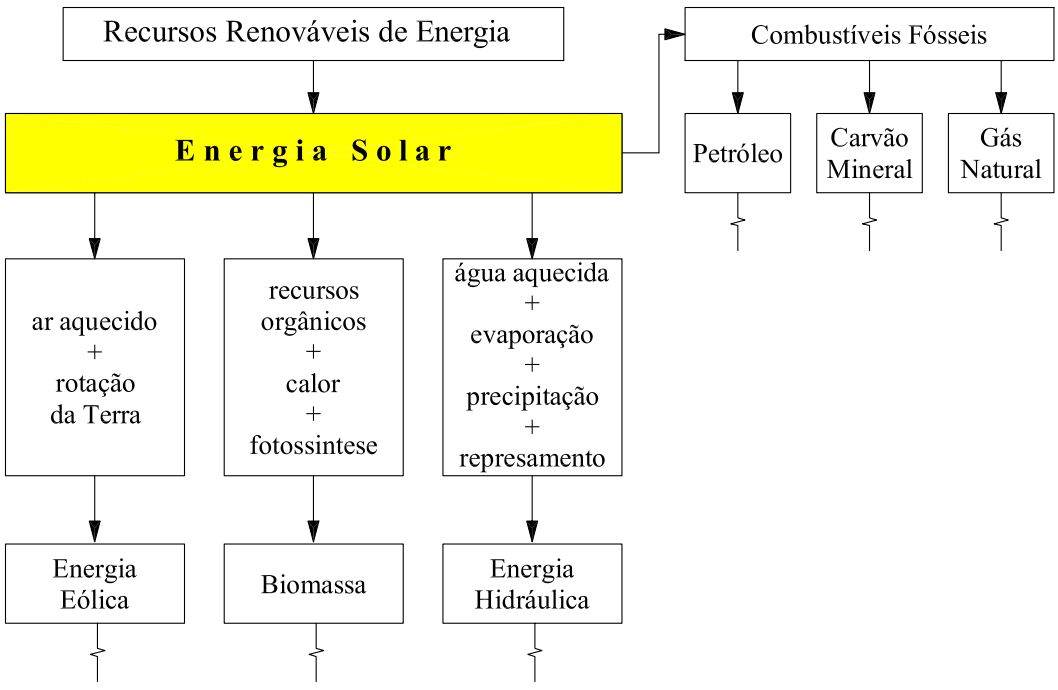


Figura 2.1 Ligações entre a energia solar e outros tipos de energia.

2.2 O Sol

O Sol é a estrela mais próxima da Terra, a distância média entre os dois é aproximadamente de 1495 x 10^{11} m, é constituído de gases em altíssima temperatura. Estruturalmente o Sol é composto por uma série de regiões concêntricas. A parte interna, chamada de *núcleo*, tem um raio de 23% do total. Essa parte é a mais densa e quente e nela se concentra a maior produção de energia. Acima do núcleo, num intervalo que compreende um raio entre 23 e 70% do total, está o *interior*. A energia produzida por essas duas partes é transferida para a superfície e irradiada para o espaço por meio de uma sucessão de radiações e convecções e suas respectivas emissões, absorções e reirradiações. A região compreendida num raio entre 70 e 100% do total é chamada de *zona convectiva*, é uma zona de transmissão de calor. A superfície do Sol é chamada de *fotosfera*, ela é a fonte da maior parte da radiação solar. Acima da fotosfera está a região chamada de *camada de reversão*. Por fora dessa camada está a *cromosfera* e a região mais externa é chamada de *corona*.

A Figura 2.2 mostra esquematicamente a estrutura física do Sol. A radiação emitida pelo Sol é o resultado da composição das temperaturas e densidades das suas diversas camadas, que emitem e absorvem radiações em vários comprimentos de onda.

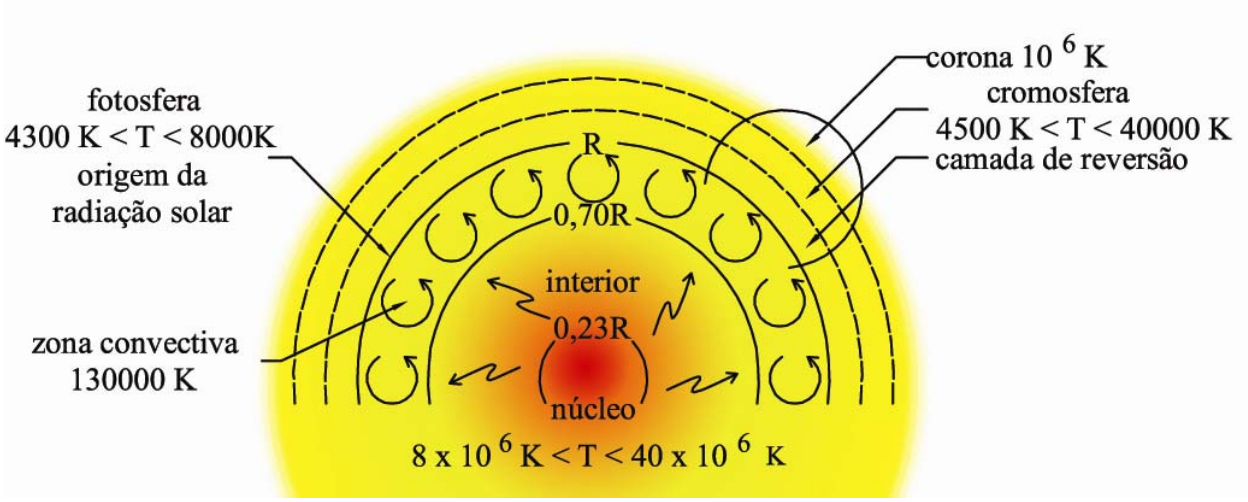


Figura 2.2 Representação esquemática da estrutura do Sol. Na *fotosfera*, camada mais acima da *zona convectiva*, se origina a maioria da radiação solar. Adaptado de Macagnan, 1995. Tanto na *cromosfera* quanto na *corona*, a temperatura aumenta da base para o topo.

2.3 Radiação Solar e Espectro Eletromagnético

O Sol é o principal elemento que participa diretamente no desempenho de um sistema de geração de eletricidade fotovoltaica. Portanto, para um perfeito entendimento do funcionamento dos dispositivos fotovoltaicos (célula e módulo) e para realizar os cálculos que envolvam a radiação solar, como por exemplo, para determinar a eficiência de conversão da luz solar em energia elétrica, é de fundamental importância entender os fenômenos básicos inerentes à radiação solar.

A energia que a Terra recebe é expressa em forma de radiação solar. Essa radiação é formada por um conjunto de ondas eletromagnéticas que se caracterizam pelo seu espectro, chamado de espectro eletromagnético, o qual é dividido em uma série de regiões, identificadas de acordo com o comprimento de onda de cada uma delas. Não existe limite exatamente definido entre uma e outra região. Assim sendo, considera-se que existe uma faixa de fronteira entre regiões adjacentes.

A Figura 2.3 mostra a divisão do espectro eletromagnético em bandas de comprimentos de onda.

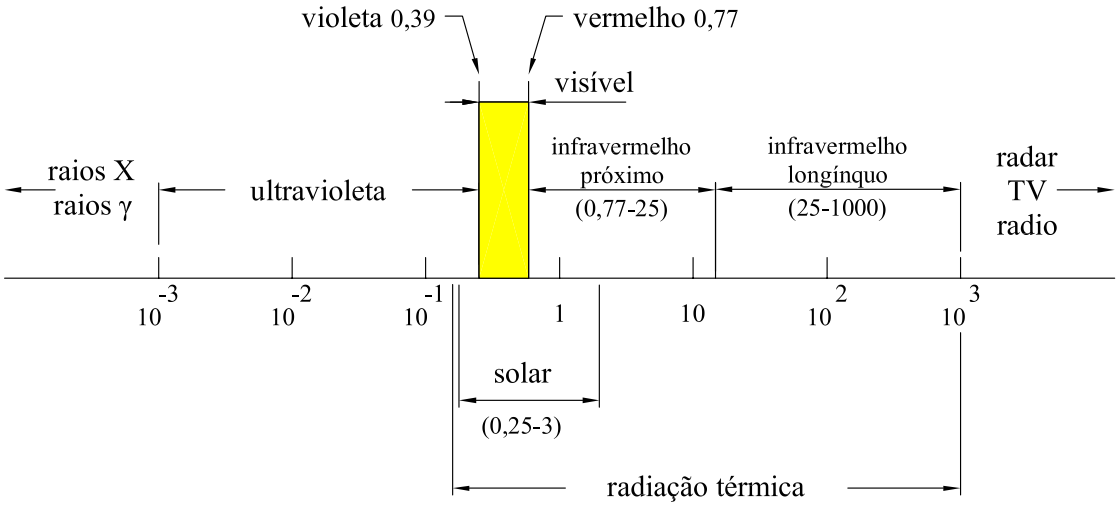


Figura 2.3 Espectro da radiação eletromagnética. Adaptado de Iqbal, 1983.

A forma de descrever a luz como sendo formada por ondas com determinados comprimentos começou a ser aceita no início do século XIX. Por volta de 1870 a luz foi vista como parte do espectro eletromagnético, mas ainda não bem compreendida. A sua perfeita caracterização e o seu completo entendimento foram possíveis por meio dos trabalhos de Max

Plank em 1900 e Albert Einstein em 1905, ganhadores do prêmio Nobel de física em 1918 e 1921, respectivamente.

O espectro eletromagnético divide-se em três regiões distintas, a saber:

1 a região com comprimento de onda abaixo do violeta, $\lambda < 0{,}38$ μm, denominada de ultra violeta, UV.

2 a região com comprimento de onda entre o violeta e o vermelho, $0{,}38$ μm $< \lambda < 0{,}78$ μm, denominada de visível, é a região que o olho humano consegue perceber, note-se que essa região cobre somente uma pequena parcela do espectro;

3 a região com comprimento de onda acima do vermelho, $\lambda > 0{,}78$ μm, conhecida como infravermelho, IV.

A divisão do espectro da radiação extraterrestre se distribui aproximadamente da seguinte maneira: 6,34 % no ultravioleta, 48,02 % no visível e 45,64 % no infravermelho.

A Figura 2.4 mostra a distribuição da energia ao longo do espectro da radiação extraterrestre.

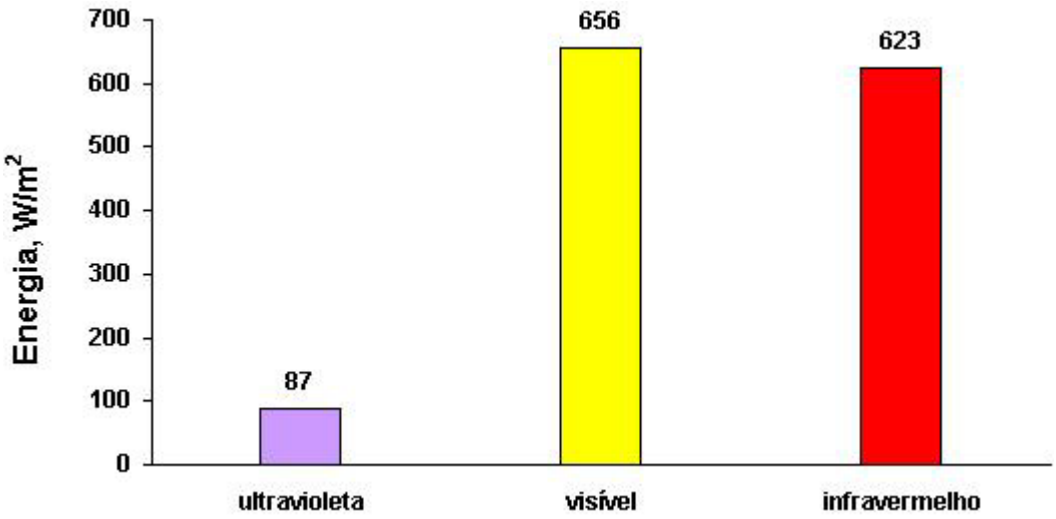


Figura 2.4 Distribuição da energia ao longo do espectro da radiação extraterrestre.

2.4 Radiação Solar Extraterrestre e Constante Solar

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre, num determinado plano é dita radiação solar extraterrestre. Por meio dela é possível estimar a radiação que seria recebida na Terra, na ausência da atmosfera.

A radiação emitida pelo Sol não é constante e as alterações na distância Terra-Sol provocam variações no fluxo de radiação solar extraterrestre. Fora da atmosfera terrestre, a energia solar total por unidade de tempo que incide sobre uma superfície de área unitária,

colocada perpendicularmente aos raios solares, a uma distância do Sol equivalente à distância média Terra-Sol é definida como constante solar, G_{SC}. De acordo com Duffie et al., 1991, o World Radiation Center (WRC) adotou o valor de 1367 W/m^2, com uma incerteza de 1%.

2.5 Atenuação da Radiação Solar e Radiação Solar na Superfície Terrestre

A Terra percorre uma órbita elíptica em torno do Sol e durante a sua rotação a parte iluminada recebe, a cada momento, uma quantidade suficiente ou mesmo maior de radiação solar do que a necessária para o controle das condições climáticas, para a criação, manutenção e renovação da vida no nosso planeta. Essa radiação recebida constantemente é somente uma fração da energia emitida pelo Sol e que incide diretamente sobre a superfície da Terra, pois parte do seu caminho é percorrida dentro da camada da atmosfera terrestre, composta por gases, água nos três estados e partículas em suspensão, chamados de aerossóis. Ao atingir o topo da atmosfera a radiação é separada em duas componentes, uma que chega à Terra em linha reta, chamada direta e a outra sofre a ação dos componentes atmosféricos, chamada difusa. Em termos geométricos, pode-se dizer que a radiação direta provém unicamente do Sol, chegando à superfície terrestre sem ter sofrido mudança de direção, além da refração atmosférica. A radiação difusa provém de toda a atmosfera. Além de introduzir uma componente direta e outra difusa na radiação solar, a ação da atmosfera ocasiona os seguintes efeitos na radiação recebida:

1 redução da potência devido à absorção, dispersão e reflexão na atmosfera;

2 mudança no espectro devido à maior absorção ou dispersão de alguns comprimentos de onda.

Outra componente da radiação total recebida na superfície da Terra, quando a superfície receptora estiver inclinada, é aquela refletida por objetos ou pelo solo. A radiação global que atinge essa superfície é expressa, então, pela adição das três componentes, ou seja:

$$G_{global} = G_{direta} + G_{difusa} + G_{refletida}$$

O comprimento do caminho óptico que a luz percorre ao atravessar a atmosfera terrestre é diferente segundo a altura solar (a altura solar é o ângulo formado pelo raio solar e o plano horizontal). Esse caminho é chamado de massa de ar. Quando a trajetória vai desde o ponto em que a vertical normal encontra a esfera celeste (zênite) até o nível do mar, para uma pressão ao nível do solo de 1000 milibares, o valor da massa de ar é o da unidade, ou seja, m =1 ou AM1. Fora da atmosfera o valor da massa de ar é zero.

A Figura 2.5 mostra o caminho óptico normal à superfície terrestre (AO) e o inclinado (MO) para um ângulo de zênite (θ_z).

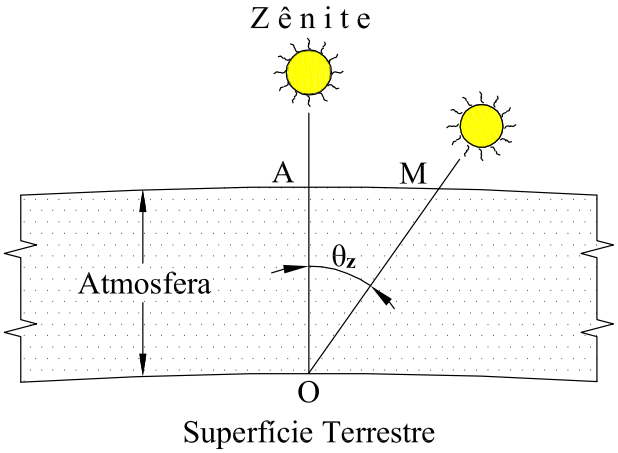


Figura 2.5 Massa de ar atmosférico.

O entendimento do conceito de massa de ar é importante no estudo dos dispositivos fotovoltaicos. Ela quantifica a redução da potência da luz devido à ação dos componentes da atmosfera terrestre.

Para uma altura solar, cujo ângulo de zênite é θ_z, a massa de ar é definida como:

$$m = \frac{OA}{OM} \tag{2.1}$$

De acordo com Duffie et al., 1991, para valores de θ_z compreendidos entre 0° e 70°, ao nível do mar, a equação 2.2 pode ser usada com bastante aproximação.

$$m = \frac{1}{\cos\theta_Z} \tag{2.2}$$

Para ângulos maiores o efeito da curvatura da Terra se torna significante e deve ser levado em consideração.

3. DISPOSITIVOS USADOS EM BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO DE ACOPLAMENTO DIRETO

3.1 Aspectos Gerais

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da radiação solar em eletricidade, por meio do fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico foi notado pela primeira vez, em 1839, pelo físico francês Edmund Bequerel que descobriu a propriedade que certos materiais apresentavam de produzir pequenas quantidades de corrente elétrica quando expostos à luz. Descobertas importantes foram feitas nos Laboratórios da Bell Telephone, nos Estados Unidos, em meados da década de 1950, sendo que em 1954 foi construído o primeiro módulo fotovoltaico, nos mesmos laboratórios. Ele foi rotulado como sendo uma bateria solar e sua construção foi mais por curiosidade, pois era muito caro o que limitava a sua aplicação em larga escala. O grande impulso para aplicações desta nova tecnologia foi a partir do primeiro choque do petróleo, em 1973, pois até então somente a indústria espacial americana a utilizava em satélites. Através dos programas espaciais, a tecnologia tomou impulso, avançou, sua credibilidade foi estabelecida e com isto o custo começou a declinar.

3.2 A célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é um dispositivo semicondutor. De acordo com a forma da estrutura dos átomos, as células fotovoltaicas são classificadas como segue:

1 Cristalinas

1.1 Monocristalinas

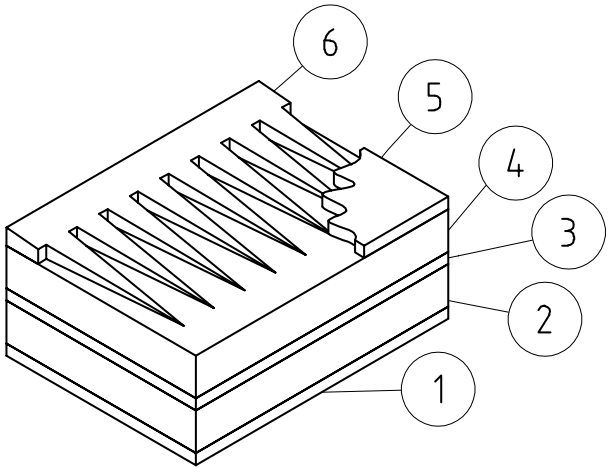
1.2 Policristalinas

2 Amorfas

As células fotovoltaicas podem ser constituídas tanto por um só elemento como por ligas e compostos. As mais comumente usadas são as de silício monocristalino. A tecnologia usada na sua fabricação é um processo muito bem elaborado que inicia na extração do dióxido de silício (SiO_2), passando pela desoxidação em fornos, sendo purificado e solidificado. Após a solidificação o cristal de silício é cortado em finas "fatias" que mais tarde resultarão nas células destinadas à fabricação dos módulos fotovoltaicos.

A Figura 3.1 mostra o desenho esquemático de uma célula fotovoltaica. Para entender o funcionamento de uma célula fotovoltaica é necessário ter conhecimento do que acontece dentro

dela, no nível atômico. Os átomos do silício se caracterizam por possuírem quatro elétrons livres na sua órbita, ou seja, possuem quatro elétrons na sua banda de valência, que ao se ligarem aos vizinhos possibilitam a constituição de uma estrutura cristalina que lhe dá estabilidade molecular. Para modificar as propriedades elétricas do silício lhe são adicionados dois elementos dopantes. Um deles é o boro (B), que possui três elétrons livres na sua última órbita e ao associar-se com o silício forma uma estrutura com falta de elétrons. A esta falta de elétrons denomina-se de buraco ou lacuna e diz-se com isto que o boro é um elemento receptor de elétrons ou um dopante tipo “p” . O outro é o fósforo (P) que possui cinco elétrons na última banda e havendo a associação com o silício, lhe restará um elétron livre. Assim, o elemento fósforo é doador de elétrons ou um dopante tipo ”n”.



1 Contato metálico posterior

2 Cristal tipo “p”

3 Junção “p n “

4 Cristal tipo “n”

5 Proteção anti-reflexiva

6 Contato metálico frontal

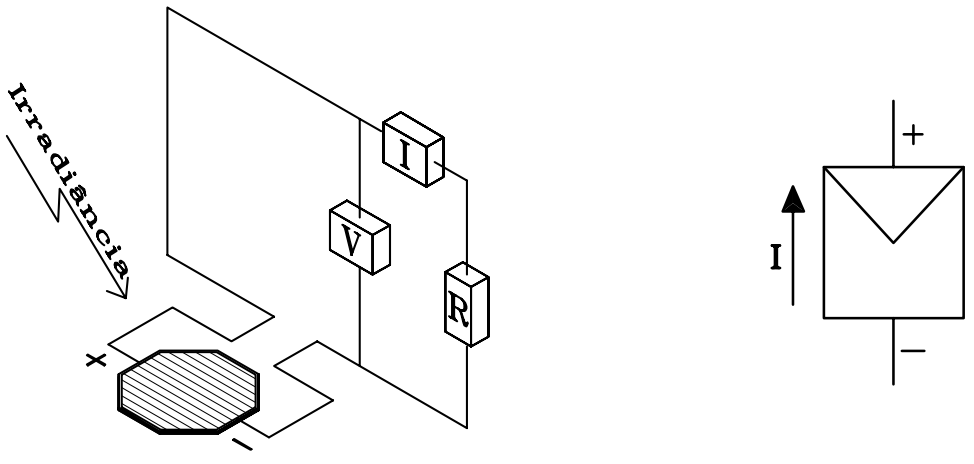
Figura 3.1 Desenho esquemático de uma célula fotovoltaica. Adaptado de Lorenzo, 1991.

Partindo de um silício puro e adicionando fósforo em uma metade e boro na outra, será formado o que chamamos de junção “p - n”. Ao ocorrer a formação final da célula, o elétron livre do cristal formado pelo silício acrescido do fósforo penetra na estrutura do cristal formado pelo silício adicionado do boro, ocupando a posição anteriormente livre. Ao abandonar sua posição original ele leva consigo uma carga negativa e deixa atrás de si uma carga positiva. Como este processo é contínuo, cria-se assim um tráfego constante de elétrons livres, ficando o cristal silício-fósforo positivo e o silício-boro negativo. Este processo continua até a região negativa “n” estar eletricamente forte para repelir os elétrons provenientes da região positiva “p”. O campo elétrico formado por esta separação de cargas existe dentro de cada célula, imediatamente abaixo da sua superfície e irá propiciar um fluxo de corrente, quando a luz solar atingir a célula.

3.2.1 Funcionamento simplificado de uma célula fotovoltaica

Quando a radiação solar incide sobre uma célula solar os fótons que constituem a luz penetram na sua superfície e são absorvidos pelos elétrons da rede cristalina do átomo de silício, próximos da junção "p" – "n". Com o choque, o elétron absorve o fóton e se libera, com isso cria-se uma lacuna onde havia antes a ligação entre os átomos, lacuna essa que será preenchida por outro elétron. Esse processo é chamado de geração de um par elétron – lacuna a partir de um fóton [Krenzinger, 1998]. Enquanto houver incidência de luz solar a geração do par elétron-lacuna a partir do fóton será contínua. Ao se movimentar livremente o elétron é acelerado pelo campo elétrico da junção "p" – "n". Sua trajetória é, então, direcionada para a superfície da célula de onde emerge com uma diferença de potencial elétrico. Ao se conectar uma carga aos terminais de uma célula fotovoltaica que está iluminada pela luz solar, uma intensidade de corrente passa a fluir. Essa intensidade de corrente circula internamente do semicondutor "n" ao semicondutor "p".

A Figura 3.2 mostra o desenho esquemático de uma célula fotovoltaica sobre a qual está incidindo a radiação solar. A figura também representa o símbolo usual da célula e/ou do módulo fotovoltaico. Se os terminais da célula forem conectados por um fio, circula através desse uma fotocorrente proporcional à intensidade da luz incidente. Esse é o chamado efeito fotovoltaico.



(a) (b)

Figura 3.2 Desenho esquemático de uma célula fotovoltaica sob efeito da radiação solar (a), símbolo usual para célula e/ou módulo fotovoltaico (b).

A célula fotovoltaica é usualmente representada por seu circuito equivalente. O modelo de circuito equivalente ideal de uma célula fotovoltaica, à qual está conectada uma carga, é representado por uma fonte de corrente ligada em paralelo com um diodo. A Figura 3.3

representa o circuito equivalente ideal de uma célula fotovoltaica na qual está conectada uma carga. Nessa representação, I é a corrente fornecida pela célula à carga, composta que é pela diferença entre a corrente fotogerada ou fotocorrente I_L e a corrente que circula pelo diodo I_D.

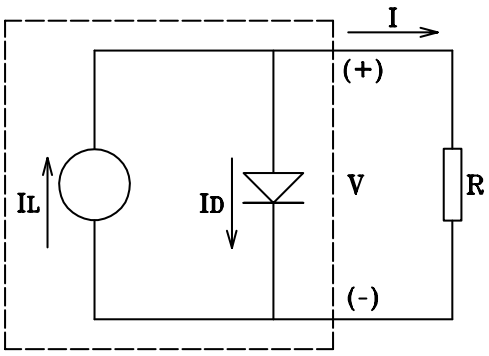


Figura 3.3 Circuito equivalente ideal de uma célula fotovoltaica. Adaptado Krenzinger ,1998.

Conforme Lorenzo, 1991, a equação que representa a corrente que circula pela célula é dada por:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V}{m^* kT}} - 1 \right] \tag{3.1}$$

onde I é a corrente que circula pela célula, I_0 é a corrente de saturação reversa, V é a tensão aplicada, k é a constante de Boltzmann (1,38 x 10^{-23} J/K), T a temperatura do cristal K e m* é um fator dependente tanto do material quanto da estrutura física do diodo e cujos valores variam entre 1 e 2.

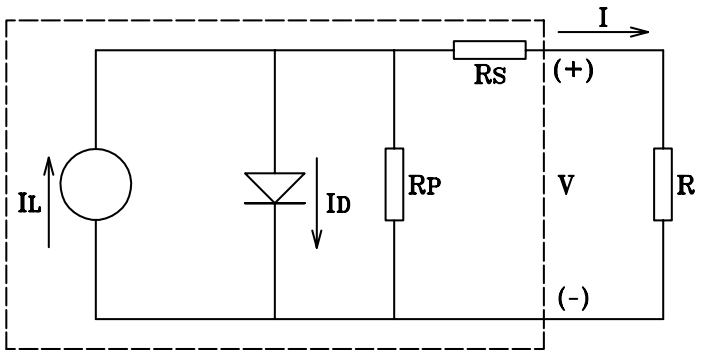


Figura 3.4 Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica em operação. Aparecem a resistência em paralelo R_P e a resistência em série R_S.

Em uma célula em operação existem efeitos que não estão mostrados na figura 3.2 e que alteram o circuito ideal de uma célula fotovoltaica. Há uma resistência em série, que corresponde à resistência real da célula e uma resistência em paralelo, que representa as fugas de corrente pela própria célula.

A Figura 3.4 mostra o circuito equivalente da célula fotovoltaica, com as respectivas resistências.

Para o circuito equivalente a equação (3.1) passa a ser escrita da seguinte forma:

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V + IR_s}{m^* kT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \qquad (3.2)$$

3.2.2 Curvas características da célula solar

As curvas que caracterizam uma célula solar fotovoltaica são as seguintes:

1 curva corrente e tensão, que nesse trabalho será chamada de I & V;

2 curva de potência e tensão, que nesse trabalho será chamada de Pot & V.

A Figura 3.5 mostra as curvas características de corrente versus tensão e potência versus tensão, para uma celular solar fotovoltaica.

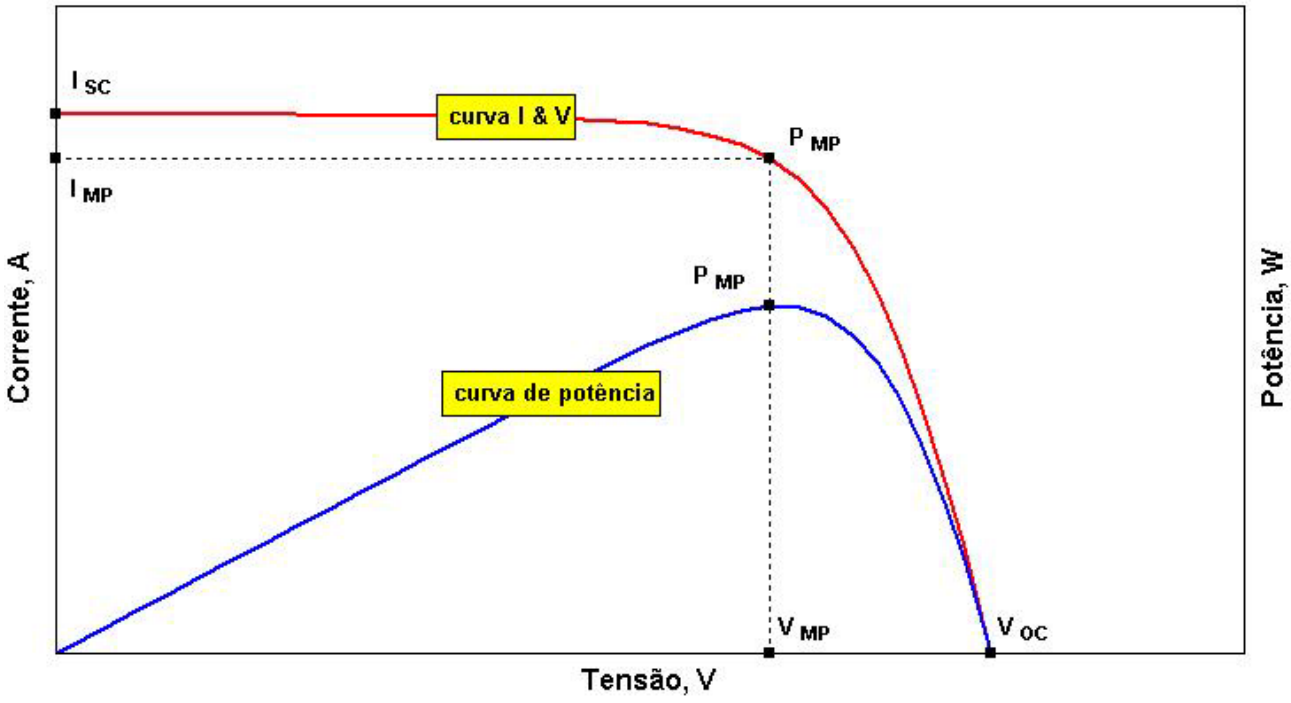


Figura 3.5 Curvas características I & V e Pot & V de uma célula fotovoltaica.

Cada ponto da curva I & V é caracterizado por um par de valores de corrente e tensão. No ponto de máxima potência da célula, P_{MP}, existe uma tensão de máxima potência, V_{MP}, e uma corrente de máxima potência, I_{MP}. Para cada par de valores está associada uma resistência de carga, sendo que no ponto de máxima potência haverá uma resistência de carga de máxima potência, R_{MP}. Quando uma carga é conectada à célula o ideal seria que ela tivesse uma resistência igual à R_{MP}, pois desse modo estaria sempre operando no ponto de máxima potência da célula. Mas em operações reais isso nem sempre acontece, pois é difícil existir o perfeito acoplamento elétrico entre célula e carga.

A tensão medida entre o terminal positivo e negativo, sem nenhuma carga conectada à célula, é denominada de tensão de circuito aberto, $V_{OC,}$ do inglês *open circuit*. Essa é a máxima tensão que poderá ser produzida pela célula. Ela ocorre em um ponto em que não flui corrente.

A corrente medida quando o terminal positivo estiver ligado ao terminal negativo, sem nenhuma carga conectada à célula, é denominada de corrente de curto circuito, I_{SC}, do inglês *short circuit*. É a máxima corrente que poderá ser produzida pela célula.

Os pontos $I_{SC,}$ $V_{OC,}$ $I_{MP,}$ V_{MP} e P_{MP} são pontos notáveis e junto com as curvas servem para caracterizar eletricamente uma célula solar fotovoltaica.

3.2.3 Fator de forma ou de preenchimento de uma célula solar fotovoltaica

O quociente entre a máxima potência que a célula pode dar à carga (P_{MP}), com a potência teórica no ponto (I_{SC}, V_{OC}) é chamado de fator de forma (FF), definido pela equação (3.3).

$$FF = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \tag{3.3}$$

O fator de forma é a grandeza que expressa o quanto o polígono limitado pela curva I & V e pelos eixos cartesianos se aproxima de um retângulo. Quanto melhor a qualidade de uma célula, mais próximo do formato retangular será o polígono. Quanto mais o valor da relação entre as potências tender para a unidade, maior será a qualidade da célula.

A Figura 3.6 representa o fator de forma de uma célula fotovoltaica. Por exemplo, para a célula dessa figura, o fator de forma calculado vale 0,70. Isso indica que a máxima potência que a célula pode produzir corresponde a 70% do valor da potência se a tensão fosse igual à tensão de circuito aberto no mesmo momento em que a corrente fosse igual à corrente de curto circuito. Conforme Lorenzo, 1991, o fator de forma é um parâmetro de grande utilidade prática, que varia

pouco de um dispositivo para outro e que assume valores que se situam ao redor de 0,7 - 0,8 para muitas células de semicondutores cristalinos.

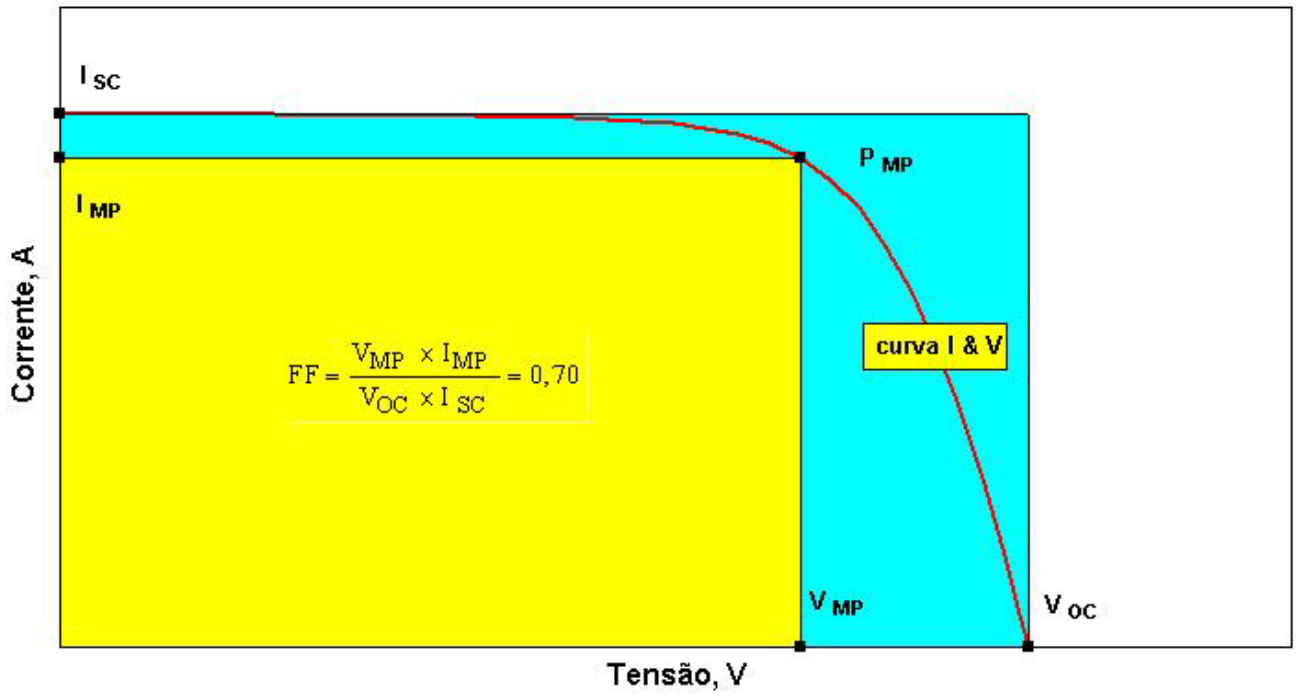


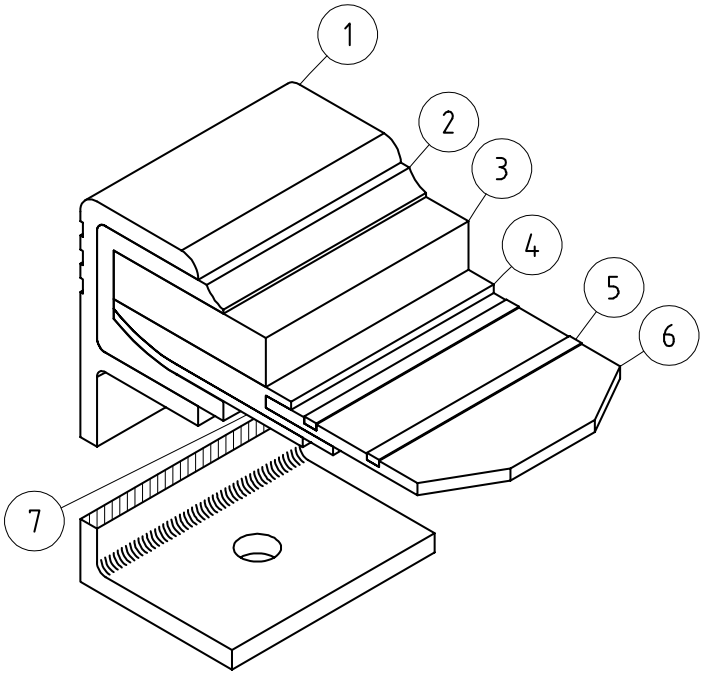
Figura 3.6 Representação do fator de forma de uma célula e sua fórmula de cálculo.

3.3 Módulos Fotovoltaicos

Muitas vezes as aplicações da eletricidade fotovoltaica exigem que o abastecimento de energia ocorra em tensões e correntes maiores do que as que podem ser fornecidas por uma única célula, que devido às suas características típicas são em torno de 0,5 V de tensão e de 3,0 A de corrente máxima para uma área de 100 cm^2. Portanto, para que a utilização das células seja viável, é necessário que elas sejam conectadas umas às outras de modo que forneçam a tensão necessária para as aplicações às quais se destinam. Um determinado número de células solares conectadas umas às outras, montadas em uma estrutura modular de tamanho conveniente para o transporte, manejo e suporte é chamado de módulo fotovoltaico.

Na Figura 3.7 está representado o corte esquemático de um módulo fotovoltaico com a indicação de seus componentes. Na parte frontal do módulo é colocado vidro temperado e anti-reflexivo (3), fabricado com baixo conteúdo de ferro. Logo atrás do vidro é colocada uma camada de acetato de vinil etileno (EVA), um polímero transparente, isolante e termoplástico, chamado de encapsulante (4) e que é necessário para proteger os contatos metálicos (5) e as células (6). Na região posterior é colocada uma camada de plástico Tedlar (2). Todo o conjunto é

montado em uma moldura de alumínio (1) que serve para a sustentação mecânica de todas as células montadas, para a proteção contra as intempéries, para transporte e para dissipar calor. Outra finalidade da moldura de alumínio é de facilitar a fixação dos módulos nas estruturas de suporte que formam os painéis fotovoltaicos. A tecnologia hoje empregada permite um tempo de vida útil para os módulos em uma faixa acima de vinte anos.



1 Estrutura

2 Tedlar

3 Vidro Anti-reflexivo

4 Encapsulante

5 Contato Metálico

6 Célula

7 Espaçador

Figura 3.7 Corte esquemático de um módulo fotovoltaico.

A figura 3.8 mostra o esquema de conexão de células ou módulos fotovoltaicos em série. Nesse tipo de ligação a corrente que flui através do circuito é igual em todos os pontos, enquanto que a tensão é aditiva, ou seja, a tensão final é obtida somando a tensão de cada célula do módulo.

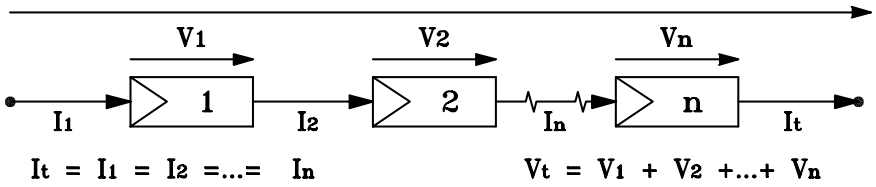


Figura 3.8 Conexão de células ou módulos em série.

A figura 3.9 mostra o esquema de conexão de células ou módulos fotovoltaicos em paralelo. Nessas ligações o valor da tensão do módulo é exatamente igual à tensão da célula enquanto que a corrente passa a ser aditiva, ou seja, a corrente final é igual ao somatório das correntes em cada célula.

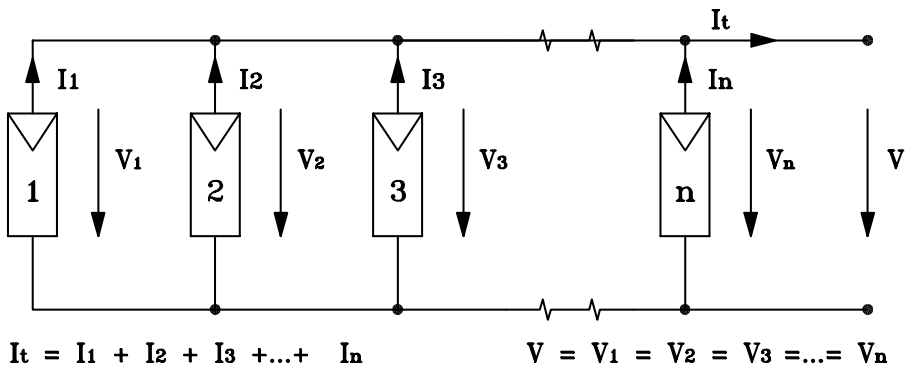


Figura 3.9 Conexão de células ou módulos em paralelo.

Sendo o módulo formado por uma associação de células fotovoltaicas, o seu comportamento elétrico também é caracterizado pelas curvas I & V e Pot & V, quando submetido a determinadas condições padronizadas de irradiância solar, distribuição espectral (massa de ar) e temperatura da célula [Lorenzo, 1991 e Sandia, 2001]. As condições padronizadas, de uso corrente e universal, são as seguintes:

Irradiância = 1000 W/m^2 Massa de Ar = AM 1,5 Temperatura da célula = 25°C

Nas condições acima especificadas são medidos os parâmetros que servem para caracterizar um módulo fotovoltaico. Conforme o GETEF, 1995, os parâmetros de caracterização são os seguintes :

1 corrente de curto circuito, I_{SC}, é a máxima corrente gerada pelo módulo para zero de potência;

2 tensão de circuito aberto, V_{OC}, é a máxima tensão produzida pelo módulo;

3 corrente de máxima potência, I_{MP};

4 tensão de máxima potência, V_{MP};

5 máxima potência do módulo, P_{MP}.

O gráfico da Figura 3.10 mostra as curvas características I & V fornecidas pelo fabricante para o módulo SP 75, usado nesse trabalho e cujas especificações serão descritas no capítulo 5, quando submetido às irradiâncias de 1000 W/m^2 nas temperaturas de 25, 45 e 60 °C respectivamente e 800 W/m^2 na temperatura de 45 °C. A figura mostra também o efeito que a temperatura tem sobre a produção de potência no módulo. O efeito da temperatura se manifesta principalmente sobre a tensão do módulo.

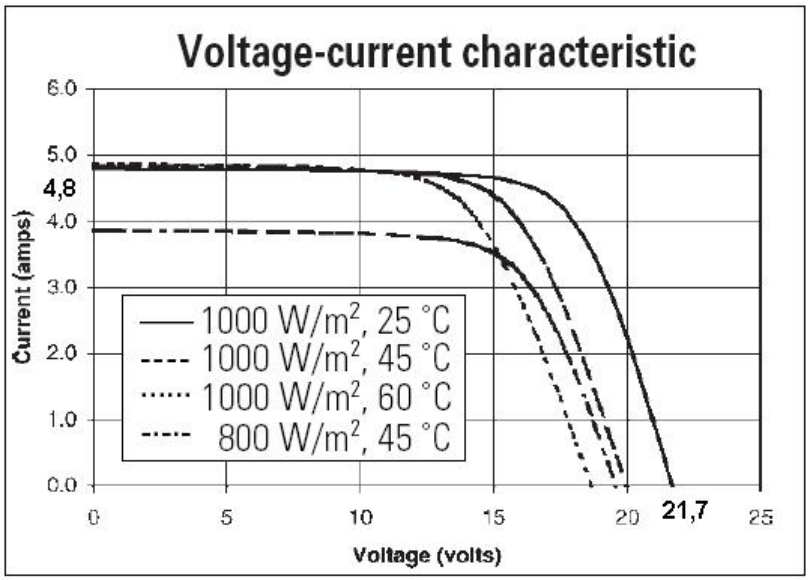


Figura 3.10 Curvas de corrente e tensão de um módulo SP 75, dados do fabricante.

A Figura 3.11 mostra as curvas características de corrente e tensão e potência e tensão, para um módulo quando submetido a certas condições de temperatura e irradiância

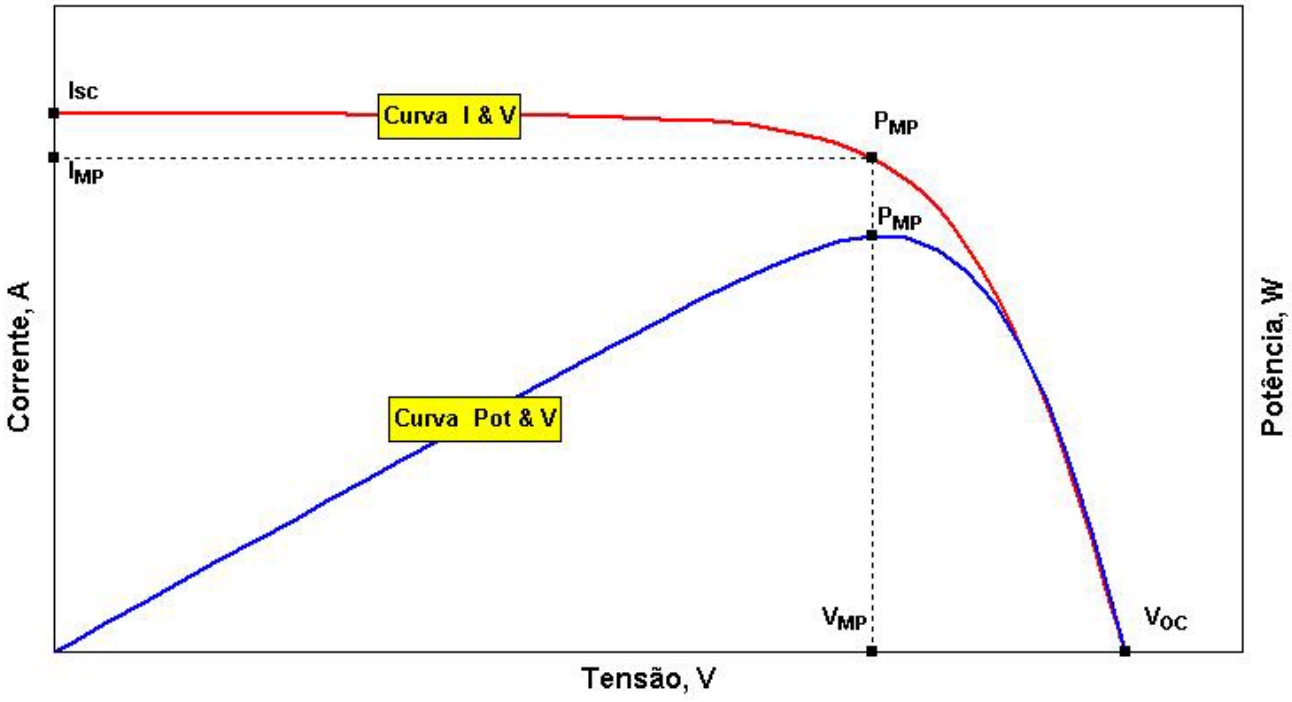


Figura 3.11 Curvas características I & V e Pot & V de um módulo fotovoltaico. Adaptado de Sandia, 2001.

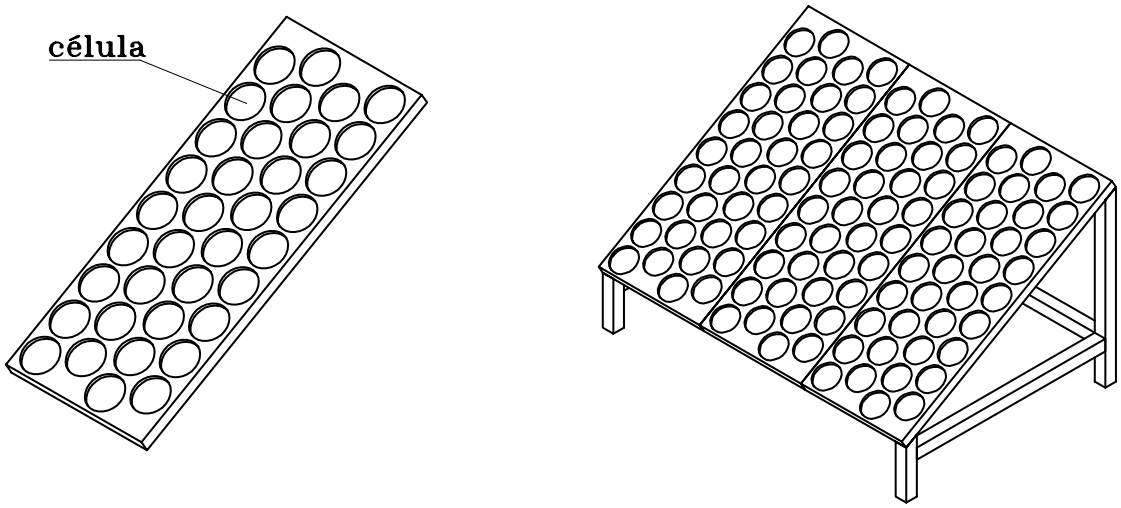
Assim como para as células fotovoltaicas, os pontos I_{SC}, V_{OC}, I_{MP}, V_{MP} e P_{MP} são pontos notáveis e junto com as curvas servem para caracterizar eletricamente um módulo fotovoltaico.

Tanto quanto para as células fotovoltaicas, a grandeza que expressa o quanto o polígono limitado pela curva I & V e pelos eixos cartesianos se aproxima de um retângulo é denominada de fator de forma (FF).

3.5 Arranjos fotovoltaicos

Chama-se de arranjo fotovoltaico a um conjunto de módulos fotovoltaicos montados sobre uma estrutura de suporte, fixa ou móvel, eletricamente ligados entre si e que funciona como uma só unidade produtora de eletricidade.

As estruturas móveis controladas e adequadamente orientadas levam a uma produção maior de energia coletada durante o dia, pois permitem aos painéis fazer o seguimento do movimento do Sol. Entretanto, essas estruturas requerem equipamentos complexos e de custo mais elevado.



(a) Módulo (b) Arranjo de três módulos

Figura 3.12 Representação esquemática simplificada do módulo (a) e do arranjo fotovoltaico (b).

Um arranjo fotovoltaico pode ser formado por um ou mais módulos fotovoltaicos. No caso do arranjo ser formado por mais de um módulo, eles deverão ser adequadamente conectados entre si, em série e/ou em paralelo, de modo a fornecer a potência necessária para o fim a que se destinam. Para um mesmo nível de radiação solar coletada no plano dos módulos fotovoltaicos, a corrente, a tensão e, por conseqüência, a potência de um arranjo serão modificadas conforme a conexão elétrica for em série ou em paralelo. Quando a conexão for em série haverá incremento de tensão e a corrente permanece constante. Se a conexão for feita em paralelo, haverá adição de corrente e a tensão se mantém constante.

As curvas representadas na Figura 3.13 mostram as características de corrente e tensão para dois, três e quatro módulos ligados em paralelo e em série respectivamente.

A determinação dos parâmetros elétricos das associações foi feita considerando que os módulos sejam padronizados, ou seja, que todos apresentem exatamente o mesmo comportamento elétrico. O desempenho de um arranjo fotovoltaico, expresso em forma de potência de saída, não depende somente da maneira como os módulos estão conectados entre si, se em série e/ou em paralelo. Depende também das condições atmosféricas reinantes no local da instalação, da sua orientação geográfica, da inclinação em relação ao plano horizontal, da qualidade dos componentes elétricos utilizados, do adequado dimensionamento de cabos e fios elétricos, da qualidade das ligações elétricas, da manutenção e da padronização dos módulos fotovoltaicos.

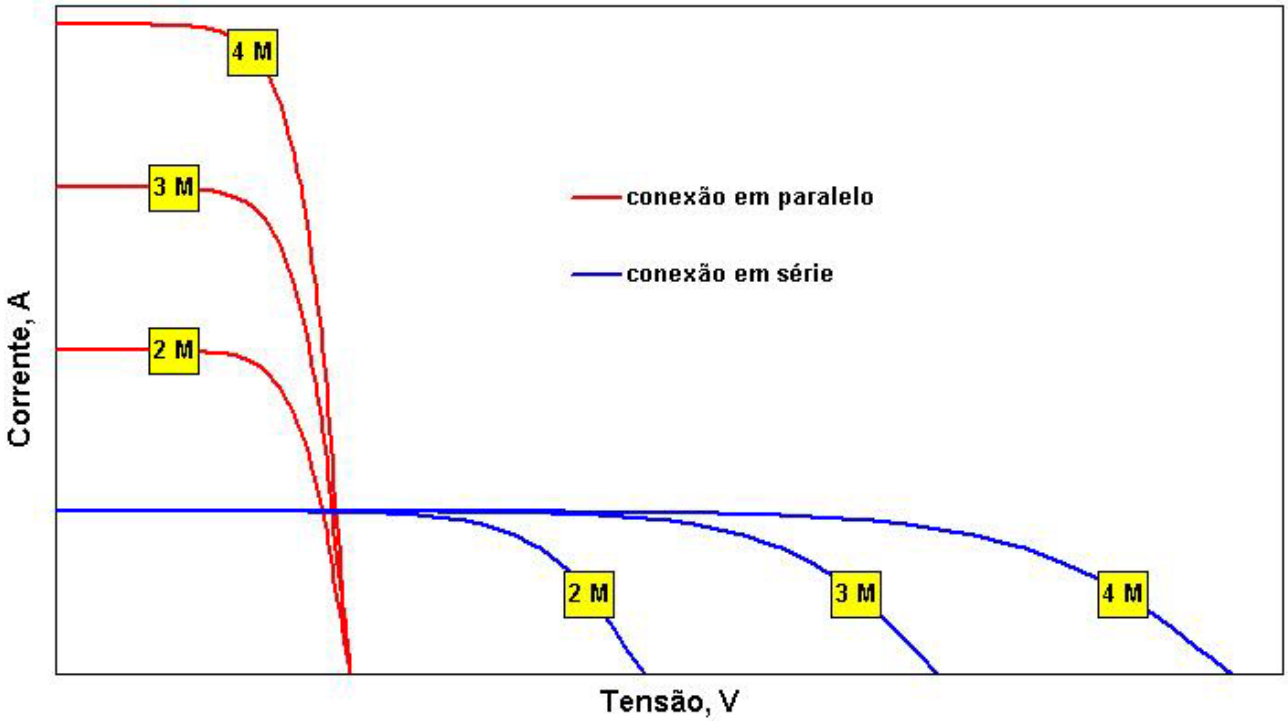


Figura 3.13 Associação de módulos em série e em paralelo.

No que se refere à padronização, Lorenzo, 1991, comenta que os cálculos sobre módulos fotovoltaicos são baseados na presunção de que todas as células e módulos de um gerador fotovoltaico são iguais e trabalham em idênticas condições de operação. Comenta também, que isso muitas vezes não acontece, pois as células apresentam certas diferenças em suas características e que existem pelo menos duas razões para isso: por um lado, a natural dispersão de parâmetros, própria de qualquer processo de fabricação e, por outro, as diferentes condições de operação que podem ocorrer dentro do gerador. Exemplos dessa última consideração são as sombras e a sujeiras que podem ocorrer sobre os módulos. Tanto o sombreamento quanto a

sujeira impedem que todas as células recebam a mesma quantidade de radiação solar. O efeito disso se manifesta por meio de uma redução na potência de saída do módulo, pois é a célula menos iluminada que determina a intensidade de corrente de operação de todo o conjunto.

Os arranjos fotovoltaicos são usados para fornecer a potência necessária para operar uma determinada carga. Um conjunto de fatores deve ser levado em consideração para definir quantos módulos são necessários para fornecer energia confiável, de baixo custo e durante todo o ano. Inicialmente, é preciso saber qual o comportamento da carga, ou seja, quanto de energia ela necessita. Quando a carga é alimentada pela rede convencional de energia elétrica, irá operar em uma determinada tensão nominal e irá consumir uma específica intensidade de corrente. Entretanto, as cargas alimentadas por energia solar têm, na maioria das vezes, consumo variável e não previsíveis. Essas características são de relevante importância e devem, portanto, ser muito bem equacionadas.

A potência de saída de um arranjo fotovoltaico é dependente, entre outros, da energia solar incidente. Essa energia é variável conforme as estações do ano, a localização geográfica, as condições climáticas, a inclinação em relação ao plano horizontal e a orientação em relação à linha Norte (Verdadeiro)-Sul. No verão, o sol brilha por um maior número de horas ao dia e, como ele está mais ao alto, há menos atmosfera para atravessar e, conseqüentemente, menos perdas por absorção e reflexão. O resultado é a abundância de energia solar incidente. No inverno, o sol brilha por menos horas ao dia e também está mais baixo no céu, o que implica uma camada mais espessa de atmosfera para atravessar, logo, mais perdas. O resultado, então, é que há muito menos energia incidente sobre o plano dos arranjos fotovoltaicos. Essa variação sazonal pode ser minimizada por meio da adequação do ângulo de inclinação do arranjo fotovoltaico em relação ao plano horizontal. Desse modo, o melhor ângulo é aquele que favorece mais no inverno, pois maior será a incidência de luz e, conseqüentemente, maior a produção de energia. Para que os sistemas de bombeamento apresentem um bom desempenho é necessário determinar o melhor ângulo de inclinação que melhor satisfaça a relação entre a energia incidente e a energia hidráulica demandada ao longo de todo um ano [Alonso et al., 1992]. Isso exige que se tenha registro das energias hidráulicas necessárias e das energias solares incidentes sobre superfícies inclinadas em diferentes ângulos para cada mês. O ângulo de inclinação ótimo do arranjo fotovoltaico é determinado por meio da comparação das relações entre a energia hidráulica necessária e a energia solar disponível para cada mês e cada inclinação [Chenlo, 1992]. Entretanto, uma regra prática recomenda que arranjos fotovoltaicos localizados no hemisfério sul devam ter para a inclinação o valor absoluto da latitude do local acrescido de 15° e sejam orientados para o Norte Verdadeiro [Duffie et al., 1991].

Inclinação do arranjo = |Latitude Local| + 15° (face para o Norte Verdadeiro)

Outro fator que influencia sobre a quantidade de energia coletada é o desalinhamento dos arranjos em relação à linha Norte (Verdadeiro) – Sul. Um desalinhamento da ordem de até 15° constitui um bom limite prático para a instalação de módulos solares planos fixos [Fraidenraich et al., 1992].

Uma série de outros fatores influencia na potência de saída de um arranjo fotovoltaico. Dentre esses fatores convém ressaltar o sombreamento e a temperatura dos módulos. Para os módulos fotovoltaicos nos quais as células são conectadas em série, até mesmo um sombreamento parcial pode reduzir significativamente a potência de saída, pois a célula com a menor iluminação é que determina a intensidade de corrente de operação. O efeito do sombreamento sobre a potência de saída é similar ao causado por um estrangulamento em uma tubulação de água. Outro fator que influencia na potência de saída é o aumento da temperatura do módulo. Um acréscimo de temperatura da ordem de 1,0°C acima da temperatura padrão de 25°C pode reduzir a eficiência por volta de 0,5% [Sandia, 2001]. Também o movimento aparente do sol ao longo do dia ocasiona variações na potência de saída. Nas primeiras horas do dia, como a irradiância é baixa, a geração de potência será pouca. Com o passar das horas e pelo movimento aparente do sol haverá o aumento da irradiância e a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico também aumentará, até um valor máximo que ocorre por volta do meio-dia. À tarde, com o natural e gradativo decréscimo da irradiância haverá uma conseqüente diminuição da geração.

Na Figura 3.14, estão representadas as curvas de irradiância solar para os dias 21 e 25 de novembro de 2003 respectivamente. Os dois dias apresentavam condições atmosféricas distintas, um dos dias sem nuvens e o outro parcialmente coberto por elas. No dia limpo, a irradiância aparece como contínua e estável, sendo ascendente até por volta do meio dia e, depois, descendente até o entardecer. No dia nublado, é totalmente instável, apresentando, alternadamente, regiões ascendentes, onde ocorrem picos de maiores irradiâncias e regiões descendentes, onde ocorrem picos de baixa irradiância.

Pode-se observar que, para o dia nublado, os efeitos da absorção e da reflexão dos raios solares ocasionados pelas nuvens, gases e partículas em suspensão na atmosfera, são maiores do que para o dia de céu limpo. Esses efeitos, associados aos outros anteriormente relacionados, influenciam seletivamente na radiação, fazendo com que a incidência da radiação solar diminua no plano dos módulos fotovoltaicos.

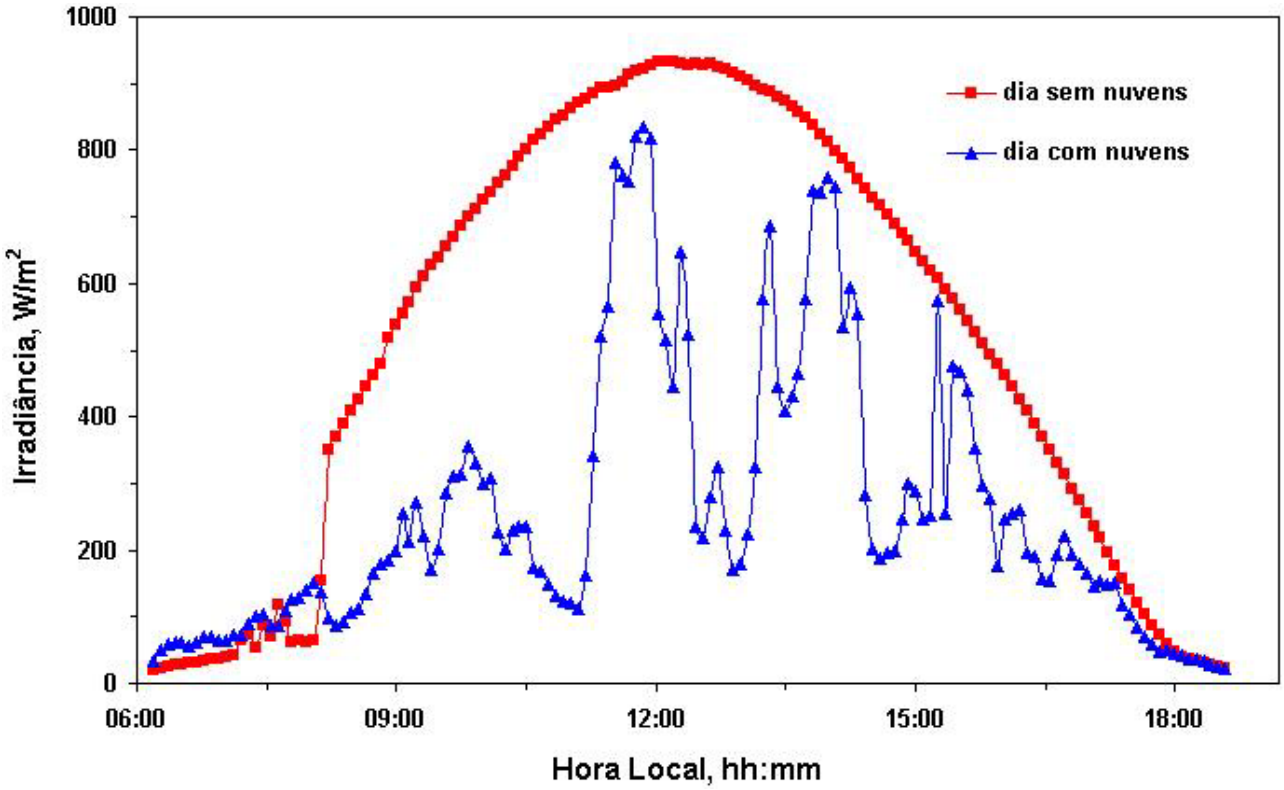


Figura 3.14 Curvas características de irradiâncias medidas ao longo de dois dias com condições atmosféricas distintas, módulos inclinados em relação ao plano horizontal e orientados para o Norte.

Um arranjo fotovoltaico é uma fonte de potência na qual tanto a tensão quanto a corrente sofrem constantes variações, principalmente em função do nível de radiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos. Assim sendo, o ponto de operação do sistema (arranjo fotovoltaico associado com o conjunto motor e bomba) muda sempre que ocorrer qualquer alteração expressiva na corrente e na tensão.

Para esse trabalho, a fonte de potência é formada pelo arranjo dos módulos fotovoltaicos. Foram usados dois arranjos fotovoltaicos distintos, um para a bomba de diafragma e outro para a bomba centrífuga, sendo que para ambos os arranjos foram usados módulos da marca SIEMENS, modelo SP75, cujas características serão descritas no Capítulo 4. A montagem de cada arranjo fotovoltaico, que neste trabalho também será chamada de sistema de potência, dependeu das características próprias dos módulos assim como das cargas neles conectadas.

A quantidade de módulos usada na construção de cada um dos arranjos fotovoltaicos obedeceu ao critério de que cada arranjo deveria produzir uma potência, em forma de tensão e de corrente, suficientemente alta para operar satisfatoriamente os conjuntos motores e bombas, ou seja, realizar o bombeamento da água.

3.5 Sistemas de bombeamento

O bombeamento pode ser definido como a adição de energia a um fluido para movimentá-lo de um ponto a outro. A energia adicionada ao fluido ocasiona que ele realize trabalho, normalmente escoando por uma tubulação ou sendo elevado até um nível mais alto [Karassik et al., 1998].

Os sistemas de bombeamento fotovoltaico requerem, além do conjunto de módulos devidamente arranjados, um motor que transforme a energia elétrica em energia mecânica e essa seja transmitida à bomba onde será transformada em energia hidráulica. Um sistema típico de bombeamento fotovoltaico com acoplamento direto divide-se em:

1 sistema de potência, constituído do arranjo fotovoltaico;

2 sistema de bombeamento, constituído do conjunto motor e bomba;

3 equipamentos complementares formados por dispositivos elétricos e hidráulicos.

As posições dos motores e das bombas em relação ao nível da água a ser bombeada são as seguintes:

1 motor e bomba submersos;

2 bomba submersa com motor de superfície;

3 motor e bomba flutuantes;

4 motor e bomba de superfície.

A figura 3.15 mostra a instalação típica de motor e bomba de superfície. Note-se que os eixos da bomba e do motor estão acima do nível da água, isso configura que a sucção é negativa.

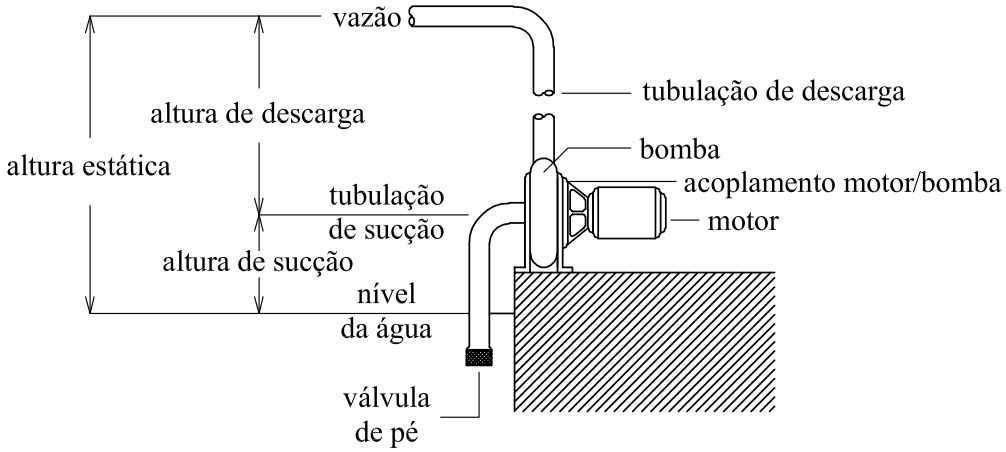


Figura 3.15 Instalação típica de motor e bomba de superfície.

Para os experimentos realizados nesse trabalho foram adotadas as configurações de motores e bombas de superfície.

3.6 Bombas

Conforme Mattos et al., 1998, as bombas são máquinas operatrizes hidráulicas que conferem energia ao líquido com a finalidade de transportá-lo de um ponto para outro obedecendo às condições do processo. As bombas recebem energia de uma fonte motora qualquer e cedem parte dessa energia ao líquido sob forma de energia de pressão, energia cinética ou de ambas, ou seja, elas aumentam a pressão e a velocidade do líquido.

Dois tipos de bombas foram objetos do estudo dessa dissertação. Em um dos experimentos foi usada uma bomba volumétrica de diafragma, da marca SHURFLO, modelo 8000-443-136 e que nesse trabalho será chamada de bomba de diafragma. No outro, foi usada uma bomba centrífuga de fluxo radial com impelidor tipo fechado, da marca BECK, previamente encomendada para este experimento e que nesse trabalho será chamada de bomba centrífuga. Ambas as bombas são descritas no Capítulo 4. Na bomba centrífuga foi colocado um suporte para que pudesse ser adaptado um motor de acionamento. O motor usado nessa bomba foi originalmente projetado para acionar ventiladores de arrefecimento de automóveis. Ao serem acionados, os motores administravam as potências mecânicas às partes móveis das bombas que às transformavam em energia hidráulica, fazendo com que o fluido fosse transportado pelos sistemas de tubulações de aspiração ou sucção e de recalque ou descarga, projetados para os experimentos.

Existem, na realidade, grandes diferenças na maneira de operar dentre os diferentes tipos de bombas, assim como uma série de características próprias aos diversos tipos que melhor as qualificam para um ou outro serviço. Entretanto, a finalidade principal destes equipamentos é de movimentar certa quantidade de fluido para dentro de um sistema.

A seguir faz-se a descrição sucinta dos dois tipos de bombas usadas nesse trabalho, (1) centrífuga radial com impelidor fechado, (2) volumétrica de diafragma. Essas bombas são descritas no Capítulo 4.

3.6.1 Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas são os tipos mais comuns e podem ser usadas nas mais diversas aplicações. Nessas bombas a energia fornecida ao líquido é do tipo cinética sendo mais tarde convertida em energia de pressão. A Figura 3.16 mostra o corte esquemático de uma bomba centrifuga onde estão mostrados os componentes principais, carcaça e impelidor, assim como as regiões de formação de altas e baixas pressões, a linha do fluxo do fluido e a voluta. O nome voluta (curva jônica) deriva do formato como a carcaça é modelada.

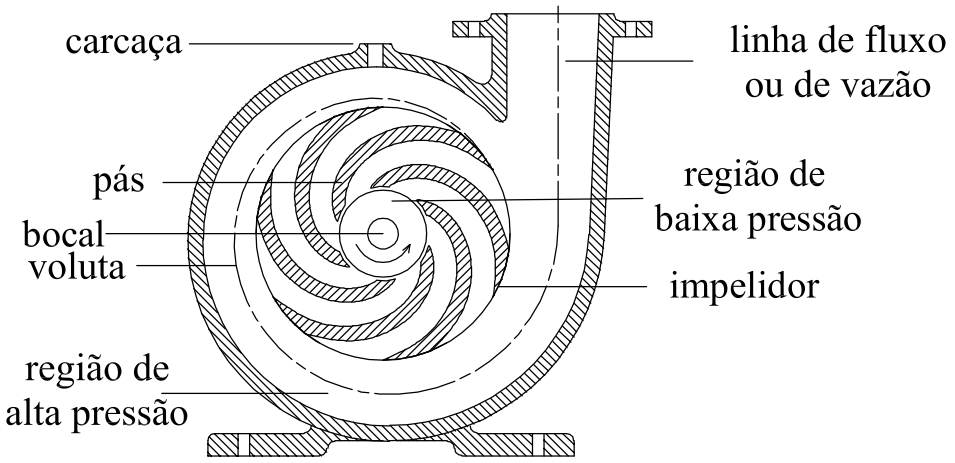


Figura 3.16 Corte esquemático de uma bomba centrífuga, aparecendo os principais componentes, as regiões de formação de pressões, a voluta e a linha de fluxo ou vazão.

As partes fundamentais deste tipo de bomba são: o rotor, também chamado de impelidor e a carcaça. Os impelidores são constituídos de palhetas ou pás, que podem ter vários formatos. Karassik et al., 1985, classifica os impelidores, de acordo com o projeto mecânico, em: (1) abertos, (2) semiabertos e (3) fechados. A carcaça serve de alojamento para o impelidor e de depósito para o líquido que está sendo movimentado. Nessas bombas, a energia mecânica fornecida pelo motor ao impelidor é transmitida ao líquido lhe conferindo energia cinética. Para que haja o funcionamento da bomba é necessário que a o impelidor esteja completamente envolto pelo líquido e para que isto aconteça a carcaça deve estar cheia dele – diz-se escorvada (a escorva consiste em substituir o ar ou gases do interior da bomba e da tubulação de sucção pelo líquido a ser bombeado). O funcionamento destas bombas está associado à criação de regiões de baixa e alta pressão dentro da carcaça em conseqüência do movimento de rotação do impelidor. Pela rotação do impelidor e conseqüente ação da força centrífuga, as moléculas do fluido são conduzidas para a periferia das pás ou palhetas onde se cria a região de alta pressão. O movimento das moléculas faz com que se crie um vazio associado a uma região de baixa pressão no centro do impelidor. Essa região de baixa pressão será continuamente preenchida com o líquido proveniente da tubulação de sucção, estabelecendo-se com isto o ciclo de funcionamento da bomba. A característica marcante destas bombas é que a vazão é função do projeto da bomba, das características do sistema em que está atuando e da rotação da qual o impelidor está animado. Ressaltando-se que a variação da rotação do impelidor é conseqüência direta da quantidade de energia elétrica fornecida pelo gerador ao motor.

3.6.2 Bombas Volumétricas de Diafragma

Nas bombas volumétricas de diafragma o líquido é sucessivamente admitido e expulso de uma câmara existente dentro delas. A Figura 3.17 mostra o corte esquemático de uma bomba de diafragma acionada por pistão onde aparecem em destaque a membrana flexível ou diafragma, as válvulas de entrada ou de controle de admissão e de descarga ou de expulsão e a câmara.

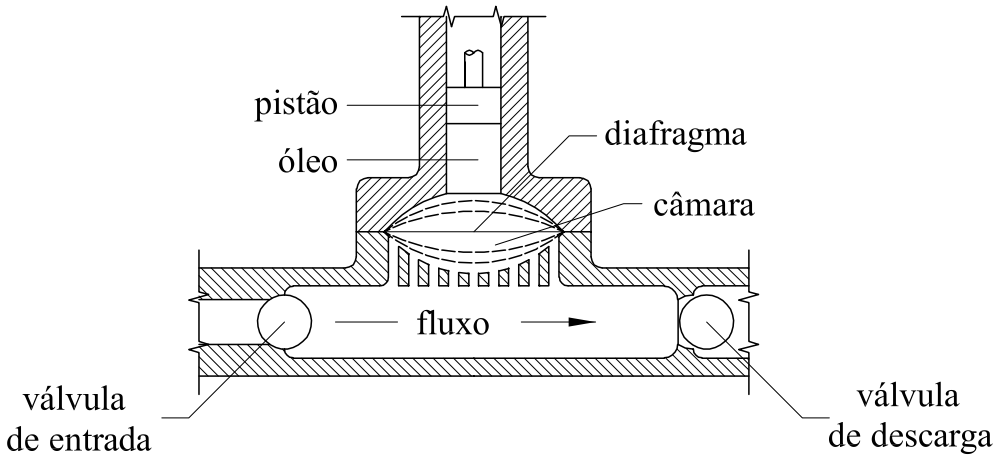


Figura 3.17 Corte esquemático de uma bomba volumétrica de diafragma, aparecem em destaque a membrana flexível ou diafragma, a câmara e as válvulas que controlam a admissão e expulsão do líquido. As linhas pontilhadas indicam sucessivas posições do diafragma. Adaptado de Pumps & Systems, 2000.

As partes fundamentais são: a membrana flexível, chamada de diafragma e a câmara que recebe o líquido que é constantemente empurrado para o seu interior. Assim sendo, todo o deslocamento do líquido é realizado graças ao movimento do diafragma, que força o líquido a realizar o mesmo movimento do qual ele está animado. Uma válvula de abertura e outra de fechamento controlam a vazão do líquido bombeado para dentro e para fora da câmara. No caso destas bombas não existe a transformação de energia cinética em energia de pressão, pois o movimento do diafragma fornece ao líquido a energia já em forma de pressão.

O acionamento do diafragma pode ser feito por dispositivos mecânicos, eletro-magnéticos, por ar comprimido ou por fluido hidráulico.

As bombas de diafragma são auto-escorvantes e podem iniciar a funcionar mesmo com a câmara vazia de líquido, sem perigo de sofrer avarias, o que não acontece com as bombas centrífugas. Uma das características destas bombas está no fato de manterem a vazão média praticamente constante, independentemente do sistema em que elas atuam.

3.6.3 Características operacionais das bombas estudadas

Pode-se dizer que as bombas volumétricas são usadas para pequenas vazões e grandes alturas, enquanto que as bombas centrífugas são usadas para maiores vazões e pequenas alturas. As bombas centrífugas apresentam a característica de que o intervalo de variação de vazão é bastante amplo, ou seja, a vazão depende muito da resistência oferecida pelo sistema. Nas bombas volumétricas acontece o contrário, a vazão depende muito pouco da resistência oferecida pelo sistema. Como exemplo de resistência, pode-se citar o grau de fechamento ou de abertura de uma válvula de controle de vazão instalada junto à tubulação de descarga ou recalque do sistema de bombeamento.

A Figura 3.18 apresenta as curvas de vazão e altura para as bombas centrífuga e volumétrica, respectivamente.

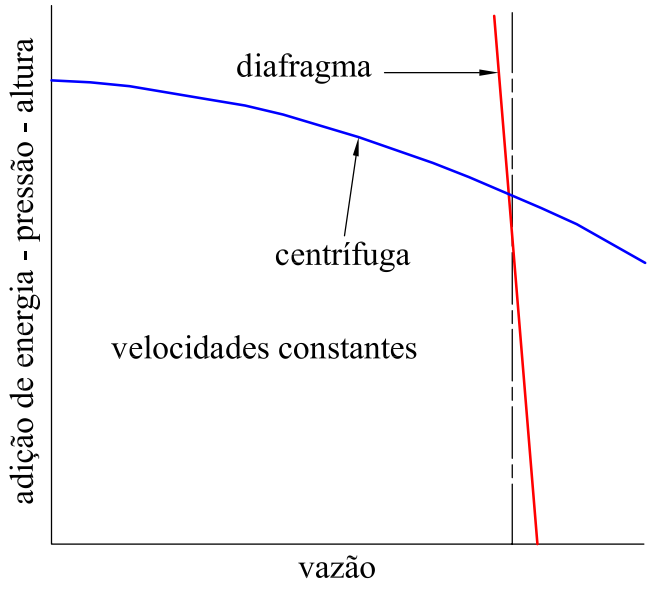


Figura 3.18 Características de vazão e altura para as bombas centrífuga e volumétrica. Adaptado de Karassik et al., 1998.

As mais importantes características operacionais de um conjunto motor e bomba são: a vazão Q, a altura H, a potência Pot e a eficiência η. Essas características são dependentes do grau de abertura da válvula de controle de vazão ou da perda de carga do sistema, da velocidade do impelidor e do seu diâmetro.

A vazão Q representa o volume de líquido por unidade de tempo entregue pela bomba. As unidades usuais são m^3/s, L/s e L/min.

A altura H representa o trabalho realizado por uma unidade de peso de líquido ao passar pelo bocal de sucção (entrada da bomba) e atingir o bocal de descarga (saída da bomba). A unidade usual é de metro de coluna de água.

O valor da altura é dado por:

$$H = \left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z \right)_d - \left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z \right)_s \tag{3.4}$$

Onde p representa a pressão, Pa; γ representa o peso específico, N/m^3; v representa a velocidade média , m/s; g representa a aceleração da gravidade, m/s^2 e Z representa a altura em relação ao plano horizontal que passa pelo eixo da bomba, m.

O primeiro termo entre parênteses na equação 3.4 representa a altura de descarga, h_d, o segundo termo entre parênteses representa a altura de sucção, h_s. De acordo com Karassik et al., 1986, a diferença é chamada de *altura de bombeamento*, *altura total de bombeamento* ou *altura dinâmica total.*

A potência elétrica Pot_e, para motores alimentados por corrente contínua, é dada por:

$$Pot_e = V.I \tag{3.5}$$

onde V representa a tensão, e I representa a corrente.

A potência hidráulica Pot_h, é dada por:

$$Pot_h = \rho.g.Q.H \tag{3.6}$$

onde ρ é massa específica da água, em kg/m^3; g é a aceleração da gravidade, m/s^2; Q é a vazão em m^3/s e H é a altura em mca.

A eficiência do conjunto motor e bomba η é dada por:

$$\eta = \frac{Pot_h}{Pot_e} \tag{3.7}$$

A eficiência do conjunto motor e bomba, corresponde à relação existente entre a potência cedida pela bomba ao líquido (potência hidráulica ou da bomba) e a potência que foi recebida da fonte motora (potência elétrica). Essa medida pode ser expressa como um número decimal, ou multiplicada por 100 e expressa como percentual.

A caracterização das bombas e dos sistemas de bombeamento é feito por meio das seguintes curvas:

1 Para as bombas

1.1 altura & vazão (H & Q_{bomba}), para tensões (velocidades) constantes, mostrando a relação entre vazão e altura total, sendo chamada de curva altura - vazão.

1.2 potência & vazão (Pot & Q_{bomba}), para tensões (velocidades) constantes, mostrando a relação entre a potência de entrada e a vazão da bomba, sendo chamada de curva potência vazão ou de curva de potência;

1.3 eficiência & vazão (η & Q_{bomba}), para tensões (velocidades) constantes, mostrando a relação entre a eficiência do conjunto motor e bomba e a vazão, sendo chamada de curva de eficiência e vazão ou de curva de eficiência.

2 Para os sistemas

2.1 altura & vazão (H & $Q_{sistema}$), para tensões (velocidades) variáveis, mostrando a relação entre a vazão e a altura do sistema de bombeamento, sendo chamada de curva de altura do sistema. Compreende-se por altura do sistema de bombeamento as perdas devidas ao atrito nas tubulações e acessórios em geral, às diferenças de pressão e à altura estática.

3 Para os motores

3.1 corrente e tensão (I & V), para alturas constantes.

Todas as curvas acima referenciadas são usualmente feitas desde a vazão zero até a máxima possível para o equipamento.

A Figura 3.19 mostra as curvas de desempenho de uma bomba. Elas representam as relações existentes entre vazão, altura, potência e eficiência do conjunto motor e bomba, segundo Karassik et al., 1998, são chamadas de curvas características da bomba.

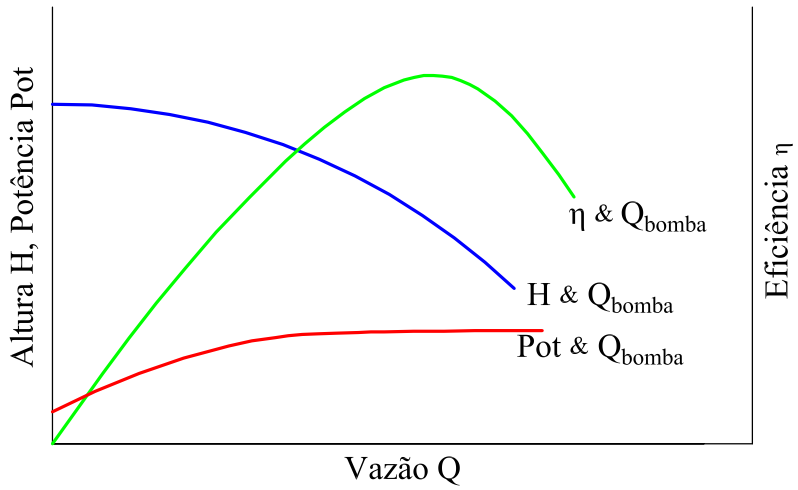
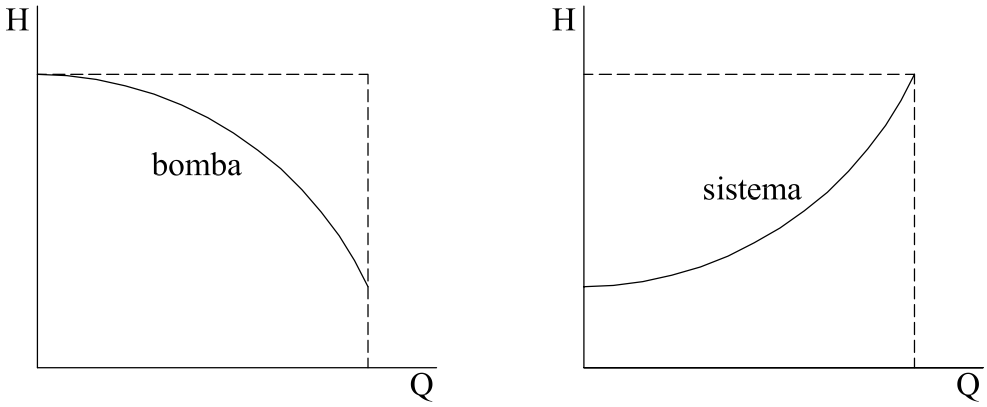


Figura 3.19 Curvas características de uma bomba centrífuga. Essas curvas são obtidas com velocidades constantes.

A Figura 3.20 mostra as curvas características H & Q de uma bomba centrífuga e de um sistema de bombeamento. Note-se que a curva da bomba é descendente enquanto que a curva do

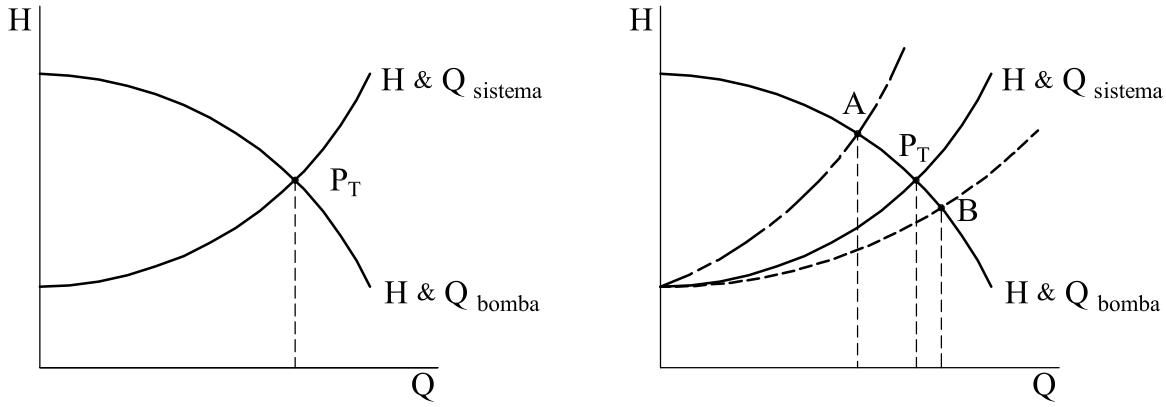
sistema é ascendente.



(a) (b)

Figura 3.20 Curvas características H & Q de uma bomba centrífuga (a) e de um sistema de bombeamento (b). A curva da bomba é obtida com velocidade constante e a curva do sistema com velocidade variável.

Na figura 3.21 (b), A e B representam posições de operações afastadas do ponto de trabalho P_T. Quando a posição operacional ocorre à esquerda de P_T, posição A, aumenta a altura e reduz a vazão, sendo que a máxima altura ocorre no ponto de vazão zero (*shutoff*). Quando o ponto de operação ocorre à direita de P_T, posição B, a altura diminui e a vazão aumenta.



(a) (b)

Figura 3.21 A sobreposição da curva da bomba com a curva do sistema determina o ponto de trabalho da bomba (a), os pontos A e B representam possíveis variações na posição do ponto de trabalho (b).

A vazão que uma bomba será capaz de entregar quando submetida à variadas condições

operacionais pode ser prevista pela sobreposição da curva do sistema com a curva altura – vazão da bomba. O ponto de encontro das duas curvas é chamado de ponto de trabalho, P_T. Uma bomba sempre irá operar na interseção dessas duas curvas, conforme mostrado na Figura 3.21.

A variação da posição do ponto de trabalho pode ser devida à modificação da curva de altura do sistema e da curva de altura – vazão da bomba. A mudança da curva de altura do sistema pode ser obtida pela obstrução ou abertura da válvula de controle de vazão, com conseqüente incremento ou decréscimo da vazão e altura. A alteração da curva de altura – vazão da bomba pode ser obtida por alteração do projeto do impelidor – diâmetro e forma, assim como com a variação da rotação do eixo da bomba. De acordo com Fraenkel, 1986, o componente que mais influencia na curva característica de altura – vazão da bomba é o impelidor. A variação do ponto de trabalho acarreta alterações na eficiência do sistema.

As curvas características da bomba e a curva de altura do sistema são normalmente apresentadas sobrepostas, conforme a Figura 3.22.

De acordo com Cisneros, 1977, as curvas H & Q das bombas centrífugas são, de uma maneira geral, com tendência para a horizontal , enquanto que as mesmas curvas para uma bomba volumétrica de diafragma apresentam uma inclinação muito grande, ou seja, são quase verticais.

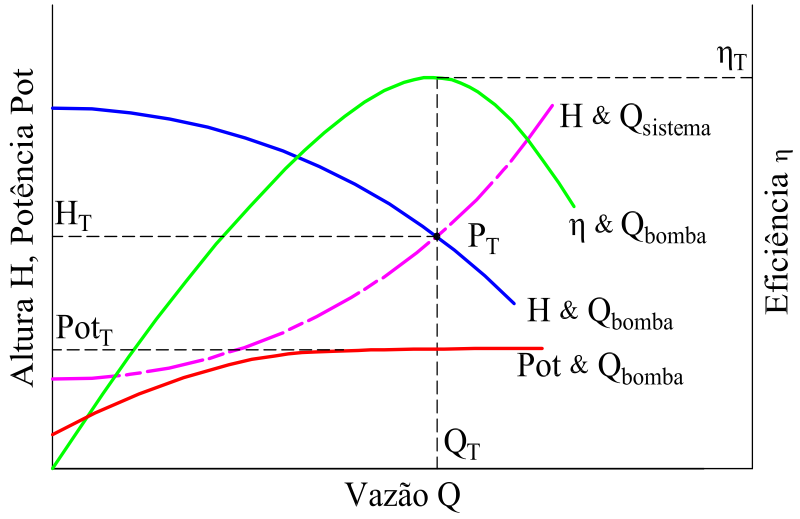


Figura 3.22 Sobreposição da curva de altura do sistema às curvas características da bomba. Nessas condições a bomba tem, no ponto de trabalho, a vazão Q_T, a altura H_T, a potência Pot_T e a eficiência η_T.

Quando a operação ocorre à direita de P_T, poderá ocorrer sobrecarga do motor, pois, nessa situação, a bomba estará trabalhando com maiores vazões e ao aumento de vazão

corresponde um incremento da corrente e isto poderá causar danos aos motores.

A Figura 3.23 mostra a variação de corrente com a vazão para a bomba centrífuga.

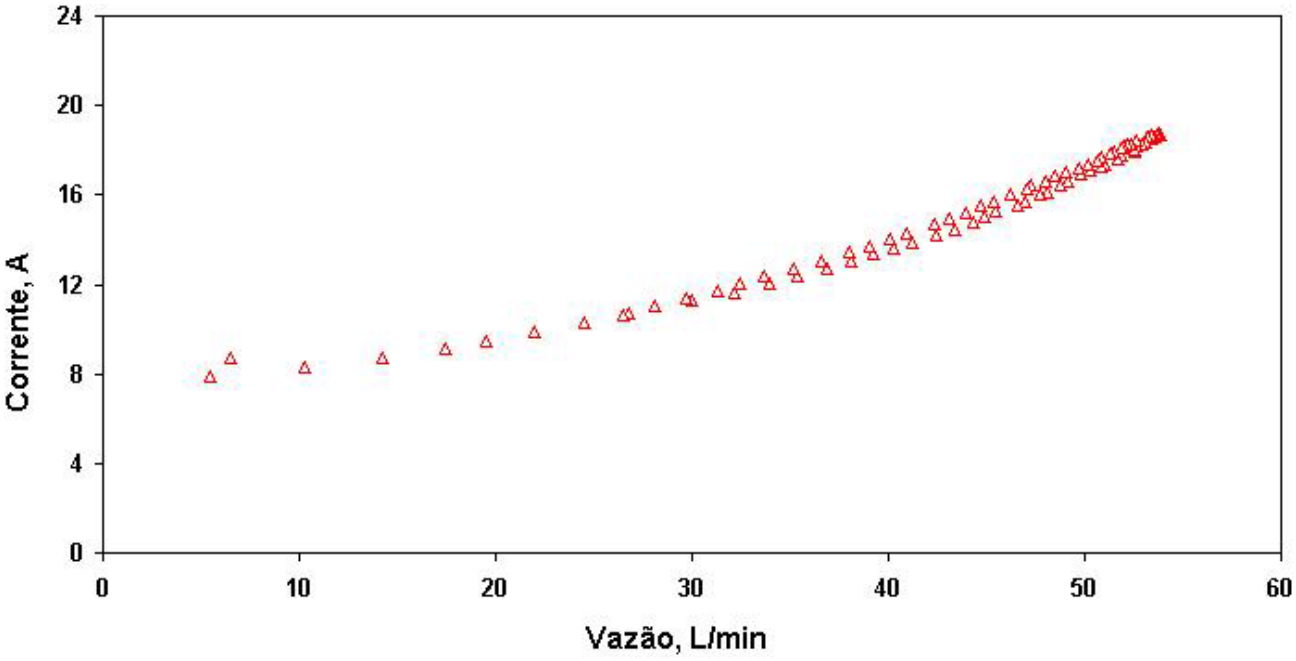


Figura 3.23 Variação da corrente com a vazão, para uma bomba centrífuga.

3.8 Acoplamentos

Quando um arranjo fotovoltaico que se encontra acoplado a uma carga externa é iluminado, produzir-se-á uma diferença de potencial na carga e uma circulação de corrente que sai para o circuito externo pelo terminal positivo e volta ao arranjo pelo negativo. Nessas condições de funcionamento, o arranjo funciona como um gerador de energia elétrica. Essa energia elétrica gerada é expressa em forma de corrente e de tensão, ou seja, de potência elétrica. É sabido que a corrente elétrica é proporcional á radiação solar incidente no plano do arranjo fotovoltaico, assim sendo, qualquer variação no nível de radiação ocasionará alterações na potência de saída do arranjo fotovoltaico. Logo, compreende-se que a carga será operada de acordo com a quantidade de radiação solar absorvida pelo arranjo fotovoltaico. Para o caso do bombeamento, a operação da carga é expressa pela vazão, ou seja, quanto maior for a incidência de radiação solar maior será a vazão registrada. Entretanto, se os arranjos fotovoltaicos de acoplamentos diretos forem superdimensionados, as correntes e tensões geradas poderão alcançar níveis acima dos suportados pelos motores, nos momentos em que a irradiância atingir picos de máxima. Como conseqüência disso, poderão ocorrer danos nos motores e nas bombas [Alonso et al., 1992]. Por outro lado, se as fontes de potência forem subdimensionadas o bombeamento poderá não ocorrer [D. Jaehnig et al., 1998] ou ocorrer em baixas vazões, o que

além de comprometer a eficiência do sistema como um todo também poderá causar avarias nos motores e nas bombas. Portanto, o bom dimensionamento dos arranjos fotovoltaicos é de fundamental importância para um acoplamento adequado, pois tem influência direta na segurança e proteção dos dispositivos e equipamentos, no custo das instalações e do volume bombeado assim como na eficiência do global do sistema de bombeamento.

Um sistema de bombeamento bem projetado deverá fornecer água a um baixo custo e com uma eficiência adequada. Conforme CIEMAT, 2000, as eficiências são classificadas em:

1 eficiência instantânea, definida como o quociente entre a potência hidráulica obtida e a potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico em um instante qualquer;
2 eficiência diária, definida como o quociente entre a energia hidráulica diária obtida e a energia elétrica diária fornecida pelo arranjo fotovoltaico.

A eficiência diária de um sistema de bombeamento fotovoltaico é afetada pelas mudanças que ocorrem na irradiância solar durante o período. Essas variações são determinadas pela quantidade de radiação solar coletada no plano dos módulos fotovoltaicos. As alterações na irradiância coletada são determinadas pelo ciclo diário de aparecimento e desaparecimento do sol e também pelas condições do clima reinantes durante o dia. A melhor eficiência diária e o maior volume diário bombeado, para sistemas bem projetados, são alcançados quando não existe interrupção no bombeamento ao longo do período.

Alonso, 1992, indica que para bombas de superfície, os valores médios e melhores valores diários de eficiência são 25 e 30% respectivamente. Esses valores são experimentais e estão baseados em um dia padronizado de 5 kWh/m^2 de radiação sobre superfície horizontal com uma irradiância pico de 700 W/m^2 e uma fração da radiação difusa de 34%. Para outros valores de irradiância ou condições climáticas adversas essas eficiências tendem a diminuir.

De acordo com Wildi, 2000, a única maneira de mudar a velocidade de um corpo em revolução é sujeitando-o a um torque por um determinado período de tempo. O torque é produzido quando uma força é exercida sobre um corpo, livre para movimentar, fazendo com que entre em rotação. No caso dos bombeamentos fotovoltaicos, para compreender o comportamento da corrente e tensão considere-se o que ocorre com um motor quando ele é ligado em uma fonte de potência. No momento da conexão, a armadura do motor que é formada por um eletroímã colocado no eixo e que tem baixa resistência elétrica, assim como as bobinas, são percorridas por uma alta corrente. Um campo magnético de forças é criado pelos imãs permanentes sendo que o somatório das forças eletromagnéticas produz o torque, o qual é responsável pela rotação da armadura. Entretanto, para que a armadura entre em movimento, a potência deverá ser tal que consiga vencer tanto a resistência elétrica por ela imposta, quanto às

perdas por fricção da bomba e das tubulações de sucção e de recalque e isso exige uma corrente de partida bastante alta, maior do que a corrente nominal de operação dos sistemas bombeamento, ocasionando, desse modo, picos de corrente [Chenlo et al., 1998]. Caso a corrente fornecida não seja suficientemente alta para permitir o início do movimento da armadura, não haverá o bombeamento. Nessas situações os motores poderão ser danificados se não forem utilizados dispositivos de segurança.

O comportamento das cargas é compreendido a partir do traçado e interpretação das curvas de corrente e tensão dos motores dos sistemas de bombeamento. A construção das curvas tem como objetivo a determinação do comportamento das cargas. Uma vez que as curvas estejam traçadas, elas servirão de ferramentas a serem usadas no dimensionamento adequado das fontes de potência, ou seja, dos arranjos fotovoltaicos.

Alonso, 1992, recomenda que o dimensionamento de um sistema de bombeamento fotovoltaico deve envolver os seguintes estudos:

1 necessidades de energia hidráulica;

2 energia solar disponível para diferentes inclinações;

3 determinação da inclinação ótima e do mês de dimensionamento;

4 cálculo da potência do gerador;

5 escolha do motor;

6 dimensionamento da bomba;

7 dimensionamento das tubulações de sucção e de recalque.

Uma vez obtidos os valores dos itens listados, se procede com a escolha dos componentes do sistema de bombeamento.

O procedimento que permite escolher o arranjo fotovoltaico mais adequado para a operação de bombeamento consiste em sobrepor as curvas de intensidade de corrente e tensão de arranjos fotovoltaicos de diferentes potências de saída, sobre as curvas de intensidade de corrente e tensão das cargas, ou seja, dos motores.

Numa análise inicial, a escolha da alternativa mais conveniente deve recair sobre o arranjo que maximizar a transferência de potência elétrica para o subsistema de bombeamento. Segundo Alonso, 1992, para maximizar a transferência de potencia elétrica do gerador ao motor, o grupo motor-bomba e o gerador fotovoltaico devem ser escolhidos de tal modo que suas curvas I & V, se interceptem o mais próximo possível do ponto de máxima potencia do gerador fotovoltaico. Contudo, a alternativa de máxima transferência de potência não dever ser decisória para a escolha do arranjo mais adequado. Também devem ser observados os valores máximos dos parâmetros elétricos e mecânicos de operação dos motores, estabelecidos pelos fabricantes,

acima dos quais os equipamentos podem sofrer sérios danos, devidos à sobrecorrentes, sobretensões e/ou velocidades muito altas.

Os pontos que caracterizam o encontro da curva do motor com diferentes curvas do gerador são chamados pontos de trabalho. Duffie et al., 1991, comenta que se os pontos de trabalho operam longe dos pontos de máxima tensão, tanto nas baixas quanto nas altas irradiâncias, não existe uma boa combinação entre as características elétricas da carga e do gerador, o que torna a combinação ineficiente.

A Figura 3.24 mostra as características de um arranjo sob cinco níveis de irradiância, diretamente acoplado a um sistema de bombeamento de água usando dois diferentes motores de corrente contínua. O sistema 2 inicia a bombear água com uma irradiância menor do que o sistema 1. Para ambos os sistemas os pontos de operação estão longe dos pontos de máxima potência do gerador fotovoltaico, logo, a carga não opera bem combinada com o gerador, o que compromete a eficiência de todo o sistema.

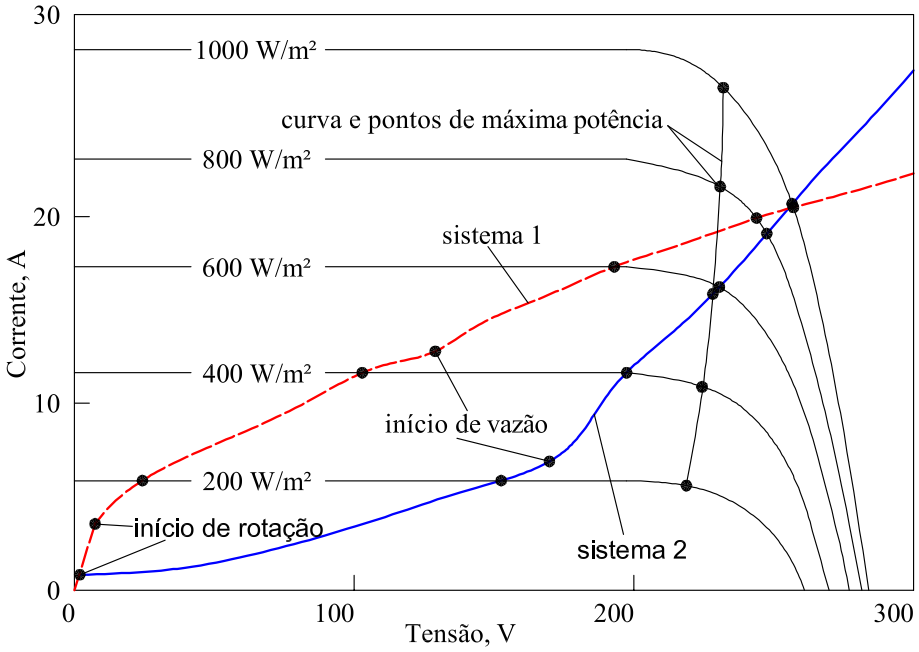


Figura 3.24 Sobreposição de curvas I & V de um arranjo e de duas bombas. Adaptado de Duffie et al., 1991.

4 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Esse trabalho foi realizado no Laboratório de Energia Solar da UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos - São Leopoldo-RS, numa latitude de 29°47’ Sul, longitude de 51°09’ Oeste e altitude de 60 metros.

Figura 4.20 Laboratório de Energia Solar da Unisinos. Aparecem em destaque dois arranjos fotovoltaicos montados sobre a cobertura do prédio.

Para a análise experimental foi projetada e construída uma bancada composta dos seguintes equipamentos e acessórios:

2 gerador fotovoltaico;

3 circuito hidráulico;

4 circuito elétrico;

5 conjunto motor e bomba centrífuga;

6 conjunto motor e bomba volumétrica de diafragma;

7 medidor de vazão;

8 medidor de diferencial de pressão;

9 medidor de radiação solar;

10 medidores de tensão e corrente;

11 medidor de rotação;

12 medidor de temperaturas dos módulos, do ambiente e da água do reservatório;

13 sistema de aquisição de dados;

14 fonte de potência em corrente contínua;

15 microcomputador.

4.1 Equipamentos e acessórios utilizados nos ensaios

A seguir são descritos os equipamentos e acessórios utilizados para a realização dos experimentos.

4.1.1 Gerador fotovoltaico

A configuração de cada um dos geradores fotovoltaicos (l módulo para a bomba de diafragma e 3 módulos ligados em paralelo para a bomba centrífuga) foi feita com a utilização de módulos fotovoltaicos cujas características são apresentadas na Tabela 4.1 e na Figura 4.2.

Tabela 4.1 Características do módulo solar usado na configuração dos geradores.

Marca	Siemens	
Modelo	SP 75	
Características construtivas		
Número de células em série	peça	36
Número de células em paralelo	peça	0
Dimensões, mm	527 x1200 x34	
Peso	kg	7,6
Parâmetros elétricos		
Tensão, V	V	12
Máxima potência, W	W	75
Corrente de máxima potência, Imp	A	4,4
Tensão de máxima potência, Vmp	V	17,0
Corrente de curto circuito, Isc	A	4,8
Tensão de circuito aberto, Voc	V	21,7
Parâmetros térmicos		
TONC (temperatura nominal de operação da célula)	°C	45 ± 2
Coeficiente de temperatura de corrente de curto circuito	mA / °C	2,08
Coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto	V / °C	-0,77

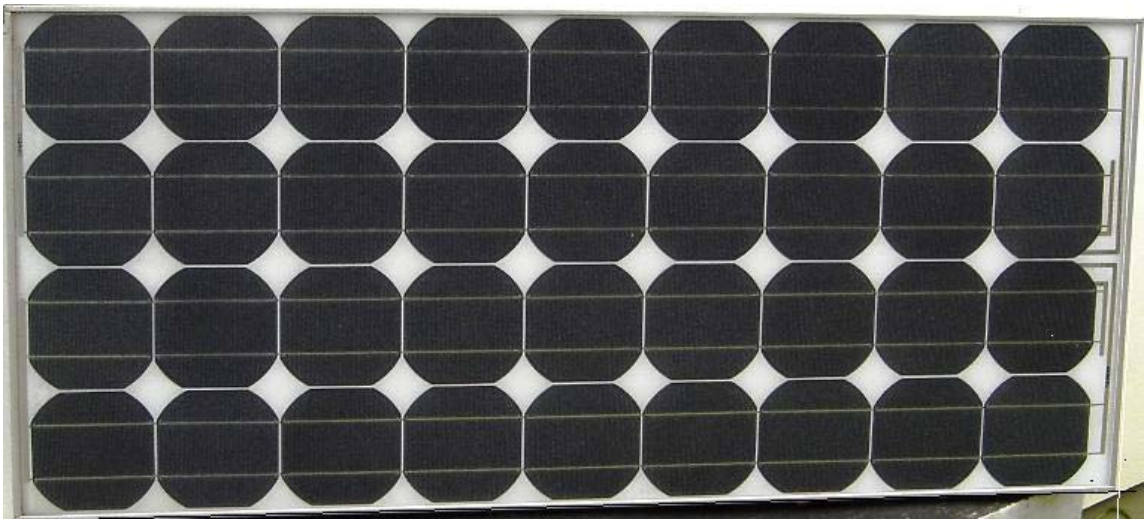


Figura 4.2 Ilustração da distribuição das células no módulo Siemens SP 75.

Os arranjos foram montados sobre uma estrutura metálica de sustentação projetada para suportar quatro módulos colocados lado a lado. A Figura 4.3 mostra a montagem do arranjo com quatro módulos.

Figura 4.3 Ilustração da montagem do arranjo configurado com quatro módulos. Note-se a inclinação da estrutura em relação ao plano da cobertura do laboratório.

A estrutura original foi projetada e montada para um arranjo de quatro módulos fotovoltaicos, inclinada de 42° em relação ao plano horizontal e voltada para o Norte Verdadeiro, conforme recomendado por Fraidenraich et al., 1992. No caso desse trabalho foram usados

arranjos formados por um e três módulos. Assim sendo, a configuração adequada é obtida desligando um e três módulos respectivamente.

4.1.2 Circuito hidráulico

O circuito hidráulico foi formado por acessórios e equipamentos que estão listados na Tabela 4.2 e mostrados na Figura 4.4.

Tabela 4.2 Acessórios e equipamentos dos circuitos hidráulicos dos dois sistemas de bombeamento.

Bomba de diafragma	Bomba Centrífuga
Reservatório, 2000 litros	Reservatório, 2000 litros
Linha de sucção	Linha de sucção
válvula de pé de 1” (1)	válvula de pé de ½” (1)
cotovelo de 1”, galvanizado, (1)	curva de ½”, galvanizado, (2)
cano de 1”, galvanizado	luva de ½”, galvanizado, (1)
válvula de esfera, (1)	cano de ½”,galvanizado,
espiga de conexão para mangueira	válvula de esfera, (1)
	espiga de conexão para mangueira
Conjunto de motor e bomba	Conjunto de motor e bomba
bomba Shurflo série 8000	bomba Beck, impelidor fechado
Linha de recalque	Linha de recalque
cano de 1”, galvanizado	cano de ½” galvanizado
T de 1”, galvanizado, (1)	união de assento de ½”, galvanizado
cotovelo de 1”, galvanizado, (1)	cotovelo de ½”, galvanizado, (2)
niple de 1”, galvanizado, (4)	redução de ½”, galvanizado, (1)
T com bujão de 1”, galvanizado, (1)	niple duplo de ½”, galvanizado, (1)
válvula de globo, (1)	T de 1”, galvanizado, (1)
	cano de 1”, galvanizado
	cotovelo de 1”, galvanizado, (1)
	niple duplo de 1”, galvanizado, (4)
	T com bujão de 1”, galvanizado, (1)
	válvula de globo, (1)
Equipamentos de medidas	Equipamentos de medidas
transdutor de pressão	Transdutor de pressão
medidor de vazão	medidor de vazão

O circuito hidráulico foi projetado para elevar água desde o reservatório, colocado no nível do piso do laboratório, até uma determinada altura estática constante de 1,30 metros. Em sua trajetória a água era conduzida pela tubulação de sucção até a bomba e dessa era direcionada

para a tubulação de recalque, por onde escoava até ser liberada livre na atmosfera. Ao ser liberada, era recolhida por um funil e imediatamente retornava para o depósito. Completava-se com isso um ciclo, permitindo que o nível da água no reservatório se mantivesse constante. A descarga da água no funil era feita livremente na atmosfera de maneira a evitar variações de pressão devido ao efeito sifão.

A Figura 4.4 mostra o desenho esquemático dos circuitos hidráulicos com todos os equipamentos e acessórios.

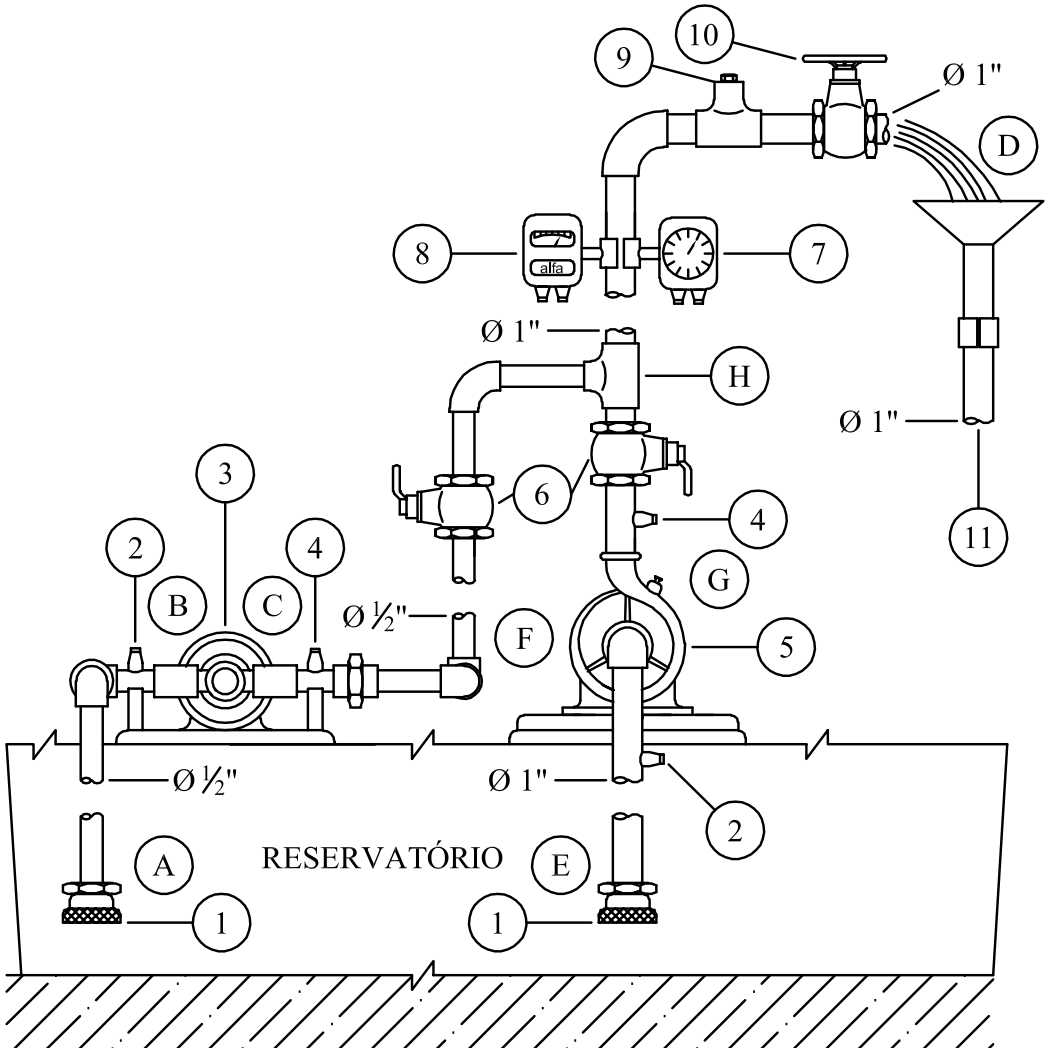


Figura 4.4 Esquema da montagem experimental para testes das bombas e da posição dos transdutores.

A legenda que segue refere-se à Figura 4.4: (1) válvula de pé, (2) conexão para tomada de pressão antes da bomba, (3) bomba de diafragma, (4) conexão para tomada de pressão após a bomba, (5) bomba centrífuga, (6) registro de esfera, (7) manômetro diferencial, (8) medidor de vazão, (9) “T” com bujão, (10) registro tipo globo, (11) funil de retorno, (AB) tubulação de

sucção da bomba de diafragma, (CD) tubulação de recalque da bomba de diafragma, (EF) tubulação de sucção da bomba centrífuga, (GD) tubulação de recalque da bomba centrífuga, (H) ponto a partir do qual a tubulação de recalque passa a ser comum aos dois subsistemas de bombeamento.

Note-se que: (a) a partir do acessório "T", no ponto (H), as duas tubulações de recalque passam a ser comuns; (b) tanto o medidor de vazão quanto o manômetro diferencial foram ligados em série com as tubulações.

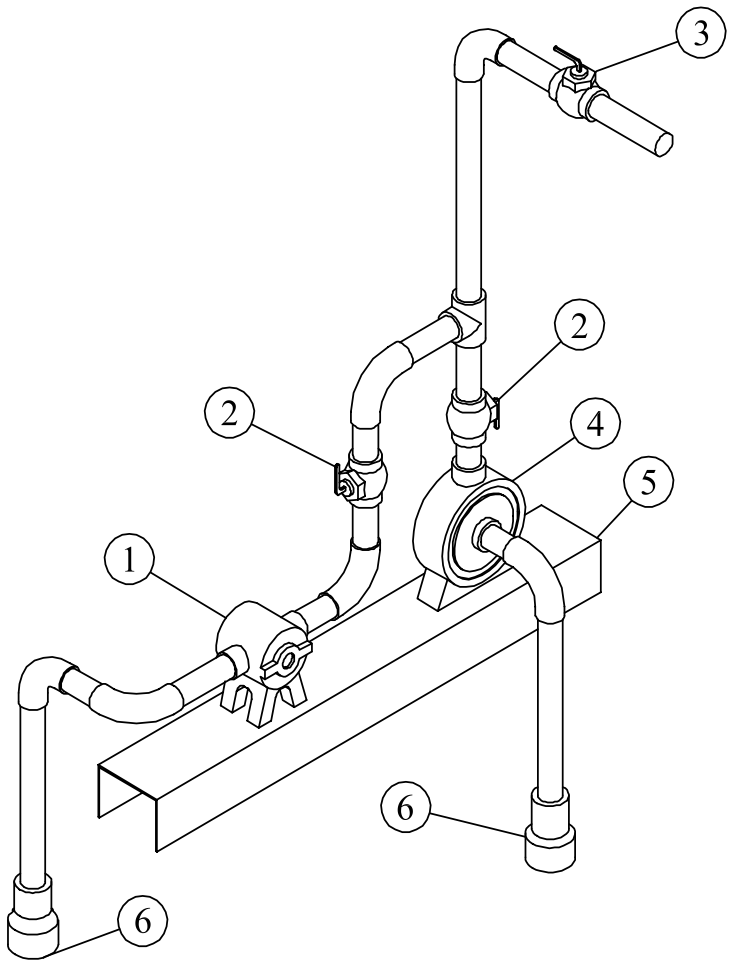


Figura 4.5 Desenho isométrico da montagem das tubulações de sucção e de recalque para os testes das bombas.

A legenda que segue refere-se à Figura 4.5: (1) bomba de diafragma e (2) registro de esfera, (3) registro tipo globo, (4) bomba de diafragma, (5) suporte metálico, (6) válvula de pé.

As válvulas de esfera ou válvulas de bloqueio de fluxo, operadas manualmente, foram instaladas junto à tubulação de recalque de cada sistema. As válvulas tinham a função de isolar um sistema do outro, ou seja, quando um sistema estava operando, a válvula de bloqueio desse

sistema ficava totalmente aberta, permitindo o fluxo da água, enquanto a do outro sistema ficava totalmente fechada, impedindo o fluxo de água naquela tubulação. Operacionalmente essas válvulas são projetadas para operar totalmente abertas ou totalmente obstruídas. A válvula de controle de pressão, operada manualmente, também chamada de registro globo ou de registro de pressão, foi instalada junto à tubulação de recalque, próximo à descarga. A função dessa válvula era de bloquear gradativamente o fluxo do fluido, de modo a obter variações nas pressões, simulando assim diferentes alturas. Mecanicamente, o fechamento da válvula ocorre quando o elemento de vedação lacra a abertura de passagem do fluido. A Figura 4.6 ilustra a bancada.

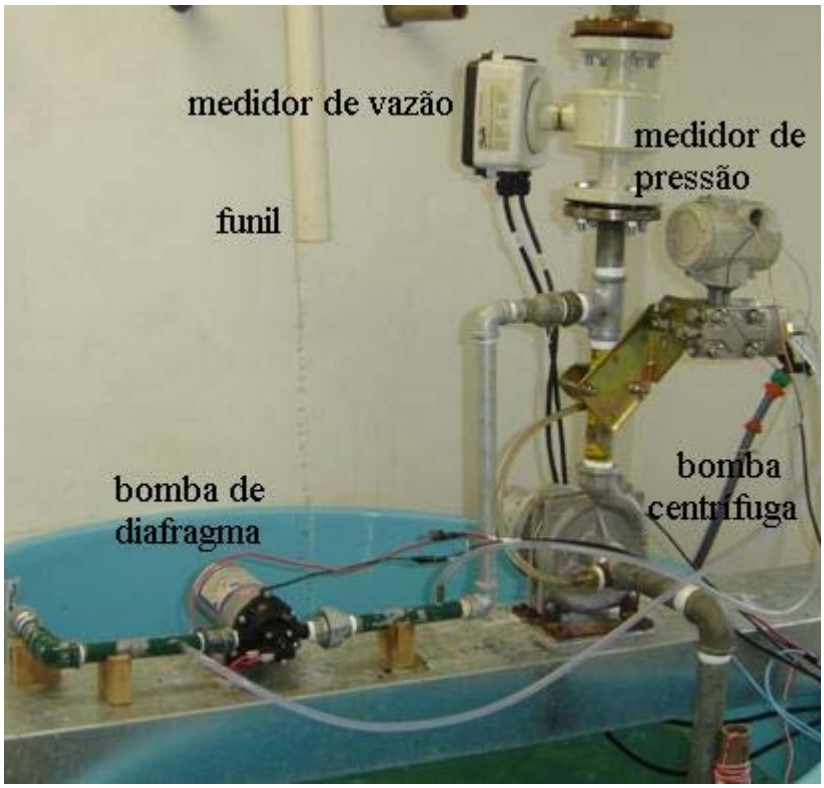


Figura 4.6 Ilustração da bancada de testes com as duas bombas e equipamentos complementares.

4.1.3 Circuito elétrico

Além do gerador fotovoltaico, faziam parte do circuito elétrico de alimentação dos motores os seguintes acessórios:

1 Fio rígido com área de 6 mm^2, usado para a conexão em paralelo entre os módulos e para ligar o arranjo ao disjuntor de controle colocado antes dos motores.

2 Cabo flexível com área de 4 mm^2, usado para fazer a conexão entre o disjuntor e os motores das bombas.

3 Disjuntor de 15 A, usado para ligar e desligar os motores.

4.1.4 Conjunto motor e bomba centrífuga

O motor usado nos experimentos é da classificação comercial DPG e conforme informações obtidas com o fabricante, esse motor é de uso automotivo.

O acoplamento entre a bomba e o motor foi feito por meio de um dispositivo especialmente construído para esse propósito. A Figura 4.7 mostra o motor acoplado à bomba centrífuga. Note-se o bocal de entrada, o ponto de tomada de pressão antes da bomba e a direção vertical para cima da descarga da bomba.

Figura 4.7 Ilustração do conjunto motor e bomba centrífuga.

4.1.4.1 Motor

O motor usado é do tipo de imã permanente com escovas. As principais características do motor são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Características do motor.

Fabricante	Bosch
Código	9 130 081 035
Tensão nominal, V	12
Potência nominal, W	216
Rotação nominal, rpm	3200
Corrente nominal, A (limite recomendado pelo fabricante)	18

4.1.4.2 Bomba centrífuga

As suas principais características são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Características da bomba centrífuga.

Fabricante	Bombas Beck
Características da carcaça	
Material	alumínio, fundido
Tipo	bipartida com voluta convencional simples
Direção da descarga do fluido	vertical para cima
Características do impelidor	
Material	alumínio, fundido e usinado
Tipo	simples sucção, fechado plano
Forma das pás	inclinadas para trás
Número de pás	6
Sentido de rotação	anti-horário
Diâmetro	125 mm

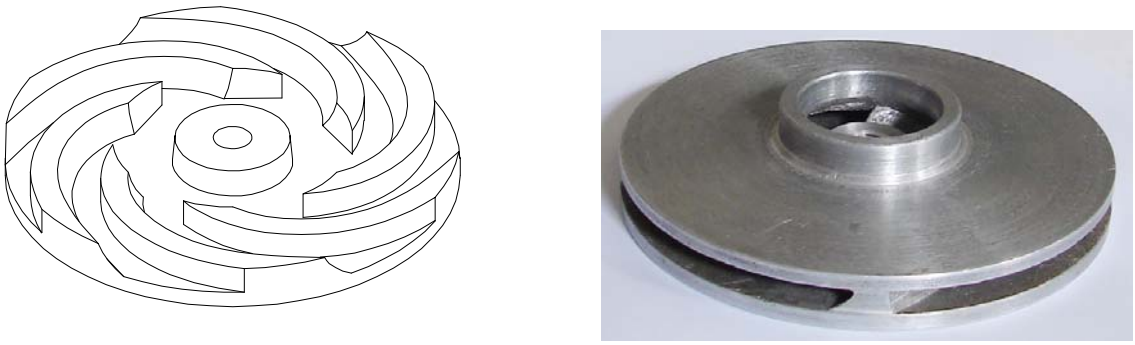
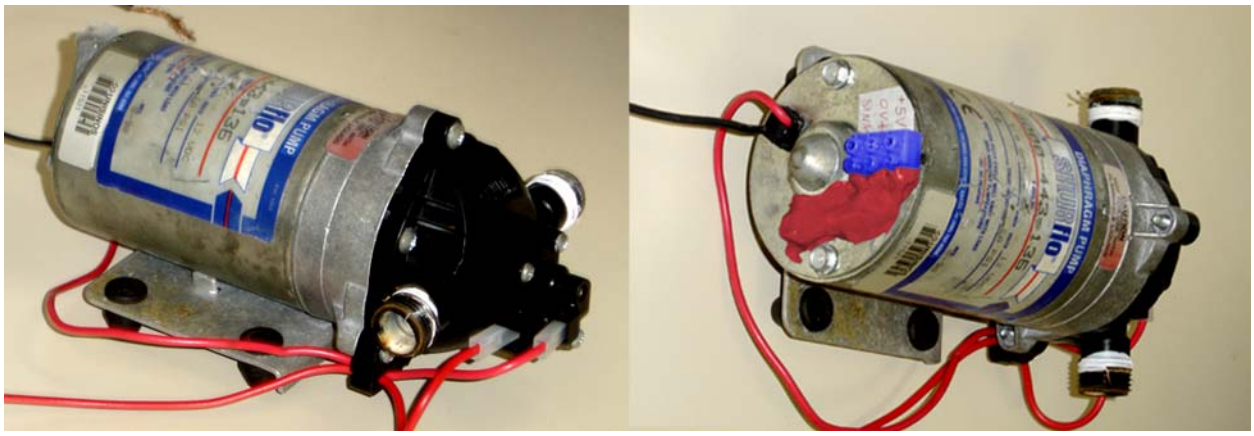


Figura 4.8 Desenho mostrando em detalhe as pás do impelidor e ilustração do impelidor plano fechado usado nesse trabalho.

4.1.5 Conjunto motor e bomba de diafragma

Nesse caso, o motor e a bomba formam um único conjunto. O motor é do tipo convencional de imã permanente com escovas. A bomba é do tipo de deslocamento positivo de diafragma com três câmaras. O movimento do conjunto que forma o diafragma é feito por meio de um excêntrico que é acionado pelo motor.

As Figuras 4.9 (a) e (b) ilustram a parte anterior e posterior da bomba volumétrica de diafragma. Aparecem em detalhe os bocais de entrada e de saída da bomba.



(a) (b)

Figura 4.9 Bomba de diafragma Shurflo modelo 8000 - 443 – 136.

A Tabela 4.5 mostra as características do conjunto motor e bomba de diafragma.

Tabela 4.5 Características do conjunto motor e bomba de diafragma.

Número do modelo	800 – 443 - 136
Especificação do projeto	deslocamento positivo de diafragma
Número de câmaras	3
Válvula de controle	permite operar em um sentido, previne fluxo reverso
Came	3,0 grau
Tensão nominal, VDC	12
Corrente nominal, A	7 (limite recomendado pelo fabricante)
Controle de pressão	ajustável, intervalo: 40 – 60 PSI ou 2,76 – 4,14 Bar
Temperatura do líquido	77°, máxima
Pressão	auto-escorvante, máxima pressão interna 30 PSI ou 2,07 Bar
Materiais de construção	
Plásticos	polipropileno
Válvulas	EPDM
Diafragma	Santoprene, termoplástico flexível
Parafusos	aço zincado chapeado
Peso líquido, kg	2,07
Aplicação típica	bombeamento de água

Essas bombas podem ser fornecidas com um interruptor que reage à pressão de saída e interrompe a operação da bomba quando a pressão atinge o valor indicado na etiqueta da bomba.

Quando a pressão volta a cair o interruptor fecha e a bomba volta a operar, até que a pressão máxima volta a ser atingida.

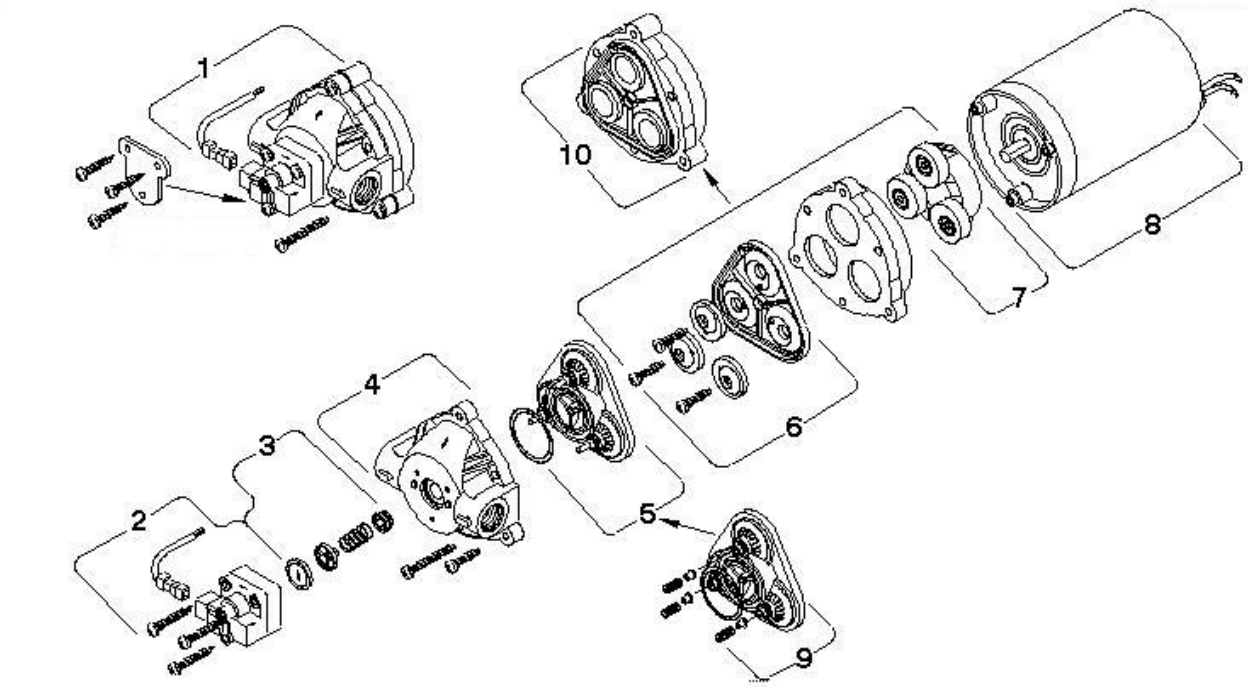


Figura 4.10 Vista explodida do conjunto motor e bomba de diafragma Shurflo modelo 8000 – 443 – 136. O desenho foi fornecido pelo fabricante.

A legenda que segue refere-se à Figura 4.10: (1) cabeçote da bomba, (2) montagem do interruptor, (3) montagem da válvula de controle, (4) alojamento da montagem do diafragma, (5) montagem da válvula, (6) diafragma, (7) montagem do impelidor, (8) motor, (9) montagem da válvula de segurança, (10) diafragma montado.

4.1.6 Medidor de vazão

Para medir a vazão foi instalado junto à tubulação de recalque um medidor eletromagnético da marca DANFOSS. De acordo com dados técnicos fornecidos pelo fabricante o medidor é do tipo de sensores com flanges e incorpora um sensor tipo MAGFLO FLOWMETER 3100 e um conversor de sinal MAGFLO FLOWMETER MAG 5000.

Os sensores são formados por eletrodos revestidos de neoprene, teflon, ebonite, poliuretano ou linatex. O conversor fornece um sinal de saída proporcional à vazão efetiva, em um intervalo de 4mA até 20mA, com precisão de ± 0,5%. Os instrumentos foram calibrados antes do uso.

As Figuras 4.11 (a) e (b) ilustram o sensor com flanges e conversor de sinal de vazão, respectivamente.

(a)

(b)

Figura 4.11 Ilustração do sensor com flanges (a) e do conversor de sinal de vazão (b), ambos da marca DANFOSS.

4.1.7 Medidor de diferencial de pressão

Foi usado um medidor de diferencial de pressão marca ABB modelo 600 T com as seguintes especificações técnicas: precisão 0,75%, faixa de operação entre 10 e 600 kPa, sinal de saída entre 4 e 20mA. Esse instrumento requer uma fonte externa entre 10,5 e 42 VDC.

A Figura 4.12 mostra o medidor de diferencial de pressão usado nesse trabalho. Podem-se notar os cabos flexíveis que são conectados à fonte externa, assim como os terminais onde são conectadas as mangueira que partem dos pontos de tomadas de pressão, antes do bocal de entrada e depois do bocal de saída das bombas, que permitem medir o diferencial de pressão.

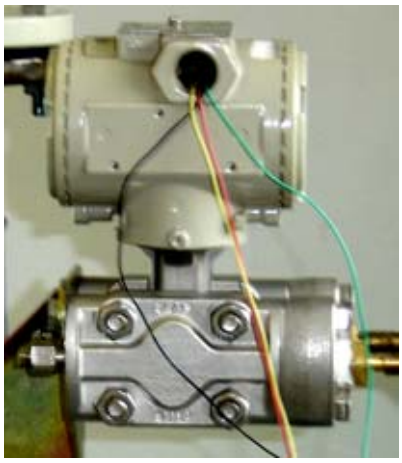


Figura 4.12 Ilustração do medidor de diferencial de pressão marca ABB Série 600 T.

4.1.8 Medidor de radiação solar

Para medir a radiação solar foi usado um piranômetro térmico da marca EPPLEY modelo PSP (precision spectral pyranometer).

As especificações técnicas do instrumento estão na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Características do piranômetro marca EPPLEY modelo PSP.

Sensiblidade aproximada, $\mu V/W.m^{-2}$	9,0
Impedânia aproximada, Ω	650
Intervalo de variação de temperatura de trabalho, ° C	-20 até +40
Linearidade entre 0 e 2800 $W.m^{-2}$, %	± 0,5
Tempo de resposta, s	1,0
Resposta coseno	
± 1 % (0 – 70°) ângulo zênite	
± 3 % (70 – 80°) ângulo zênite	
Calibração	
hemisfério integrador	
Observção	
O desempenho não é afetado pela orientação ou inclinação	

A Figura 4.13 mostra uma ilustração do piranômetro usado no trabalho. Note-se a posição de paralelismo entre o plano da base do instrumento e dos módulos fotovoltaicos.

Figura 4.13 Ilustração do piranômetro EPPLEY modelo PSP instalado junto aos arranjos fotovoltaicos.

4.1.9 Medidas de tensão e corrente

As medidas das correntes nos motores foram feitas com o auxílio de um resistor “shunt” externo, marca ENGRO LTDA com relação nominal de 30 A/50 mV e precisão de 0,5%, o qual foi conectado em série entre o geradores fotovoltaicos e os motores das bombas. Os valores das correntes de carga nos motores foram obtidos por meio da queda de tensão do resistor “shunt”, conforme a equação obtida na calibração.

As tensões, tanto no motor quanto no gerador, foram medidas diretamente, por meio dos sinais de entrada coletados e armazenados pelo sistema de aquisição de dados, o qual está equipado com multímetro interno.

4.1.10 Medidor de rotação do motor

Para medir a rotação foi usado um taco gerador ótico, ou seja, um sensor ótico de velocidade. Nesse caso, um feixe de luz emitido por um diodo emissor de luz (LED), é interrompido e liberado por uma barreira colocada no eixo do motor. O sinal de saída de rotações é proveniente do opto acoplador. Esse instrumento requer uma fonte externa de alimentação. Os sinais de entrada são fornecidos em unidade de medida de freqüência, Hz, e os sinais de saída em rotações por minuto, rpm.

Para adaptar os dispositivos que permitiram medir a rotação do motor da bomba de diafragma foi necessário remover a parte posterior da carcaça da bomba, pois o eixo não é aparente. A Figura 4.9 (b) mostra o conector elétrico fixo (azul) com massa plástica (vermelho) na parte posterior do conjunto motor e bomba.

4.1.11 Medidores de temperatura dos módulos, do ambiente e da água

A temperatura dos módulos e do ambiente foi monitorada por meio de termopares enquanto que a temperatura da água foi monitorada por meio de um sensor tipo PT 100 colocado no reservatório de água.

O termopar que permitiu a medida de temperatura dos módulos foi colado na parte posterior de um dos módulos em contato com uma célula, por meio de um corte feito na estrutura de sustentação e proteção das células. A temperatura medida era relativa a um ponto que estava sempre à sombra.

O termopar usado para medir a temperatura ambiente foi colocado à sombra e próximo do arranjo fotovoltaico.

4.1.12 Sistema de aquisição de dados

Para a medida das diversas variáveis foi utilizado um sistema de aquisição de dados HP 34970 A, equipado com multímetro interno que permitia leituras com precisão de até 6 ½ dígitos. O sistema permite ler 60 canais divididos em 3 multiplexadores com 20 canais cada. É possível fazer até 600 leituras por segundo em um único canal e realizar leituras em até 250 canais por segundo. O instrumento é ligado a um microcomputador via placa HPIB. A Figura 4.14 ilustra a parte frontal do sistema.

O sistema de aquisição de dados é comandado por um software, desenvolvido pela própria HP, o qual permite que sejam feitas configurações diferentes para os diversos canais. Nesse trabalho, todas as leituras foram feitas com 5 ½ dígitos.

Figura 4.14 Ilustração da vista frontal do instrumento usado para aquisição de dados marca HP modelo 34970 A.

A Figura 4.15 mostra a planilha usada para configurar os diferentes canais do multiplexador. Note-se que na primeira coluna à esquerda estão listados os canais usados para a entrada de dados das diversas medidas realizadas nesse trabalho.

ID	Scan	Name	Function	Range	Resolution	Advanced	Scale	Gain(M)	Offset(B)	Label	Test	High	Low	H/W Alarm	Advanced	
101	☑	Temp_Ambiente	Temp 2w RTD			Default	☐	1.0	0.0	C	Off	0.0	0.0	Alarm1		
102	☑	Irradiacao_Solar	DC volts	+/- 100 mV	5.5 digits	Default	☑	112359.5	0.0	Wm2	Off	10	0.0	Alarm1		
103	☑	Luminância	DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☑	5178.69	0.0	Klux	Off	0.0	0.0	Alarm1		
104	☑	Temp_Painel	Temp (type K)			Default	☐	1.0	0.0	C	Off	0.0	0.0	Alarm1		Termopar at
105	☑	Tensao_Motor	DC volts	+/- 100 V	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
106	☑	Rotacao_Motor	Frequency	Auto	5.5 digits	Default	☑	60	0.0	rpm	Off	0.0	0.0	Alarm1		Leitura por s
107	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
108	☑	Tensao_Painel	DC volts	+/- 100 V	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
109	☑	Temp_Agua	Temp 2w RTD			Advanced	☐	1.0	0.0	C	Off	0.0	0.0	Alarm1		
110	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
111	☑	Corrente_Carga	DC volts	+/- 100 mV	5.5 digits	Default	☑	509.16	0.0	ADC	High Only	30	0.0	Alarm1	Default	Protecao pa
112	☑	TBU	2w ohms	Auto	5.5 digits	Default	☑	0.1393	-112.8	C	Off	0.0	0.0	Alarm1		Temperatura
113	☑	TBS	2w ohms	Auto	5.5 digits	Default	☑	0.139996	-113.7	C	Off	0.0	0.0	Alarm1		Temperatura
114	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
115	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
116	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
117	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
118	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
119	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
120	☐		DC volts	Auto	5.5 digits	Default	☐	1.0	0.0	VDC	Off	0.0	0.0	Alarm1		
121	☑	Pressao	DC current	100 mA	5.5 digits	Default	☑	37500	-150	Kpa	Off	0.0	0.0	Alarm1		Diferenca d
122	☑	Vazao	DC current	100 mA	5.5 digits	Default	☑	264600	0.0	L_h	Off	0.0	0.0	Alarm1		Vazao da b

Figura 4.15 Ilustração da planilha (*scan setup*) usada para configurar os diferentes canais do multiplexador.

4.1.13 Fonte de potência

Os testes e simulações realizados durante os experimentos tiveram o suporte de uma fonte de potência marca KEPCO modelo BOP 20 – 20 M, operando em corrente contínua. Os modelos BOP podem funcionar como fonte e como carga. A Figura 4.16 mostra a parte frontal do instrumento.

Figura 4.16 Ilustração da fonte de potência KEPCO modelo BOP 20 – 20 M.

As características do modelo usado estão na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Características da fonte Kepco modelo BOP 20 – 20 M.

Potência de saída, W	400
Variação total de saída de tensão em CC, V	± 20
Variação total de saída de corrente em CC, A	± 20

4.1.14 Microcomputador

Para gerenciar os dados coletados pelo sistema de aquisição de dados foi usado um microcomputador, com memória de 256 MB e monitor de 14 polegadas. O microcomputador está equipado com um periférico que permite operar discos tipo “zip”.

A Tabela 4.8 mostra as variáveis medidas ao longo dos experimentos.

Tabela 4.8 Variáveis medidas nos experimentos.

Canal	Variável	Unidade	Canal	Variável	Unidade
101	Temperatura ambiente	° C	109	Temperatura da água	° C
102	Irradiância	W/m^2	111	Corrente do motor	A
104	Temperatura dos módulos	° C	121	Diferencial de pressão	kPa
105	Tensão do motor	V	122	Vazão	L/hora
106	Rotação do motor	rpm			

A Figura 4.17 mostra esquematicamente o arranjo dos equipamentos e instrumentos de medida usados nos experimentos e suas vinculações com o sistema de aquisição de dados. Os números colocados dentro dos retângulos correspondem aos canais do multiplexador.

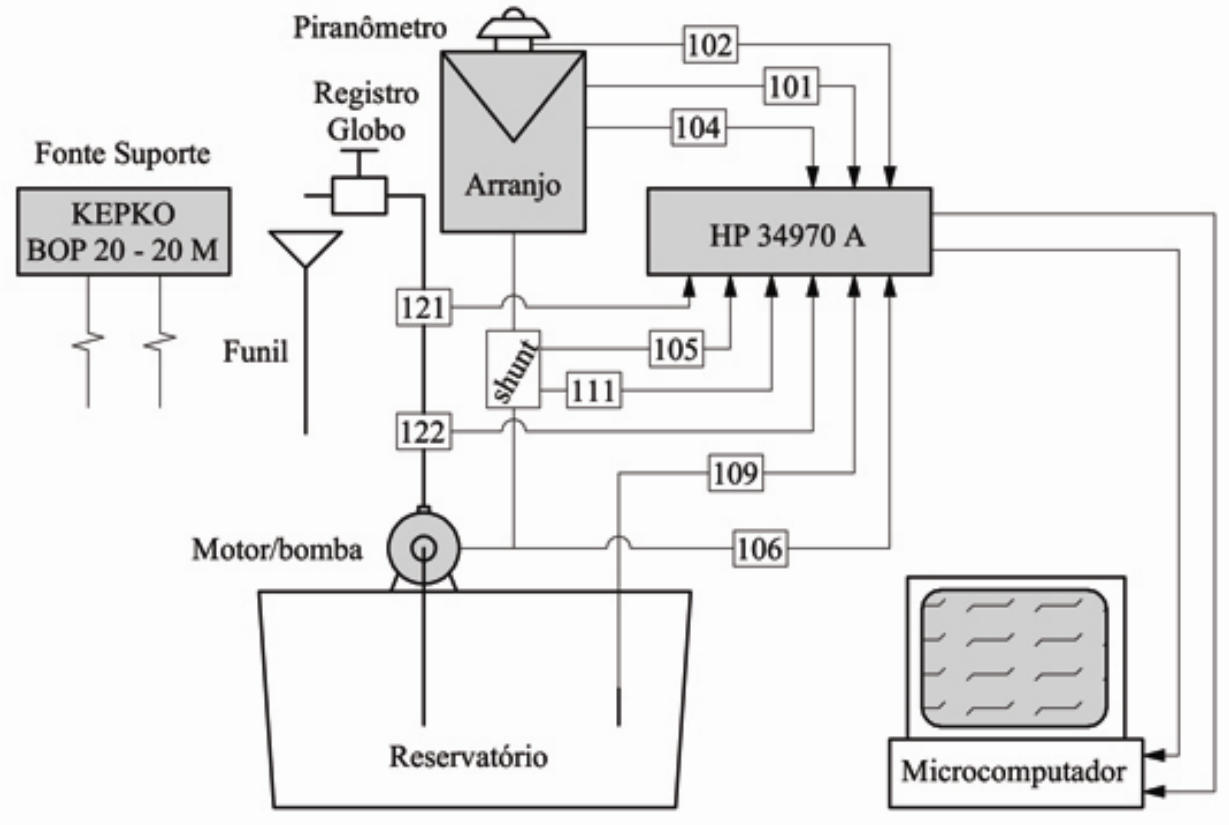


Figura 4.17 Arranjo dos equipamentos e instrumentos de medidas usados nos experimentos e suas correspondentes vinculações.

A Figura 4.18 mostra a planilha onde aparecem os dados das diversas variáveis medidas nos experimentos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	**101(Time**	**stamp)**	**101(C)**	**102(Wm2)**	**104(C)**	**105(VDC)**	**106(rpm)**	**109(C)**	**111(ADC)**	**121(kPa)**	**122(L_h)**
2	2/10/2005	09:04:53	24,7410	559,6160	37,1240	6,3455	1704,5320	23,0860	7,1388	25,0578	255,8013
3	2/10/2005	09:04:58	24,7680	559,7473	37,1210	6,3690	1705,9440	23,0900	7,1477	25,0673	256,4739
4	2/10/2005	09:05:03	24,8240	560,1993	37,1160	6,4337	1281,9260	23,0950	7,1544	25,2771	258,2234
5	2/10/2005	09:05:08	24,8900	560,9576	37,1480	6,4092	1283,3210	23,0600	7,1582	25,3343	258,7616
6	2/10/2005	09:05:13	24,9270	561,2638	37,0990	6,4345	1283,3130	23,0600	7,1597	25,2771	256,8104
7	2/10/2005	09:05:18	24,9740	561,3221	37,0760	6,3916	1283,3820	23,0730	7,1637	25,3438	259,5689
8	2/10/2005	09:05:23	25,0150	562,1241	37,0710	6,4538	1284,4840	23,0630	7,1736	25,4201	260,5109

Figura 4.18 Ilustração da planilha onde aparecem os dados das variáveis medidas conforme consta na Tabela 4.8.

Paralelamente aos experimentos feitos no Laboratório de Energia Solar da Unisinos, foram realizadas no Laboratório de Energia Solar da UFRGS medições que permitiram a caracterização elétrica dos módulos fotovoltaicos usados como fonte de potência nesse trabalho.

4.2 Caracterização das bombas

A análise de um sistema de bombeamento exige que se conheça plenamente o comportamento da bomba e do sistema de bombeamento do qual ela faz parte. As bombas e os sistemas de bombeamento ficam perfeitamente caracterizados quando são conhecidas as curvas de desempenho da bomba e a curva de altura do sistema.

As curvas devem ser determinadas com base nas condições operacionais e requerem o conhecimento do arranjo físico das instalações, dos procedimentos padronizados e das características do fluido. Elas expressam, em forma de gráficos, o desempenho tanto da bomba quanto do sistema, permitindo determinar em que ponto a bomba irá operar sob determinada condição e que mudanças poderão ocorrer se a curva de altura do sistema sofrer qualquer alteração.

4.2.1 Teste de desempenho

A NBR (Norma Brasileira Registrada) 6400/MB (Método Brasileiro)-1032, emitida em novembro de 1989 prescreve os métodos de ensaio de desempenho e de cavitação para bombas hidráulicas de fluxo (centrífugas, axiais e mistas). Os métodos previstos por essa norma são válidos para ensaios de bombas Classe C, ou seja, bombas de uso corrente, onde não são requeridos cuidados especiais.

Os testes de desempenho, que permitem a determinação das curvas que caracterizam a bomba são feitos com velocidades constantes. Entretanto, a NBR 6400/MB 1032, no item 4.1.12 diz o seguinte: “Quaisquer que sejam as grandezas garantidas, devem ser informadas a velocidade de rotação (ou, em alguns casos, a freqüência e a tensão da rede de alimentação elétrica) e as propriedades físicas do líquido, caso não seja água”.

Nos sistemas de bombeamento fotovoltaico as velocidades variam com o nível da radiação solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos, o que impede a manutenção de velocidades constantes e conseqüente determinação das curvas características. Desse modo, para fazer a estimativa do desempenho das bombas foi usada a fonte de potência operando em corrente contínua. A potência de saída da fonte era obtida pela variação, feita de forma manual, da tensão e/ou da corrente, o que permitia simular a potência entregue pelo gerador fotovoltaico quando submetido às variações de irradiância e temperatura.

A aquisição dos dados das variáveis foi feita em intervalos de 3 segundos, o que gerava uma quantidade muito grande de dados armazenados, dificultando a análise. Assim sendo, para melhor manipular essas informações os dados foram consolidados em médias de um minuto.

Mattos et al., 1992, descrevem como o teste deve ser conduzido. O teste de desempenho tem por objetivo a determinação das curvas características reais, o que permitirá, mediante comparação com as curvas prometidas por ocasião da proposta, comprovar a qualidade do equipamento.

Para garantir a adequação do teste, uma série de procedimentos deve ser observada antes, durante e após a realização.

4.2.1.1 Procedimentos antes do teste

a. Estabelecimento de critérios: estabelecer o método de execução do teste, o procedimento nas leituras dos instrumentos e as flutuações e tolerâncias permissíveis. No que concerne a tolerâncias o Hidraulic Institute Standards, 1975, tem recomendações específicas.
b. Inspeção: cuidadosa inspeção deve ser feita ante do teste. A inspeção deve ser feita no que no que concerne aos seguintes itens: alinhamento da bomba e do acionador, sentido de rotação do motor, ligações elétricas, tubulação de sucção e de recalque, possíveis folgas, canais de passagem do líquido, posicionamento e adequação dos instrumentos de medição.
c. Testes preliminares: quando possível, é recomendável a realização de um ou mais testes preliminares com a finalidade de adequar pessoal e instrumentos.
d. Calibração: todos os instrumentos devem ser aferidos antes do início dos testes.

4.2.1.2 Procedimentos durante o teste

a. Observar e registrar as leituras efetuadas
b. Observar as instalações no que concerne a comportamentos anormais.

4.2.1.3 Procedimentos após o teste

a. Efetuar os cálculos para levantamento das curvas características a partir dos valores medidos durante o teste.
b. Comparar, quando for o caso, as curvas obtidas nos testes com as curvas de catálogos.

O procedimento do teste consiste em fazer a bomba funcionar numa velocidade constante em diferentes pontos de operação, ou seja, em diferentes alturas, simuladas pela variação da abertura da válvula de controle de vazão colocada na tubulação de recalque. Normalmente, um dos pontos escolhidos é o *shutoff* – ponto de vazão nula, enquanto que os demais são arbitrados. Para cada um dos pontos são feitas leituras de vazão, Q, diferencial de pressão entre entrada e saída da bomba, ΔP, rotação, N, tensão no motor, V e corrente no motor, I. Os valores dessas medidas permitem calcular, por meio das equações 3.5, 3.6 e 3.7 e para cada ponto, a potência hidráulica, Pot_h, a potência elétrica, Pot_e e a eficiência global da bomba, η.

Tendo-se os valores assim calculados, podem ser traçadas as curvas que caracterizam a bomba.

A determinação das curvas características da bomba deve ser feita antes instalação definitiva no local de operação. Elas são importantes para verificar as condições em que ela operará, assim como para adotar eventuais medidas no sentido de corrigir desvios no desempenho previsto.

4.2.2 Determinação da curva de altura do sistema

A curva do sistema é aquela que mostra a variação da altura total com a vazão, representa a variação de energia por unidade de peso que o sistema solicita em função da vazão.

Conforme Mattos et al.,1992, o procedimento para a obtenção da curva do sistema é o seguinte: fixam-se arbitrariamente valores de vazão, em torno de seis, estando entre estes a vazão zero e a vazão com a qual se deseja que o sistema opere. As quatro vazões restantes devem ser fixadas usando duas de valor inferior à vazão pretendida para a operação e duas de valor superior à vazão pretendida para a operação. Para cada uma das posições medem-se os valores de diferencial de pressão. De posse dos dados de vazão, Q e altura, H, constrói-se a curva de altura do sistema.

Para esse trabalho, o método para a obtenção da curva de altura do sistema foi o seguinte: fixou-se uma determinada abertura da válvula de controle de vazão e fez-se operar o sistema, variando constantemente a tensão fornecida pela fonte, desde zero até o máximo possível. Com os dados coletados de diferenças de pressão, ΔP e vazões, Q, traçou-se a curva de altura do sistema.

4.2.3 Determinação do ponto de trabalho da bomba

Conforme visto no Capítulo 3, ao sobrepor a curva de vazão – altura da bomba com a

curva de altura do sistema, pode-se determinar o ponto de trabalho da bomba. Esse ponto fica definido pelo encontro das duas curvas.

4.2.4 Determinação da curva de tensão e corrente

A curva de corrente tensão e aquela que mostra a variação da corrente com a tensão. Dela pode-se extrair o momento em que o motor inicia seu funcionamento assim como quando inicia o escoamento.

A Figura 4.19 mostra o comportamento da curva I & V do motor da bomba centrífuga usada nesse trabalho para uma altura de 5,50 mca. O comportamento da curva depende da altura.

O método para a obtenção da curva I & V do motor consiste em após fixar uma determinada abertura da válvula de controle de vazão, fazer operar o sistema variando constantemente a tensão fornecida pela fonte, desde zero até o máximo valor possível.

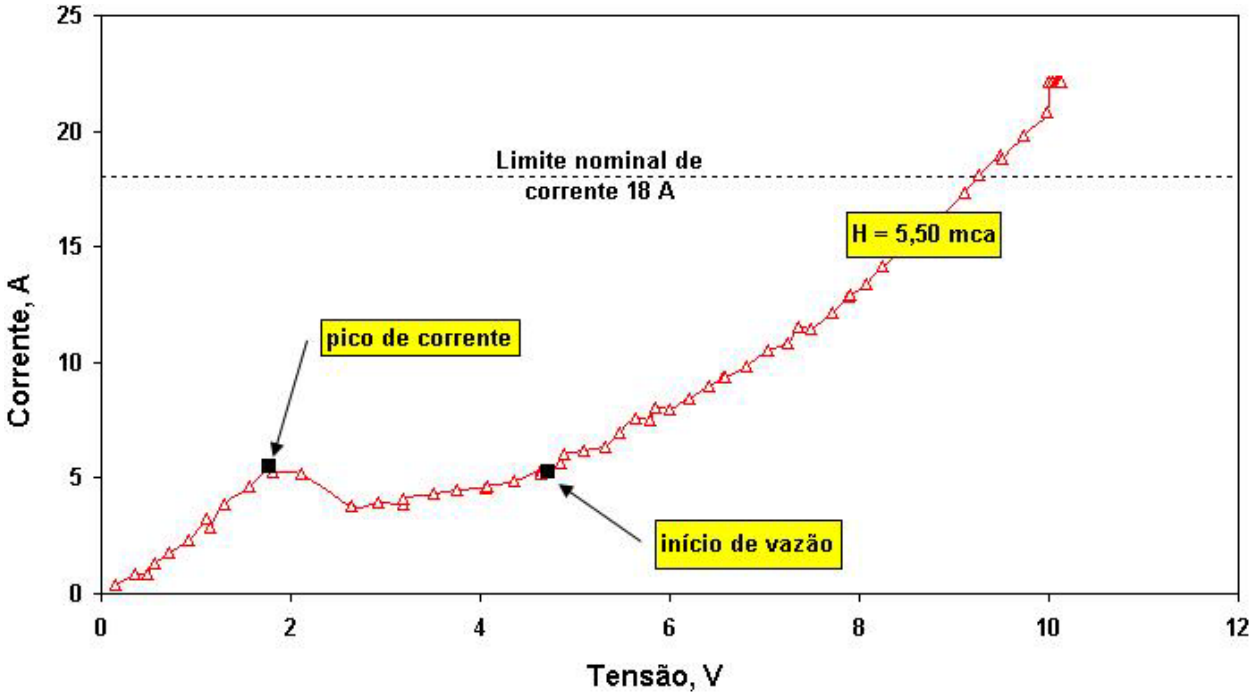


Figura 4.19 Curva I & V do motor da bomba centrífuga, para uma altura de 5,50 mca.

4.4 Procedimentos com as bombas acopladas aos geradores fotovoltaicos

Para a avaliação do desempenho instantâneo dos sistemas de bombeamento foram feitas as medições de todas as variáveis que constam da Tabela 4.8. Para a bomba centrífuga foram usados três módulos fotovoltaicos enquanto que para a bomba de diafragma foi usado um módulo. Os testes foram feitos em dias claros, ou seja, completamente sem nuvens e também em dias nublados. As medições iniciavam às 6 horas e terminavam às 20 horas, os dados eram

coletados a cada cinco segundos e para melhor apresentar os resultados gráficos, as medidas foram consolidadas em médias de um minuto. De acordo com Protogeropoulus et al., 1999, as variações de irradiância num período de até dois minutos são desprezíveis e não comprometem as medidas dos demais parâmetros.

5 ANÁLISE DOS ACOPLAMENTOS

5.1 Aspectos Gerais

Nas Figuras 5.1, 5.3 e 5.4, sobrepostas às curvas de irradiância estão as curvas de vazão bombeada pela bomba centrífuga, para três dias com condições atmosféricas distintas. Os gráficos da Figura 5.1 são representativos de um dia completamente sem nuvens enquanto que os gráficos das Figuras 5.3 e 5.4 mostram curvas para dois dias nublados.

Em todas as representações pode ser observada a dependência da vazão em função da irradiância, ou seja, para qualquer variação da irrandiância há uma resposta na curva da vazão bombeada. Nos gráficos também é possível distinguir três regiões distintas limitadas pelas curvas de irradiância, de vazão e pelos eixos cartesianos. Na primeira região, chamada de região de irradiância inicial, não ocorre bombeamento. Essa região compreende as primeiras horas de sol do dia, caracteriza-se por apresentar níveis de irradiância crescentes, mas que não são capazes de gerar potências de saída suficientemente elevadas de modo que possam ser vencidas as resistências impostas pelo atrito e pela altura estática e iniciar o bombeamento. Mais adiante, com o passar das horas, a irradiância aumenta até atingir um valor em que gera uma potência capaz provocar o escoamento do líquido no sistema. Esse valor de irradiância corresponde a um mínimo abaixo do qual não existe o bombeamento, sendo chamado de limiar útil inicial ou de fronteira útil inicial de irradiância. Vilela, 2001, refere-se ao limiar de irradiância como sendo o nível crítico de irradiância. A região, ao longo do qual a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos permite que sejam superadas as resistências e ocorra o bombeamento, é denominada de “região de irradiância útil”. Nessa região e no entorno do meio dia, ocorre o máximo valor de irradiância, que normalmente também corresponde à máxima vazão. Mais adiante, na parte da tarde, há um decréscimo da irradiância até atingir novamente um valor mínimo, abaixo do qual cessa o bombeamento. Esse valor é chamado de limiar útil final ou fronteira útil final de irradiância. Na última região, chamada de região de irradiância final, não ocorre bombeamento.

A Figura 5.1 mostra o comportamento da irradiância e da vazão, em função da hora local, para o dia 05 de outubro de 2005. Em dias típicos como esse, sem nuvens, ocorre somente um limiar de irradiância para o início de vazão e um limiar de irradiância para o final de vazão. Notam-se as distintas regiões de irradiâncias assim como as linhas de limiares de irradiâncias. Em um dia sem nuvens, uma vez atingido o limiar de irradiância, na parte da manhã, haverá o bombeamento contínuo até que novamente seja atingido um novo limiar de irradiância, ao entardecer, abaixo do qual não haverá mais o bombeamento.

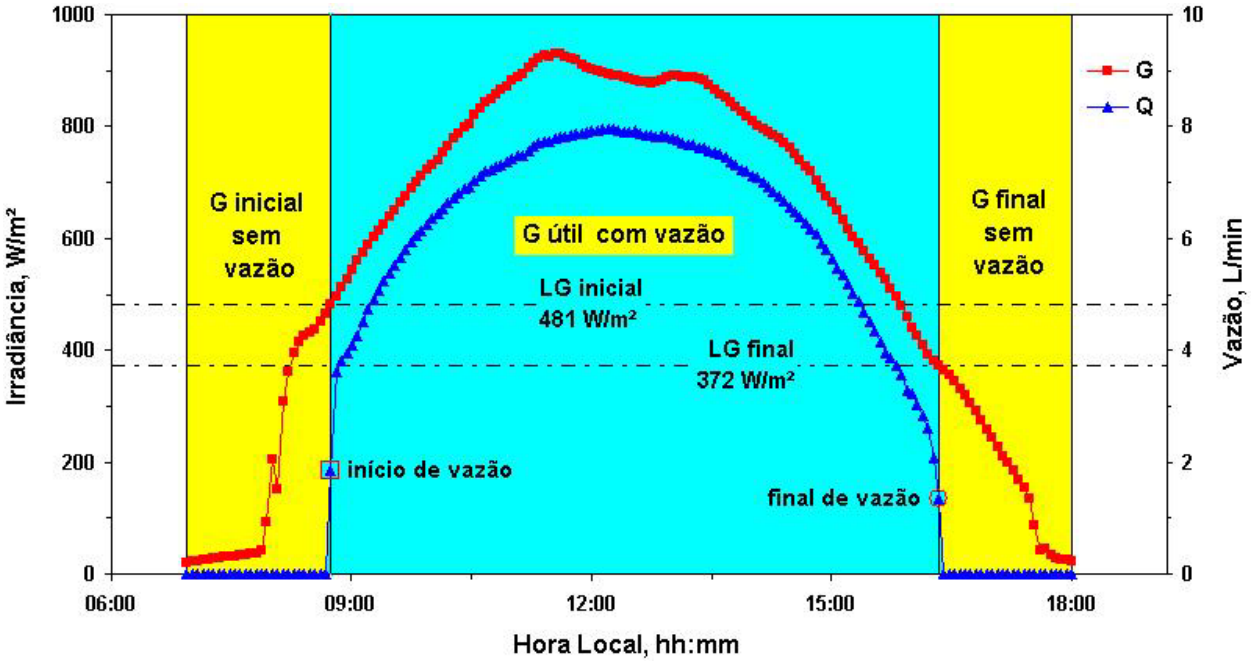


Figura 5.22 Curvas características de comportamento da irradiância e da vazão, em função da hora local, para um dia completamente sem nuvens.

A curva da Figura 5.2 mostra o comportamento da vazão em função da irradiância para o mesmo dia do gráfico da Figura 5.1. Ela foi construída com dados de irradiância em que ocorre vazão.

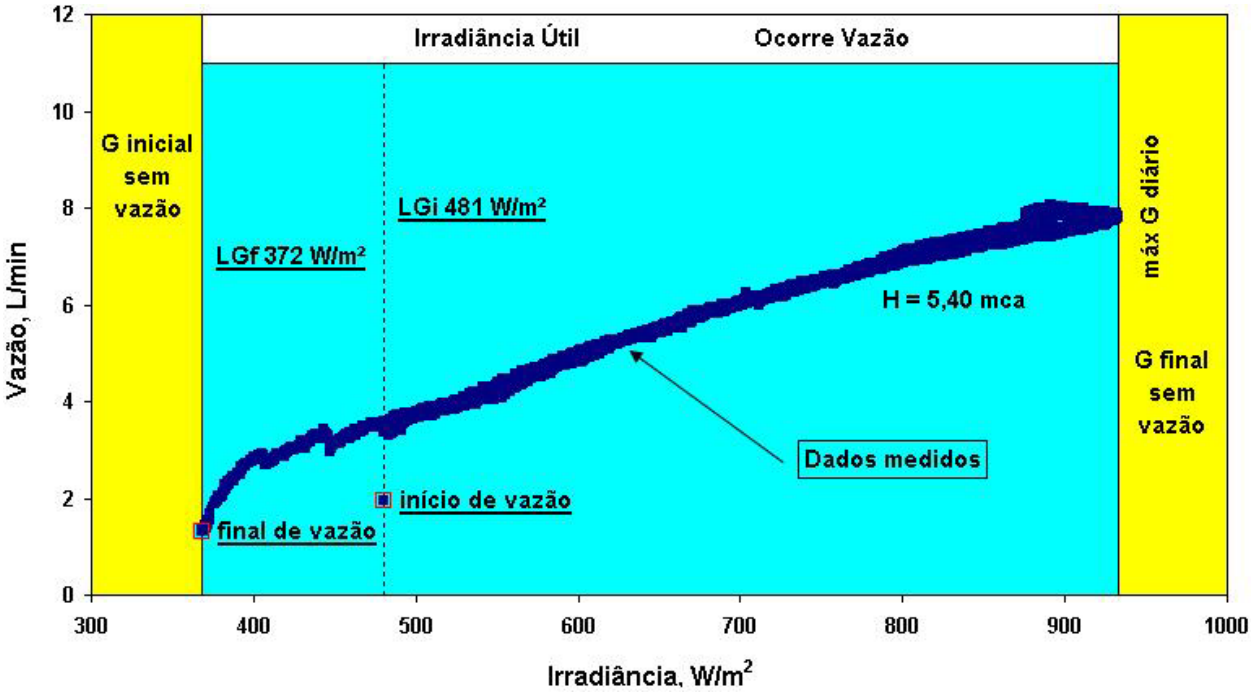


Figura 5.2 Curva da vazão em função da irradiância, para o mesmo dia do gráfico da Figura 5.1. O limiar de irradiância para o início de vazão é maior do que para o final de vazão.

Ainda na Figura 5.1, na região inicial, nas primeiras horas de sol a irradiância apresenta níveis que não geram a corrente necessária para iniciar o bombeamento, enquanto na região final, ao entardecer, o nível da irradiância decresce até não mais gerar a corrente necessária para manter o bombeamento. Note-se que o bombeamento ocorre na região de irradiância útil e que o limiar de irradiância para o início de vazão (LGi) é maior do que o limiar de irradiância para o final de vazão LGf.

O limiar de irradiância para o início de vazão é maior do que o de final de vazão, pois para iniciar o bombeamento devem ser vencidas as resistências elétricas dos motores assim como as perdas por fricção da bomba e das tubulações de sucção e de recalque. Ao tratar desse assunto, Chenlo et al., 1998, dizem que o limiar de início de vazão é estático, enquanto que o limiar de final de vazão é dinâmico.

As das Figuras 5.3 e 5.4 mostram o comportamento da irradiância e da vazão, em função da hora local, para dias nublados típicos.

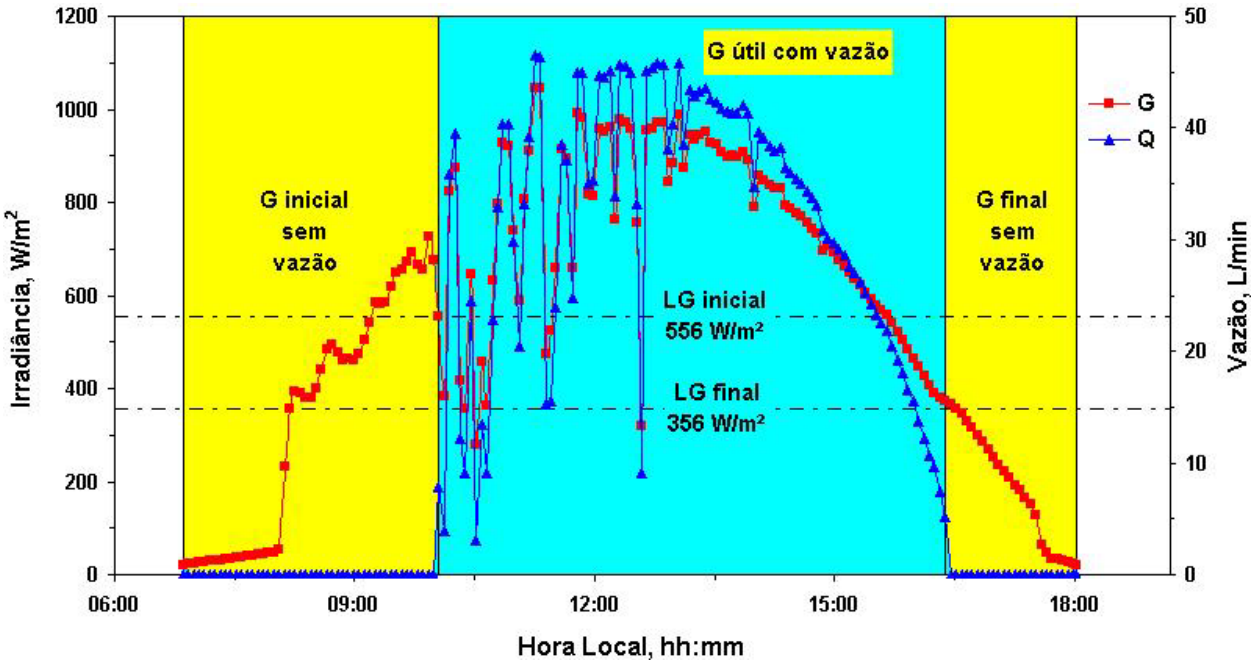


Figura 5.3 Curvas de irradiância e vazão, em função da hora local, para um dia com nuvens. Observe-se que não houve interrupção no bombeamento ao longo do dia.

Nesses dias ocorrem picos de máxima e de mínima radiação. Quando os picos de mínima estiverem abaixo da linha do limiar de irradiância, o bombeamento será interrompido e a retomada somente ocorrerá quando a irradiância atingir novamente, no mínimo, o valor do limiar.

A curva de vazão da Figura 5.3 mostra que, independentemente das variações na irradiância solar incidente durante o dia, não houve, em nenhum momento, a interrupção do

bombeamento, ou seja, ocorreu somente um limiar de irradiância para o início e outro para o final de bombeamento.

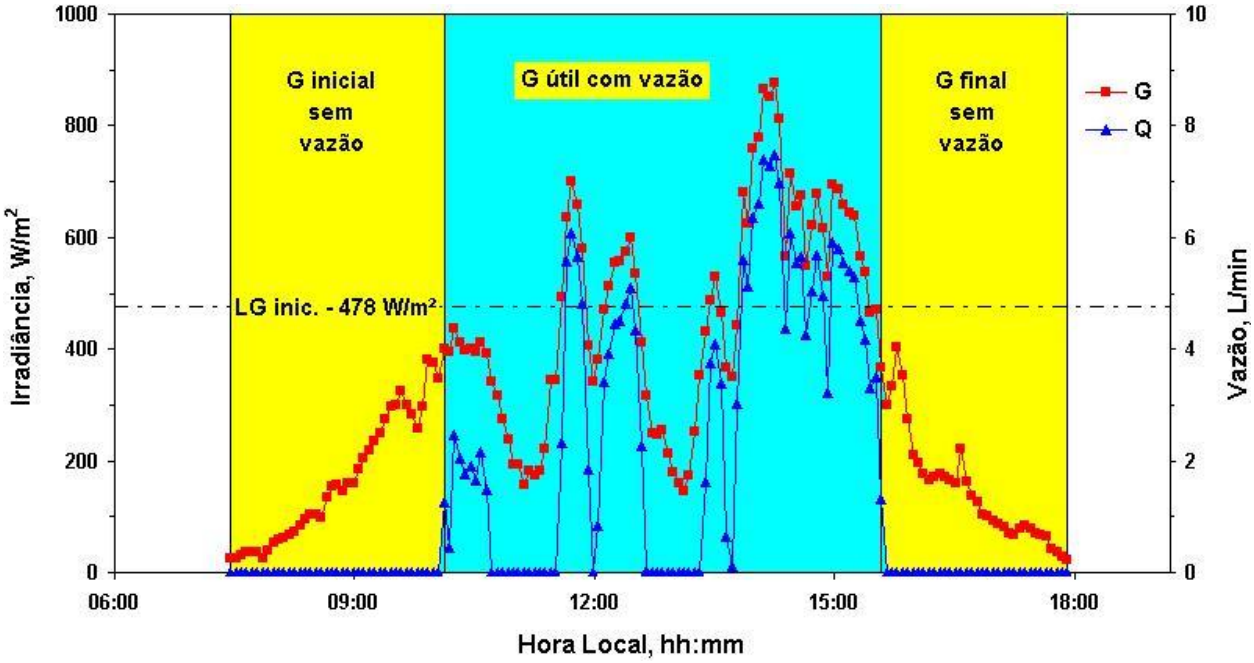


Figura 5.4 Curvas de irradiância e de vazão, em função da hora local, para um dia típico com nuvens. É importante observar a intermitência no bombeamento.

A curva de vazão da Figura 5.4 mostra que as variações na irradiância solar incidente durante o dia ocasionaram interrupções no bombeamento. Isso indica que ao longo de um dia poderão ocorrer mais de um limiar de irradiância para o início e outros tantos para o final de bombeamento.

Em dias em que existe alternadamente a presença de sol e de nuvens, podem ocorrer variações na irradiância incidente no plano dos módulos fotovoltaicos, de modo a causar quedas na potência de saída do gerador fotovoltaico ao longo do período. Quando a potência de saída atinge níveis tão baixos que comprometem a alimentação das bombas, podem acontecer quedas ou interrupções no bombeamento. Essas variações, que podem ser de curta ou longa duração, freqüentes ou isoladas, comprometem o volume de água bombeada durante o dia.

5.2 Comportamento elétrico dos motores

O comportamento elétrico de uma carga, que está submetida a determinadas condições operacionais, fica conhecido quando são analisadas e interpretadas as curvas de corrente em função da tensão. Além disso, as curvas servem de ferramentas a serem usadas no dimensionamento adequado das fontes de potência, ou seja, no caso desse trabalho servem, junto com outros elementos, para determinar o número de módulos fotovoltaicos para configurar os

arranjos fotovoltaicos necessários para operar cada um dos sistemas de bombeamento.

As curvas das Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os valores medidos de corrente e de tensão dos motores acoplados às duas bombas, para diferentes alturas.

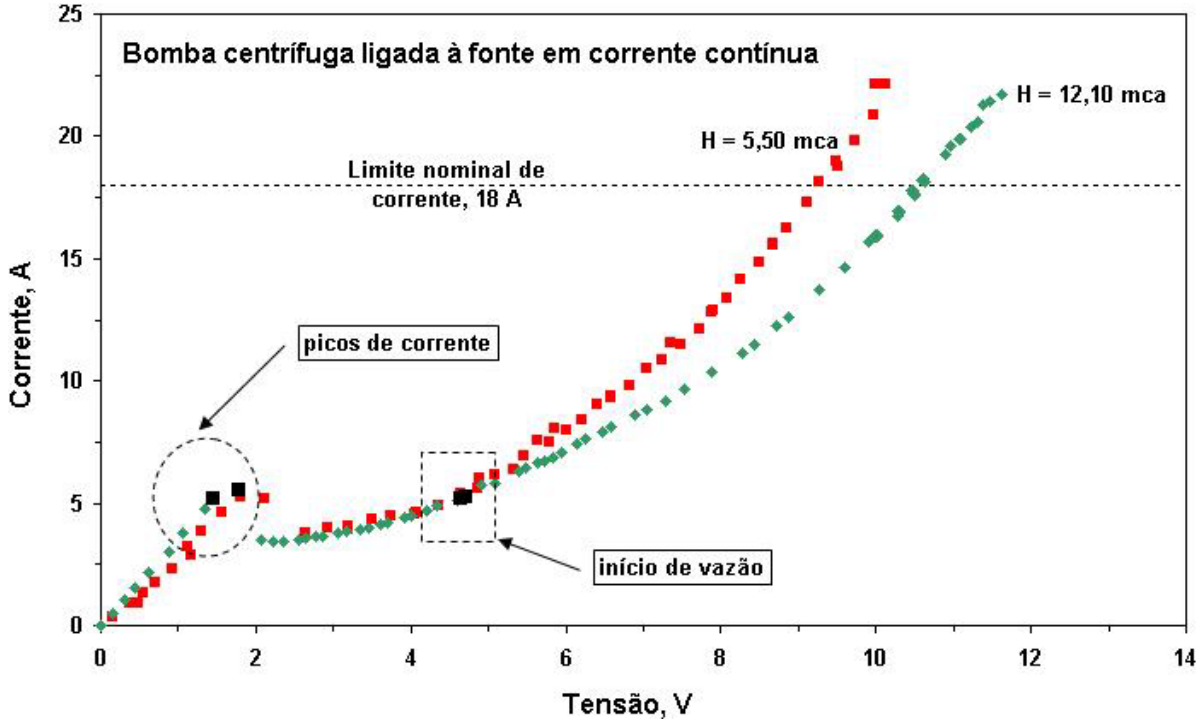


Figura 5.5 Curvas I & V do motor acoplado à bomba centrífuga, para diferentes aberturas da válvula de controle de vazão.

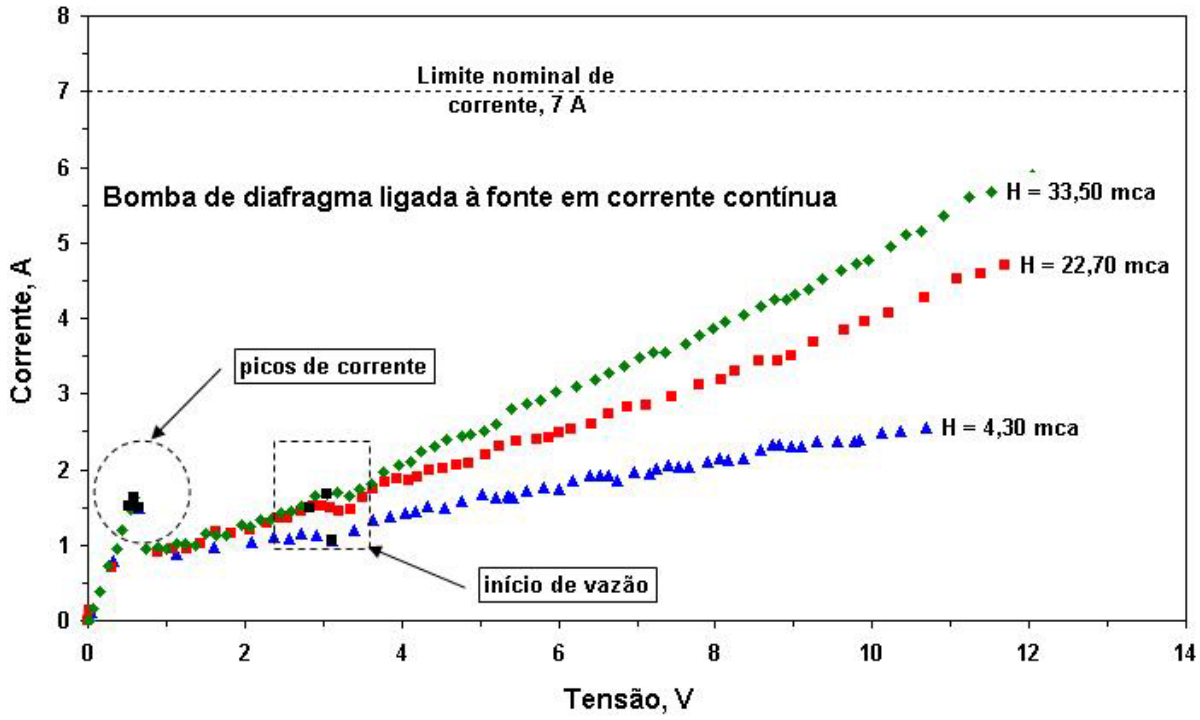


Figura 5.6 Curvas I & V para a bomba de diafragma, para diferentes aberturas da válvula de controle de vazão.

Em ambos os conjuntos de curvas podem ser identificadas as regiões de picos de corrente, assim como as regiões de início efetivo de vazões. O pico de corrente corresponde à corrente necessária para promover o arranque ou partida do motor.

As curvas das Figuras 5.5 e 5.6 foram obtidas com os motores acoplados à fonte de potência em corrente contínua, ou seja, os conjuntos de motores e bombas operavam em regime permanente.

A Figura 5.7 mostra a sobreposição das curvas I & V para os motores das duas bombas objetos do estudo desse trabalho. Na legenda aparecem as vazões máximas alcançadas pelas bombas, para as condições especificadas.

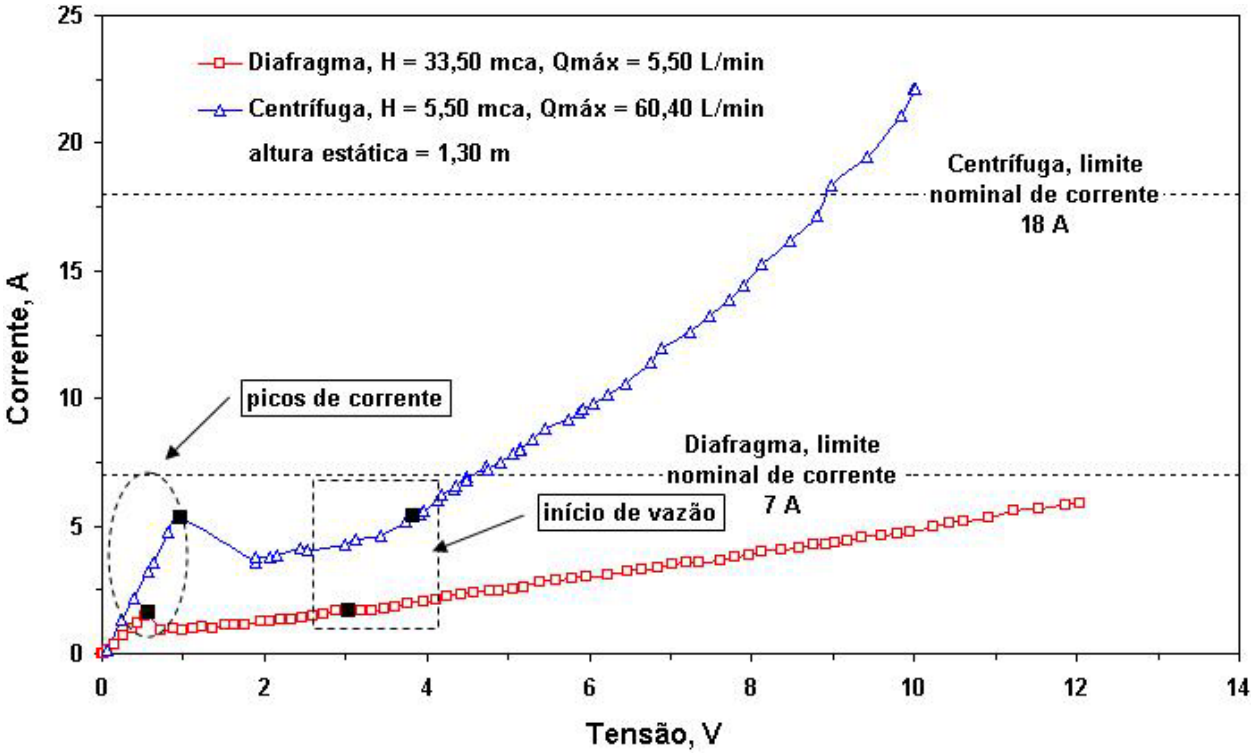


Figura 5.7 Sobreposição de curvas I & V das duas bombas, para as condições especificadas no gráfico.

A Figura 5.8 mostra as linhas de tendências que se ajustaram às curvas I & V das duas bombas, para as condições definidas no gráfico. As linhas de tendência foram obtidas considerando-se as medidas realizadas somente a partir dos pontos de início de escoamento do líquido no sistema

Para ambas as curvas das bombas, as equações que melhor se ajustaram foram definidas por polinômios de segunda ordem. No caso da bomba de diafragma, um bom ajuste também poderia ser feito por uma equação linear.

Na área do gráfico aparecem as equações que melhor se ajustaram a cada uma das linhas de tendência.

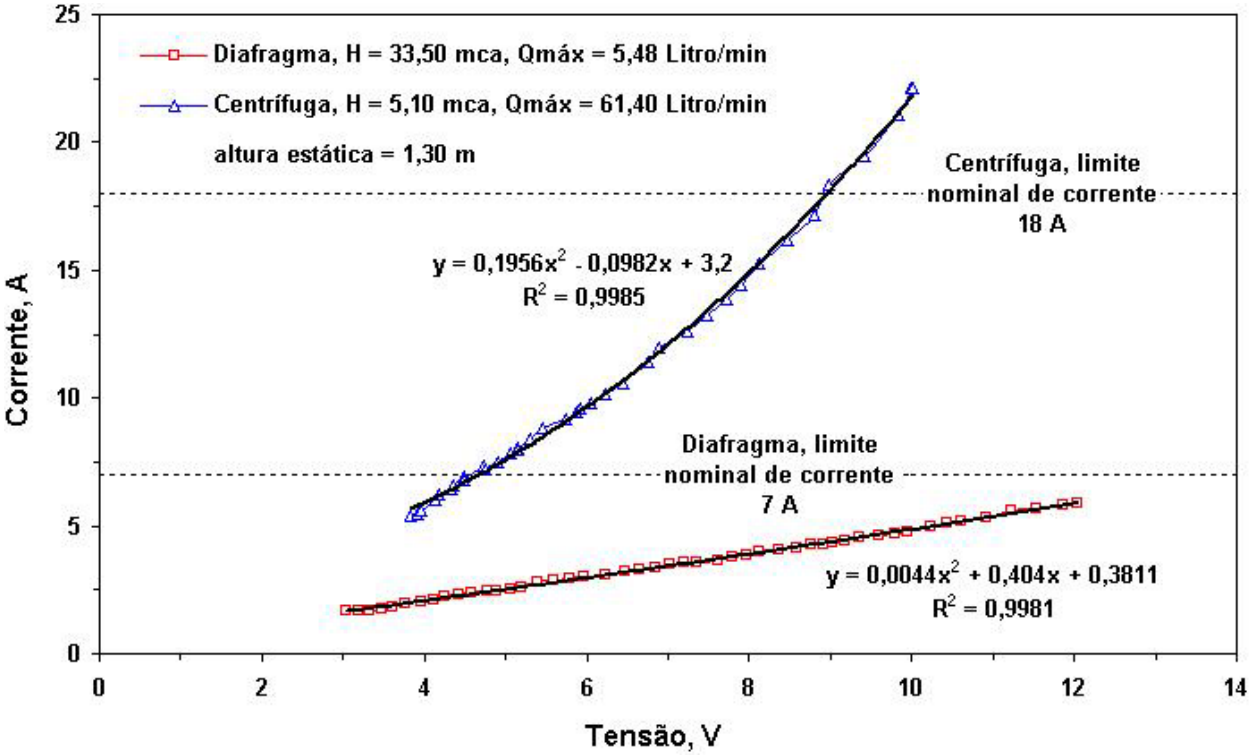


Figura 5.8 Linhas de tendências e equações de ajustes para as curvas I & V das duas bombas, para as condições especificadas no gráfico.

5.3 Análise dos acoplamentos

O método que permite a determinação da configuração do arranjo mais adequado para operar uma carga consiste em fazer a sobreposição das curvas I & V da carga com as curvas I & V dos arranjos fotovoltaicos. A transferência de potência do gerador ao motor será maximizada quando as curvas I & V do motor e do gerador se interceptarem o mais próximo possível do ponto de máxima potência do gerador, conforme já foi descrito no item 3.6.

A capacidade de geração de tensão e de corrente, ou seja, a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico depende da irradiância incidente e da maneira como os módulos fotovoltaicos estão conectados entre si, se em série e/ou em paralelo. Para ambos os motores usados nos sistemas de bombeamento analisados nesse trabalho, as recomendações dos fabricantes indicam que para uma operação segura os limites de tensão não devem ultrapassar a 12 V. Sabendo-se que a capacidade de geração de tensão de cada módulo de 12 V, as ligações elétricas entre os módulos, quando necessárias, deverão ser em paralelo, onde as correntes são aditivas e as tensões são as mesmas para todas as unidades, ou seja, 12 V em cada um dos possíveis arranjos.

A seguir, com o propósito de determinar qual o arranjo mais adequado para a operação das cargas, faz-se as seguintes análises:

a. comportamento das curvas I & V de cada motor;
b. comportamento das curvas I_{SC} & G, para diversas configurações dos arranjos fotovoltaicos;
c. sobreposição das curvas I & V dos motores e das bombas.

5.3.1 Análise do acoplamento direto do arranjo fotovoltaico com o sistema de bombeamento – caso da bomba centrífuga

Utilizando-se a Figura 5.9 observa-se que o aumento da altura de 5,50 mca para 12,10 mca ocasionou um deslocamento da curva I & V para a direita. Isso confirma o observado por CIEMAT, 2000, quando diz que as curvas I & V do motor variam em função da altura total de bombeamento.

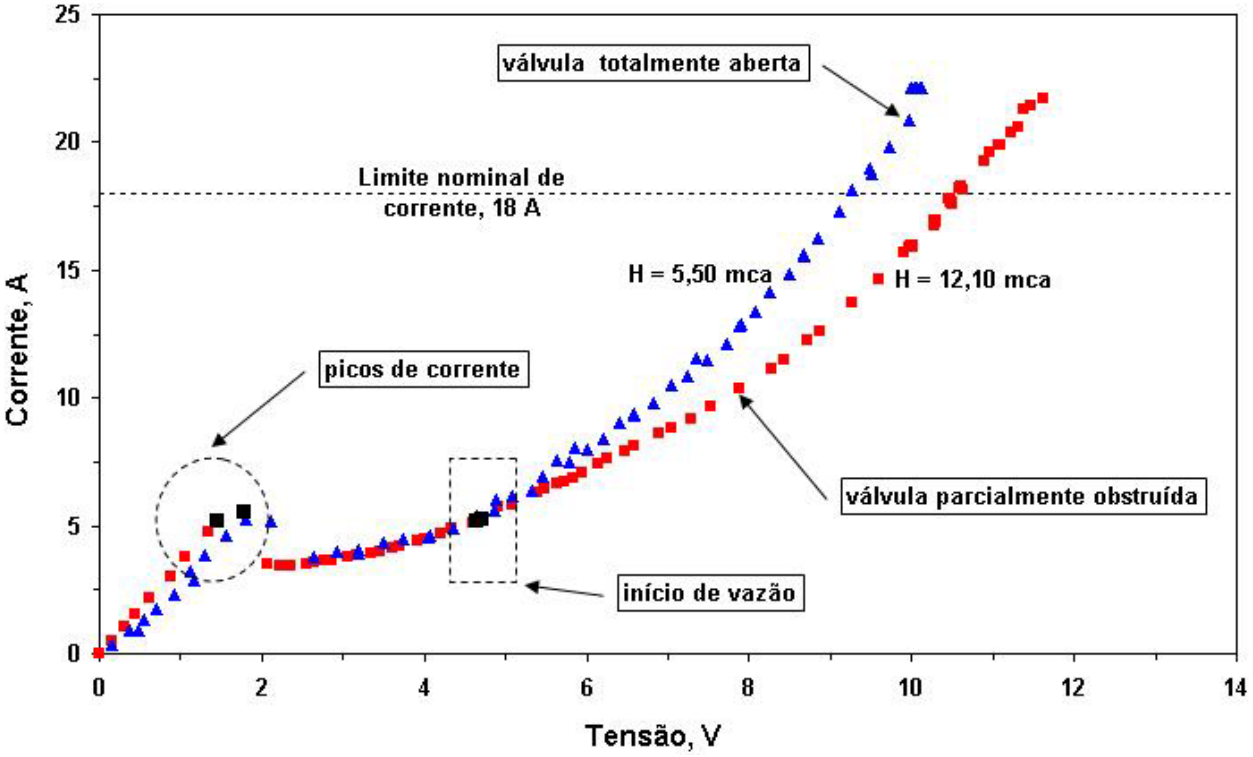


Figura 5.9 Curvas I & V para duas alturas de operação da bomba centrífuga.

A altura de 5,50 mca corresponde à pressão medida com a válvula de controle de vazão totalmente aberta enquanto que a altura de 12,10 mca corresponde à pressão medida com a válvula parcialmente fechada. Ainda pela observação da Figura 5.9 e com auxílio da Tabela 5.1 verifica-se que para a altura de 5,50 mca, a corrente de início de vazão diminui em relação à

corrente de pico do motor, pois não existindo o estrangulamento na tubulação a resistência ao movimento do fluido é menor e isso resulta na necessidade de uma menor corrente de início de vazão. Para a altura de 12,10 mca, a corrente de início de vazão aumenta em relação à corrente de pico do motor, pois ocorrendo o estrangulamento na tubulação, a resistência ao movimento do fluido é maior e isso leva à necessidade de uma maior corrente de início de vazão.

Nota-se pela Tabela 5.1, cujos dados são relativos à Figura 5.9, que a variação da altura altera sensivelmente a vazão máxima bombeada. Nessa tabela, os indicativos H, I_{pico}, V_{pico}, $I_{vazão}$, $V_{vazão}$, $Q_{máx}$, são respectivamente: altura, corrente de pico, tensão de pico, corrente de início de vazão, tensão de início de vazão e vazão máxima alcançada. Conforme visto no item 3.6, a corrente e a tensão de pico correspondem à corrente e à tensão de partida ou de arranque do motor, a corrente e a tensão de início de vazão correspondem à corrente e à tensão de início de escoamento do líquido no sistema.

Tabela 5.5 Dados relativos à bomba centrífuga.

H, mca	I_{pico}, A	V_{pico}, V	$I_{vazão}$, A	$V_{vazão}$, V	$Q_{máx}$ L/min
5,50	5,52	1,77	5,21	4,64	60,40
12,10	5,20	4,64	5,24	4,71	6,95

As curvas mostradas na Figura 5.9, assim como os dados da Tabela 5.1 são característicos somente para a bomba testada.

Tabela 5.2 Dados relativos aos arranjos fotovoltaicos.

Acoplamentos – Sistema de Potência					
I_{SC}					
G, W/m^2	T módulo, ° C	1 M 1 módulo	2 M 2 módulos	3 M 3 módulos	4M 4 módulos
200	38	0,99	1,98	2,97	3,96
400	47	1,98	3,96	5,94	9,92
600	53	2,96	5,92	8,88	11,84
800	57	3,93	7,86	11,79	15,72
994	56	4,86	9,72	14,58	19,44

Na Tabela 5.2 os dados de I_{SC} para um módulo, nas diversas irradiâncias e temperaturas, foram obtidos com o suporte do programa computacional PVsize desenvolvido no Laboratório

de Energia Solar da UFRGS, Vera, 2004. Os valores de I_{SC} para os arranjos de 2, 3 e 4 módulos foram obtidos por adição, pois as ligações entre os módulos são em paralelo. Esses dados são restritos para os módulos Siemens SP75 usados nesse trabalho, considerando que os parâmetros elétricos de todos os módulos são iguais.

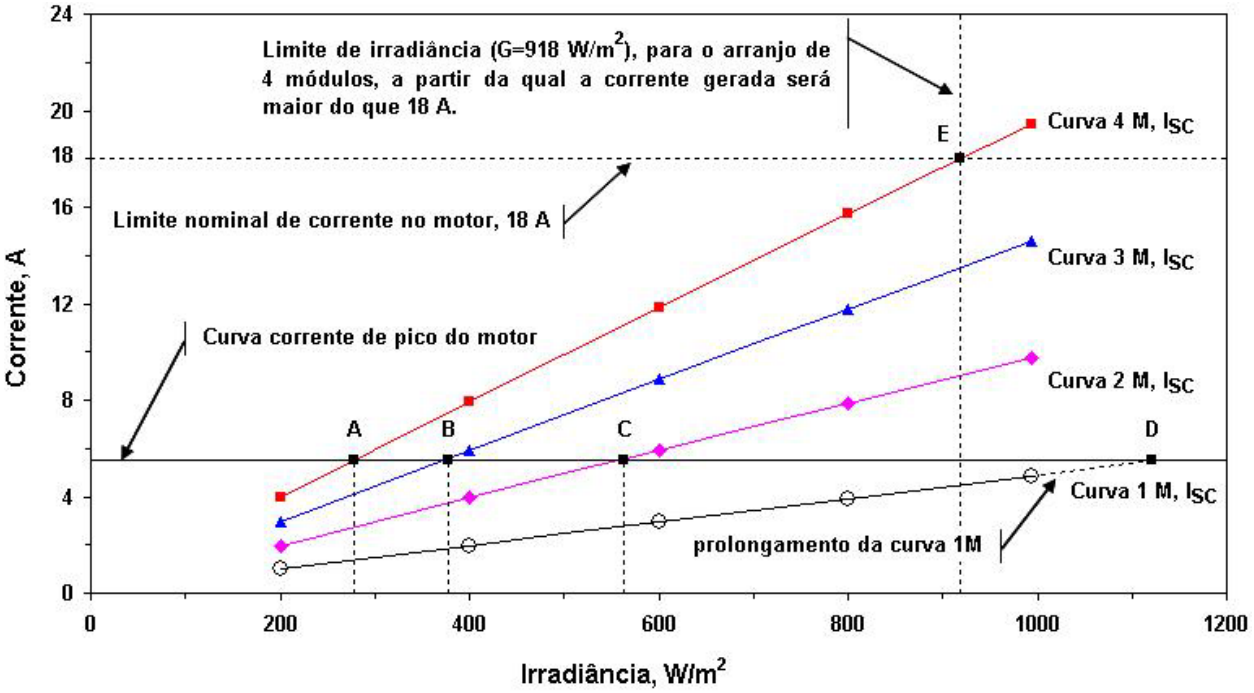


Figura 5.10 Curvas I_{SC} & G para as quatro configurações de arranjos fotovoltaicos. Dados extraídos da tabela 5.2.

O gráfico da Figura 5.10 serve para a determinação da irradiância necessária para gerar a corrente de pico do motor, para cada arranjo fotovoltaico. O valor da irradiância fica determinado pela abscissa do ponto de encontro da curva I_{SC} & G dos diversos arranjos e em vários níveis de irradiância, com a curva de corrente de pico do motor.

Para a construção da curva de corrente de pico do motor, foi considerado o dado da corrente para a altura de 5,50 mca, Tabela 5.1, por ser a maior dentre as duas correntes de pico tabeladas.

As curvas I_{SC} & G, ou seja, as curvas 1M, 2M, 3M e 4M foram geradas a partir dos dados da Tabela 5.2. Representam a variação da corrente de curto circuito em função da irradiância incidente sobre o plano dos arranjos fotovoltaicos.

Os valores das ordenadas da curva corrente de pico do motor são constantes e correspondem à corrente necessária para o arranque do motor. A corrente de pico independe da irradiância. Entretanto, ela será alcançada mais cedo ou mais tarde, ao longo do dia, em função da configuração dos arranjos fotovoltaicos. Uma mesma irradiância incidente sobre diferentes

arranjos, em um mesmo local e hora, gera uma potência de saída diferente para cada arranjo. Portanto, o limiar de irradiância de pico LG_P necessária para gerar a corrente de pico, depende do número de módulos fotovoltaicos de cada arranjo N_m e de suas conexões em série, paralelo ou série/paralelo, da temperatura dos módulos T_m e também da altura de bombeamento H.

Nesse caso, há interesse em determinar qual arranjo é o mais adequado para a operação de bombeamento, com acoplamento direto da bomba ao arranjo fotovoltaico. Para isso, é necessário determinar em que limiar de irradiância cada um dos arranjos fotovoltaicos irá produzir a potência capaz de gerar a corrente de pico ou de arranque do motor.

É sabido que a corrente de curto circuito é uma função linear da irradiância. Assim sendo, pode-se expressar a corrente de curto circuito da seguinte maneira:

$$I_{SC} = K.G \tag{5.1}$$

onde, I_{SC} é a de corrente de curto circuito, G é a irradiância e K é a constante de proporcionalidade.

Considerando que a equação para a curva 1M (um módulo) da figura 5.10 é dada por:

$$I_{SC} = 0{,}0049.G \tag{5.2}$$

para as curvas 2M, 3M e 4M, a equação da curva pode ser expressa por:

$$I_{SC} = 0{,}0049.\ N_m.G \tag{5.3}$$

onde N_m é o número de módulos do arranjo.

Tabela 5.3 Limiares de picos de irradiância para diferentes arranjos.

Arranjos	Pontos	LG_P, W/m^2
Quatro Módulos (4M)	A	278
Três Módulos (3 M)	B	378
Dois Módulos (2 M)	C	564
Um Módulo (1 M)	D	1122

A Tabela 5.3 mostra os valores dos limiares de irradiâncias de pico para cada um dos arranjos fotovoltaicos. Esses valores indicam em que irradiância, para cada arranjo fotovoltaico, a corrente de pico é alcançada, ou seja, em que irradiância o motor entra em movimento e em seguida, se for mantido ou aumentado o nível de irradiância, começa o bombeamento. Os pontos

A, B, C e D foram determinados por meio da interseção das curvas 1M, 2M, 3M e 4M, com a curva de pico de corrente, ou ainda aplicando o valor de I_{SC} = 5,51 A na equação 5.3.

A escolha do arranjo mais adequado passa pela análise e interpretação das curvas da Figura 5.10, juntamente com as curvas I & V do motor sobrepostas às curvas das mesmas variáveis dos diversos arranjos fotovoltaicos.

A seguir é feita análise dos arranjos com a finalidade de determinar qual deles é o mais adequado para operar o sistema de bombeamento, dentro da proposta de acoplamento direto.

5.3.1.1 Escolha do arranjo mais adequado para operar a bomba centrífuga

A Figura 5.11 mostra que ao sobrepor a curva I & V do motor às curvas I & V do arranjo formado por um módulo fotovoltaico o ponto de corrente de pico do motor fica posicionado acima de todas as curvas I & V do arranjo. Assim, mesmo a máxima potência entregue pelo arranjo é insuficiente para gerar a corrente de pico do motor. Isso mostra a inadequação do arranjo para operar esse sistema de bombeamento.

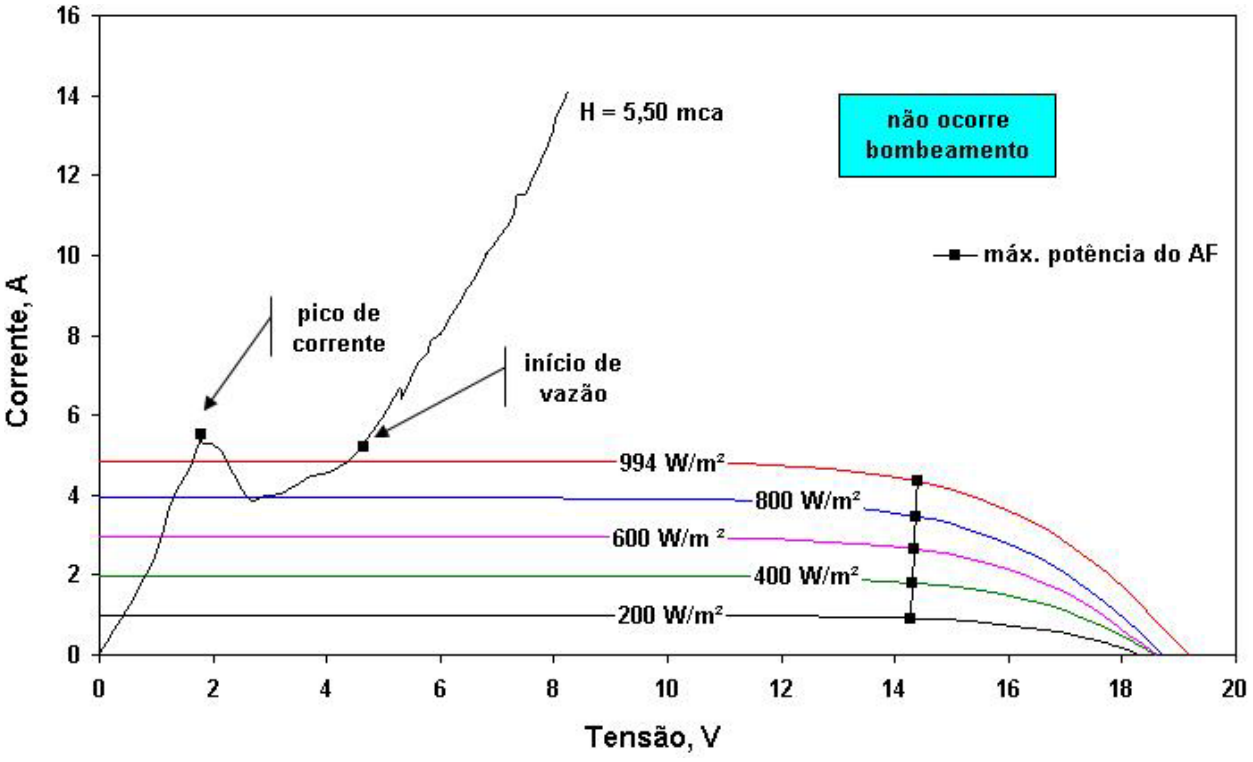


Figura 5.11 Sobreposição das curvas I & V do motor e do gerador formado por um módulo fotovoltaico.

A observação da Figura 5.10 mostra que a curva 1M não é interceptada pela curva de corrente de pico do motor. Isso confirma que o arranjo de um módulo não entrega a potência suficiente para gerar a corrente de pico do motor, sendo, portanto, inadequado para operar esse subsistema de bombeamento. O prolongamento da curva 1M com a curva de pico do motor, na Figura 5.10, determina o ponto D. Nesse ponto a irradiância atinge o valor de 1122 W/m^2. Essa irradiância é suficiente para gerar a corrente de pico do motor. Entretanto, valores tão altos de irradiância somente são alcançados por volta do meio-dia no verão e têm curta duração, resultando em volumes bombeados muito pequenos, o que inviabiliza a utilização do arranjo.

Nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 estão sobrepostas as curvas I & V do motor com as curvas dos arranjos formados por dois, três e quatro módulos respectivamente. É possível verificar que qualquer dos três arranjos entrega potências suficientes para gerar a corrente de pico ou de arranque do motor, assim como para realizar o bombeamento. Entretanto, em todos os casos existe um desacoplamento entre os pontos de máxima potência das curvas dos arranjos e os pontos de trabalho do sistema, ou seja, há um afastamento entre o ponto de trabalho de cada curva, com o ponto de máxima potência da mesma curva. Esse desacoplamento é responsável, entre outros, pela redução da eficiência da conversão fotovoltaica e do conjunto motor e bomba. Portanto, é de se esperar que a escolha do arranjo mais adequado deva recair sobre aquele em que o desacoplamento é menor, em todos os níveis de irradiância.

A relação existente entre a potência no ponto de trabalho em determinada curva do arranjo fotovoltaico e a máxima potência na mesma curva é chamada de eficiência do acoplamento.

A eficiência do acoplamento é dada por:

$$\eta_{acoplamento} = \frac{P_{PT}}{P_{MAX}} \tag{5.4}$$

onde, P_{PT} é a potência no ponto de trabalho, W e $P_{MÁX}$ é a potência máxima na curva I & V , W.

O desacoplamento é calculado por:

$$\text{desacoplamento} = 1 - \eta_{acoplamento} \tag{5.5}$$

As medidas da eficiência do acoplamento assim como do desacoplamento podem ser expressas por números decimais ou, quando multiplicadas por 100, como percentuais.

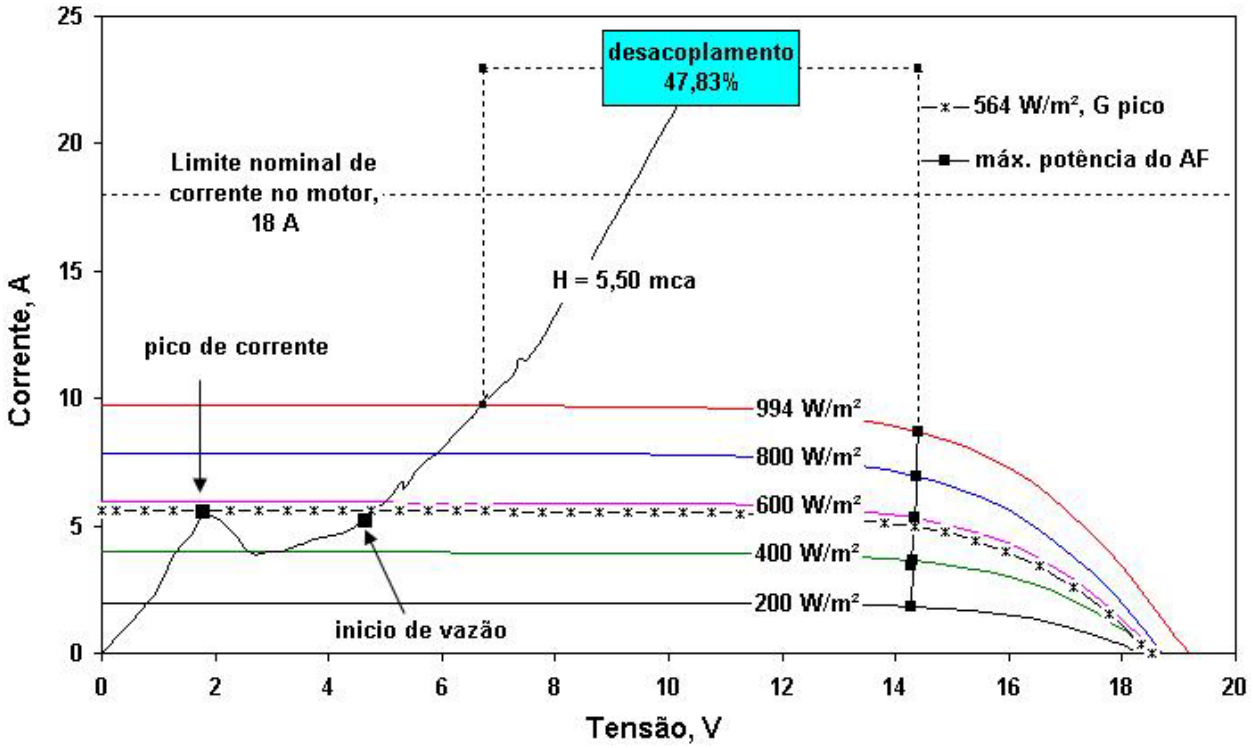


Figura 5.12 Sobreposição da curva I & V do motor com as curvas do gerador formado por dois módulos fotovoltaicos ligados em paralelo.

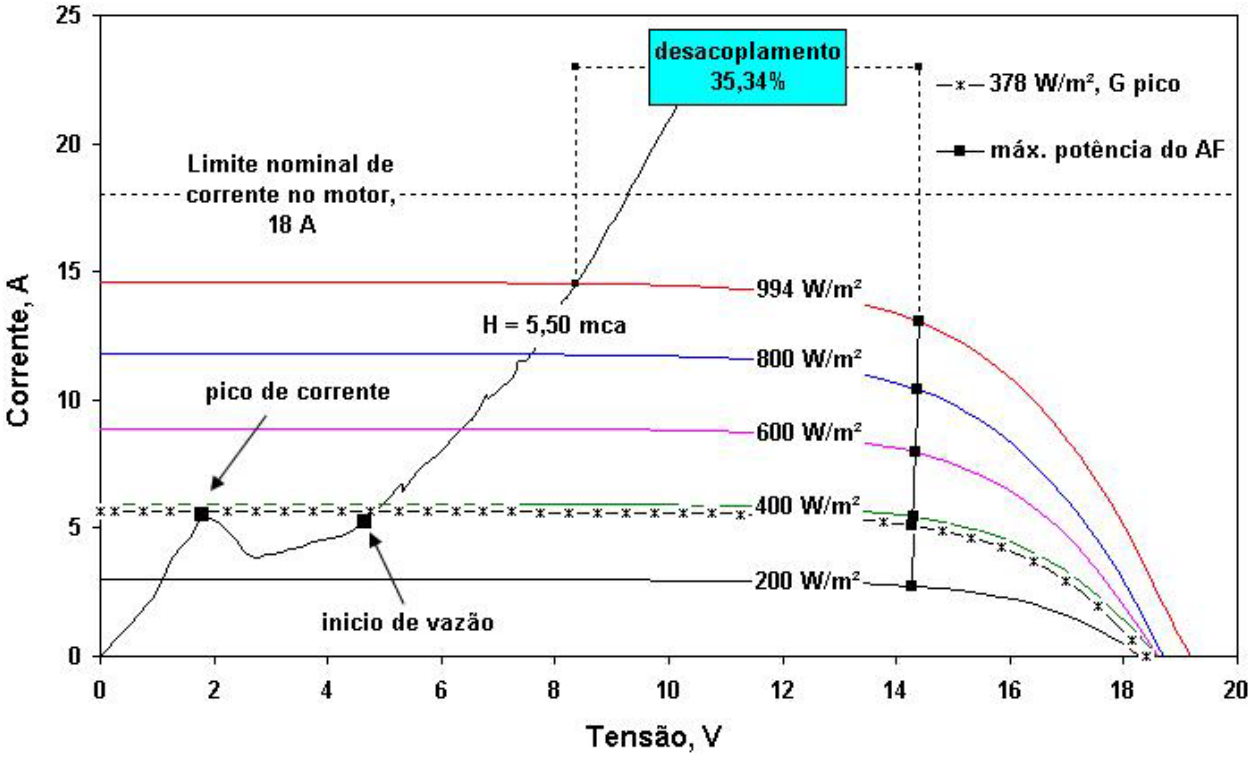


Figura 5.13 Sobreposição da curva I & V do motor com as curvas do gerador fotovoltaico formado por três módulos ligados em paralelo.

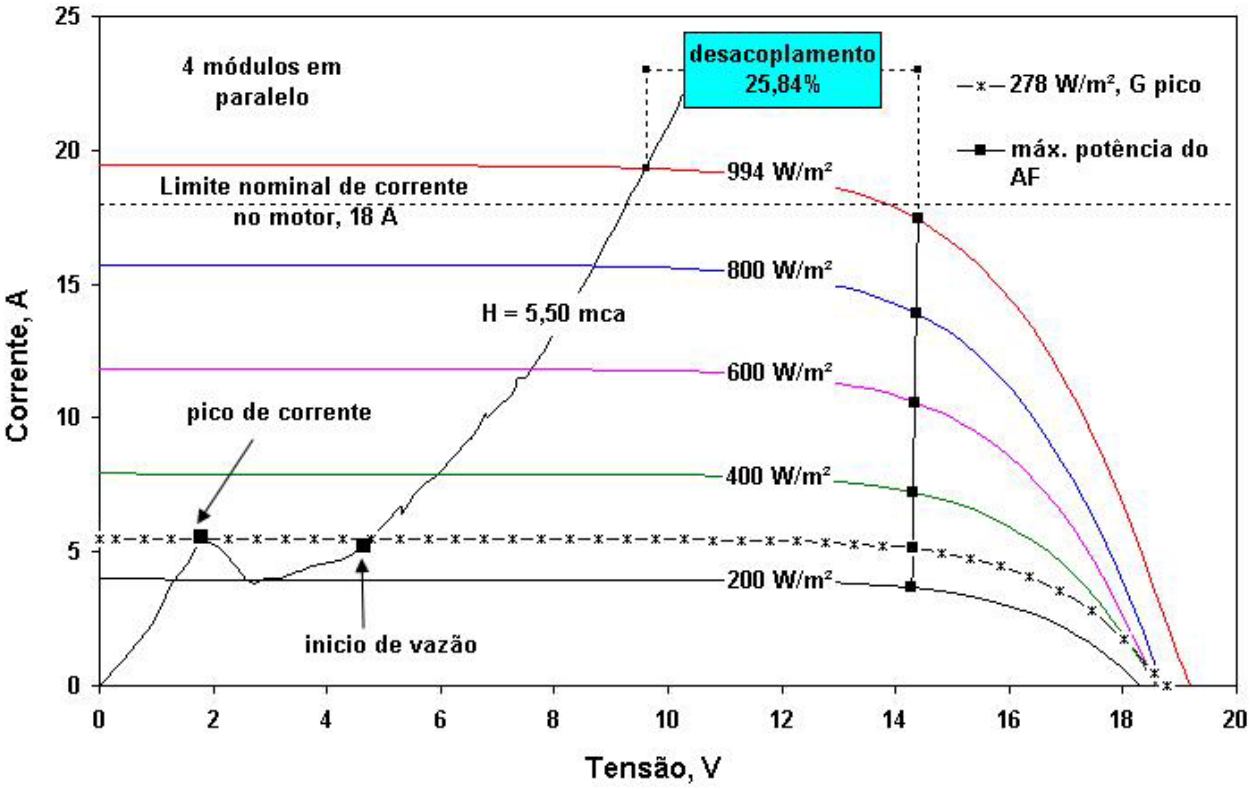


Figura 5.14 Sobreposição da curva I & V do motor com as curvas do gerador fotovoltaico formado por quatro módulos ligados em paralelo.

Na Figura 5.15 estão as curvas que representam a eficiência do acoplamento do motor da bomba centrífuga com geradores formados por dois, três e quatro módulos fotovoltaicos.

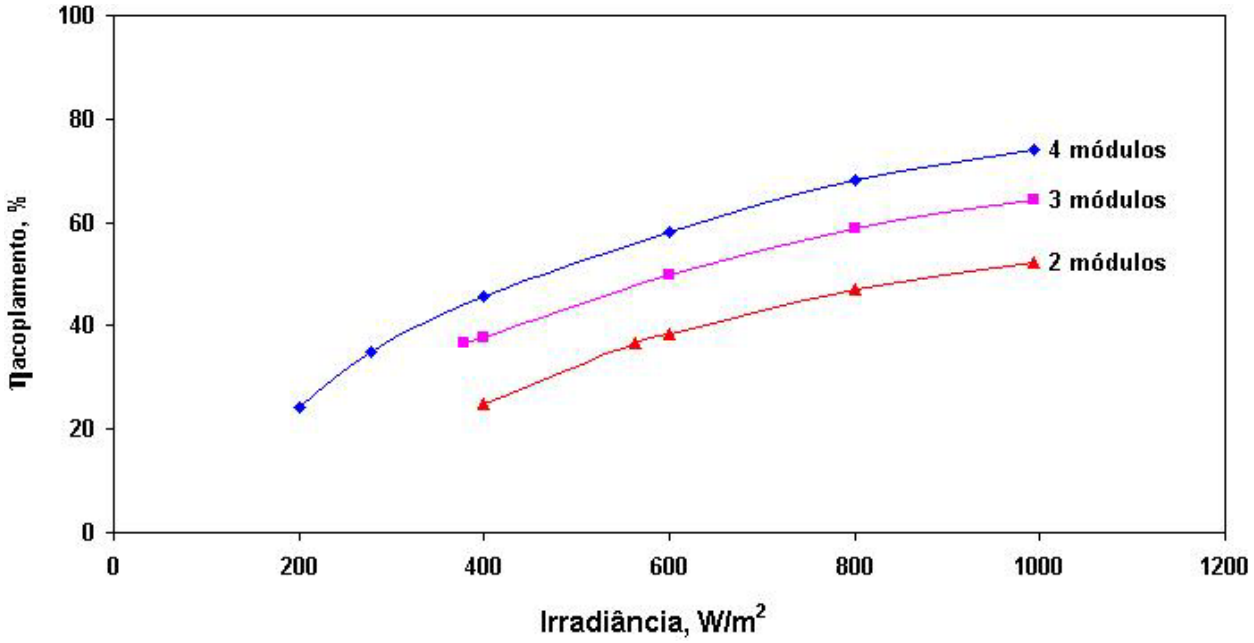


Figura 5.15 Curvas de eficiências dos acoplamentos do motor da bomba centrífuga com os geradores fotovoltaicos, para diversas irradiâncias.

Pelos gráficos das Figuras 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 conclui-se que o acoplamento mais adequado é com um arranjo formado por quatro módulos fotovoltaicos. Entretanto, para irradiâncias superiores a 920 W/m^2, esse arranjo pode produzir correntes superiores a 18 A, ponto E da figura 5.10, que ultrapassam o limite de segurança recomendado pelo fabricante do motor, conforme visto no Capítulo 4.

Nesse trabalho faz-se a análise do acoplamento direto e sem o uso de dispositivos que protejam o motor de sobrecorrentes e/ou sobretensões. Assim sendo, a escolha do arranjo adequado recai sobre aquele formado por três módulos fotovoltaicos, pois o desacoplamento é menor em relação ao arranjo formado por dois módulos fotovoltaicos.

5.3.2 Análise do acoplamento direto do arranjo fotovoltaico com o sistema de bombeamento – caso da bomba de diafragma

Observa-se pela Figura 5.16, que também para essa bomba as curvas I & V do motor variam em função da altura total do bombeamento. O aumento da altura de 4,30 para 33,50 mca ocasionou um deslocamento da curva I & V para a esquerda.

Na Figura 5.16, a altura de 4,30 mca corresponde à pressão medida com a válvula de controle de vazão totalmente aberta enquanto que a altura de 33,50 mca corresponde à pressão medida com a válvula parcialmente fechada.

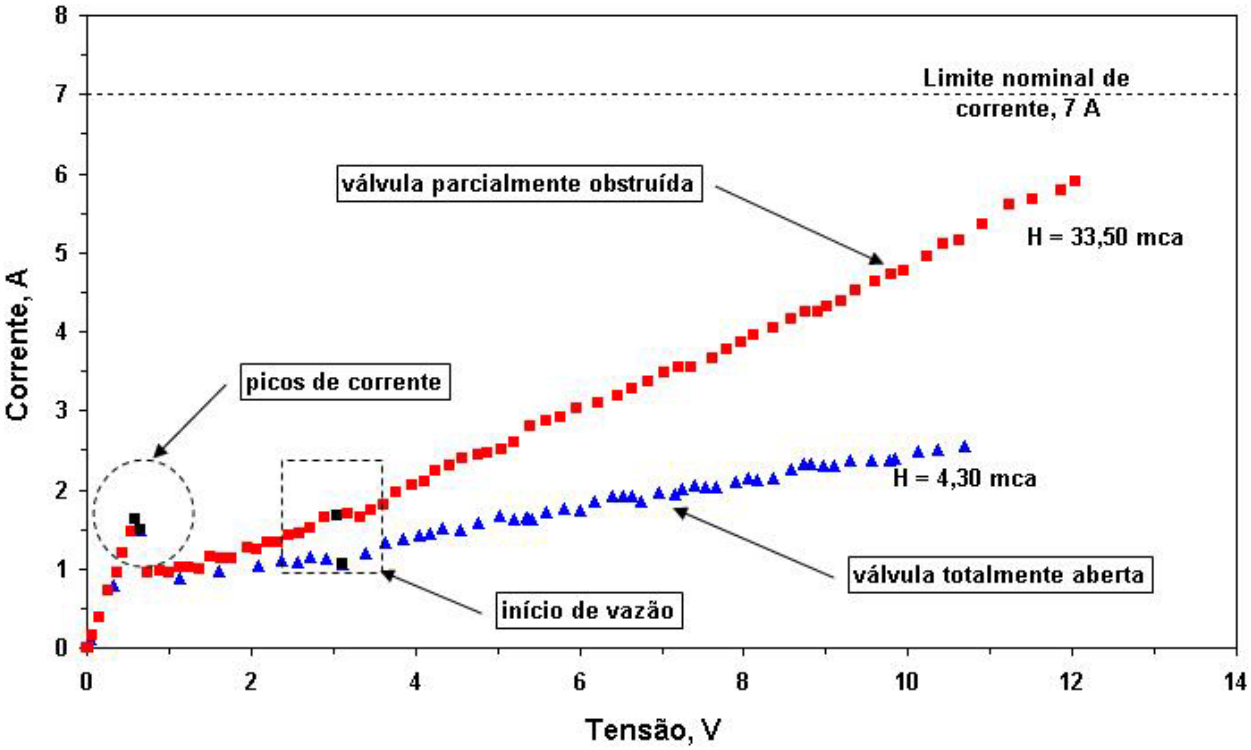


Figura 5.16 Curvas I & V para duas alturas de operação da bomba de diafragma

Nota-se pela Tabela 5.4, cujos dados são relativos à Figura 5.16, que a variação da altura não altera consideravelmente a vazão máxima bombeada, como pode ser visto na Figura 3.19. Nessa tabela, os indicativos H, I_{pico}, V_{pico}, $I_{vazão}$, $V_{vazão}$, $Q_{máx}$, são respectivamente: altura, corrente de pico, tensão de pico, corrente de início de vazão, tensão de início de vazão e vazão máxima alcançada. Conforme visto no item 3.6, a corrente e a tensão de pico correspondem à corrente e à tensão de partida ou de arranque do motor, a corrente e a tensão de início de vazão correspondem à corrente e à tensão de início de escoamento do líquido no sistema.

Tabela 5.4 Dados relativos à bomba de diafragma.

H, mca	I_{pico}, A	V_{pico}, V	$I_{vazão}$, A	$V_{vazão}$, V	$Q_{máx}$ L/min
4,30	1,59	0,65	1,07	3,06	6,60
33,50	1,62	0,58	1,61	3,03	5,50

Pela observação da Figura 5.16 e com auxílio da Tabela 5.4 verifica-se que para a altura de 4,30 mca, a corrente de início de vazão diminui em relação à corrente de pico do motor, pois não existindo o estrangulamento na tubulação a resistência ao movimento do fluido é menor e isso resulta na necessidade de uma menor corrente de início de vazão. Para a altura de 33,50 mca, a corrente de início de vazão permanece a mesma em relação à corrente de pico do motor.

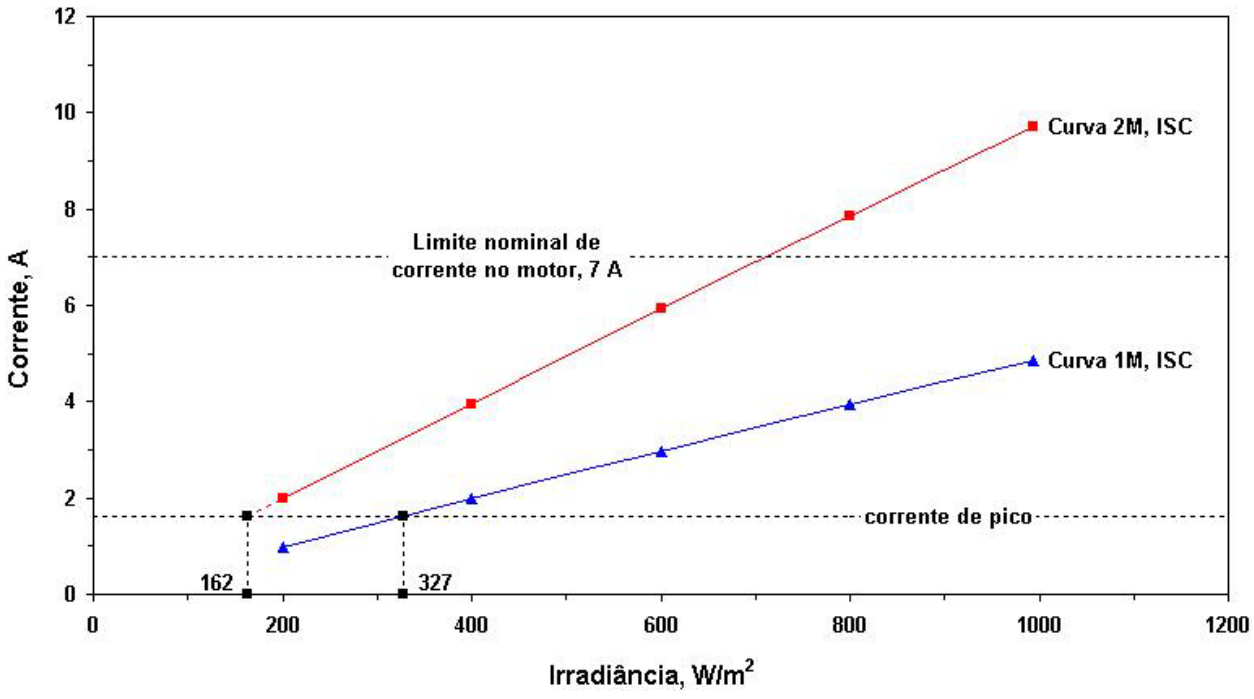


Figura 5.17 Curvas I_{SC} & G para duas configurações de arranjos fotovoltaicos. Dados extraídos da tabela 5.2.

O gráfico da Figura 5.17 permite determinar a irradiância necessária para gerar a corrente de pico do motor, para cada arranjo fotovoltaico. O valor da irradiância fica determinado quando se conhece a abscissa do ponto de encontro da curva I_{SC} & G, dos diversos arranjos e em vários níveis de irradiância, com a curva corrente de pico do motor.

Para a construção da curva corrente de pico do motor, foi considerado o dado da corrente para a altura de 33,50 mca, Tabela 5.4, por ser a maior dentre as duas correntes de pico tabeladas.

5.3.2.1 Escolha do arranjo mais adequado para operar a bomba de diafragma

Nas Figuras 5.18 e 5.19 estão sobrepostas as curvas I & V do motor e dos arranjos fotovoltaicos.

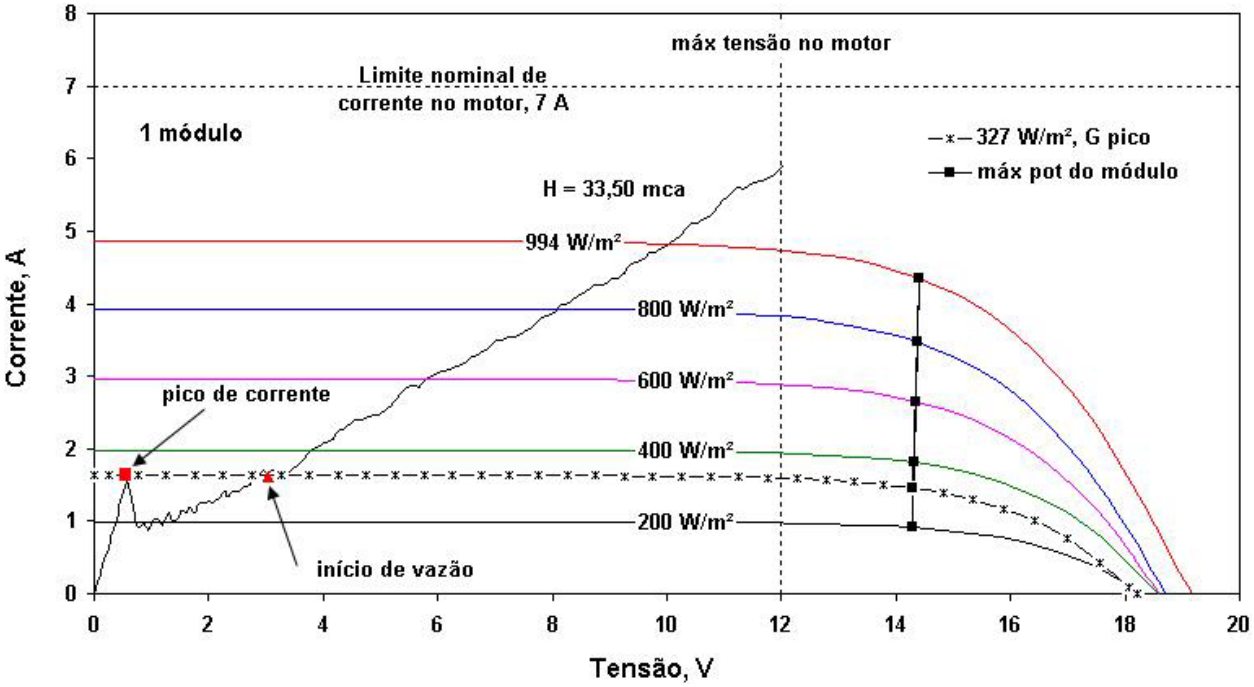


Figura 5.18 Sobreposição das curvas I & V do motor e do arranjo formado por um módulo fotovoltaico.

Verifica-se que os dois arranjos entregam potências suficientes para gerar a corrente de arranque do motor e realizar o bombeamento. O desacoplamento do arranjo de um módulo é maior do que o de dois módulos, ou seja, o arranjo de dois módulos entrega maior potência que o arranjo de um módulo. Sabendo-se que o fator desacoplamento é determinante na escolha do gerador mais adequado, a mesma deveria recair sobre o arranjo de dois módulos. Entretanto, a partir da irradiância de 600 W/m^2, esse arranjo gera tensões muito acima da máxima

recomendada, que é de 12 V, conforme visto no Capítulo 4, o que pode causar danos elétricos no motor e nas instalações se não forem usados dispositivos de segurança e proteção. Assim sendo, a escolha do arranjo mais adequado recai sobre aquele formado por um só módulo fotovoltaico.

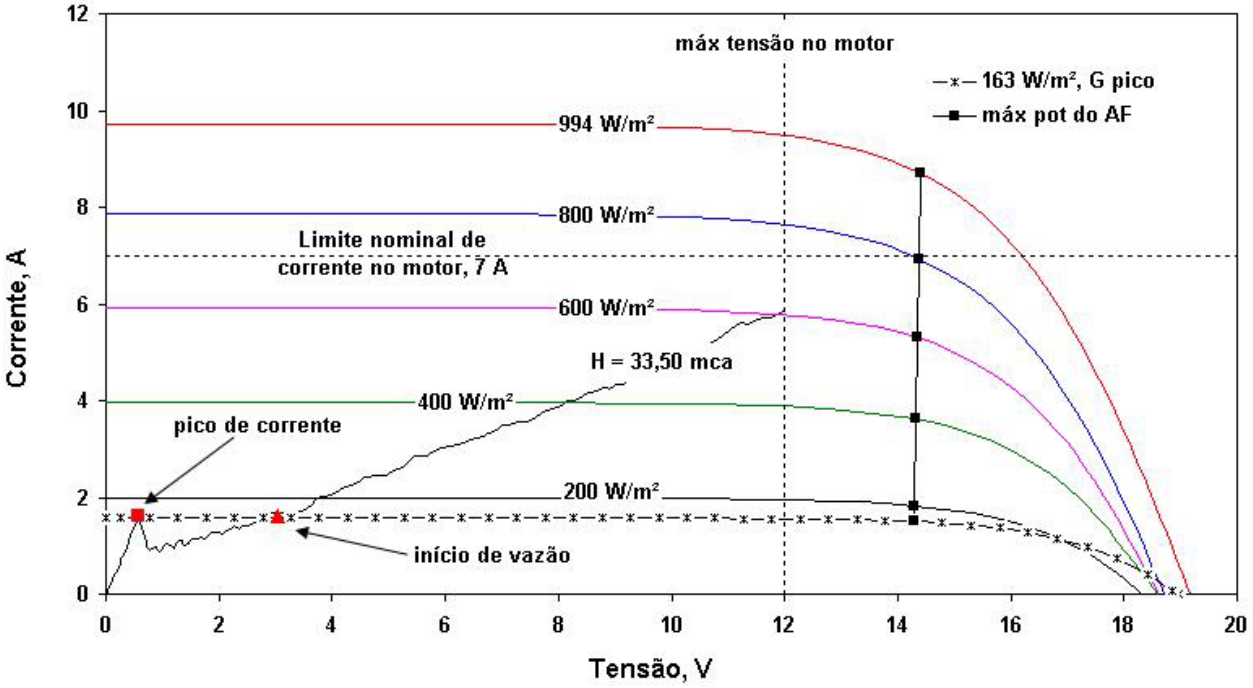


Figura 5.19 Sobreposição das curvas I & V do motor e do arranjo formado por dois módulos fotovoltaicos ligados em paralelo.

5.3 Acoplamento das bombas com os arranjos fotovoltaicos

No item 5.3 fez-se a sobreposição das curvas I & V dos motores das bombas com as curvas de diversos arranjos fotovoltaicos. Essas sobreposições foram feitas com a finalidade de determinar quais os arranjos mais adequados para operar cada um dos sistemas de bombeamento. Concluiu-se que a melhor opção de acoplamento para a bomba centrífuga recaiu sobre o arranjo de três módulos fotovoltaicos enquanto que para a bomba de diafragma com um só módulo fotovoltaico.

A seguir faz-se a sobreposição das curvas I & V dos motores das bombas quando acoplados à fonte de potência em corrente contínua e também aos arranjos fotovoltaicos, com as curvas I & V dos arranjos fotovoltaicos escolhidos para operar cada um dos sistemas de bombeamento.

5.3.1 Acoplamento da bomba centrífuga com três módulos fotovoltaicos

A Figura 5.20 mostra a sobreposição de três curvas I & V da bomba com as curvas das

variáveis de mesmo nome do arranjo formado por três módulos fotovoltaicos.

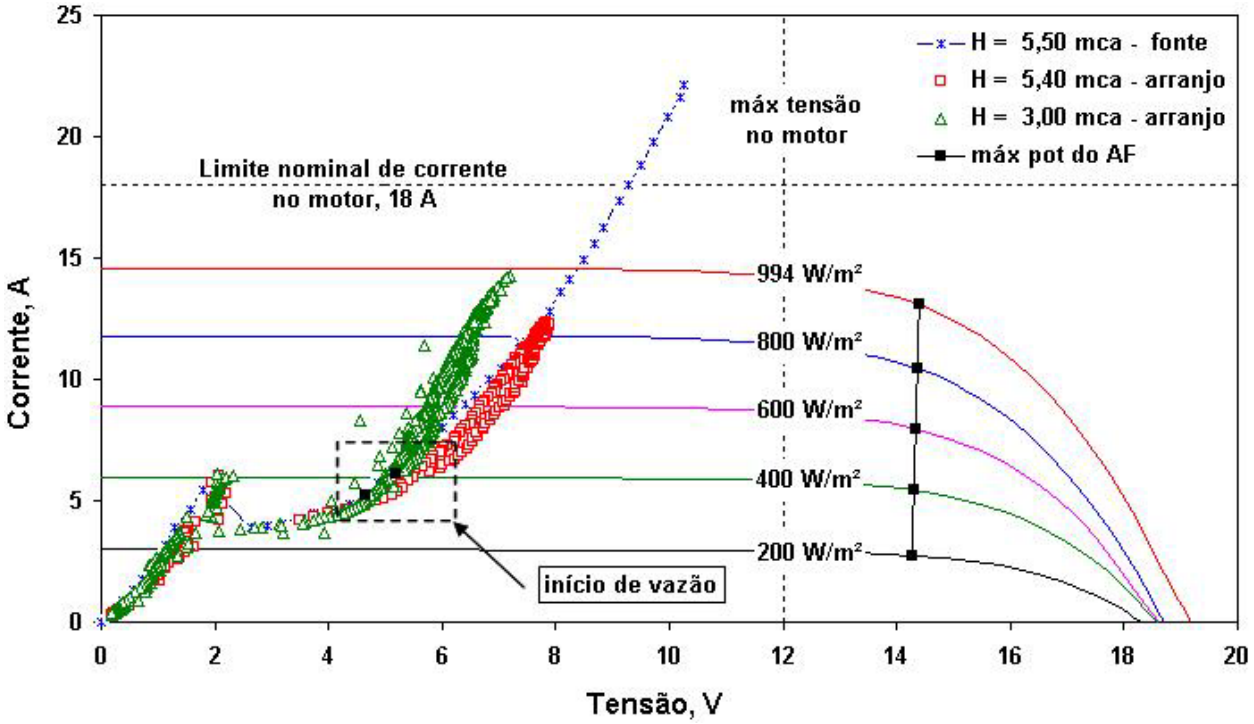


Figura 5.20 Acoplamento do conjunto motor e bomba centrífuga com o arranjo de três módulos fotovoltaicos.

As curvas correspondentes às alturas de 3,00 e 5,40 mca foram obtidas com a bomba acoplada ao gerador fotovoltaico, enquanto que a curva relativa à altura de 5,50 mca foi obtida com a bomba alimentada pela fonte de potência em corrente contínua. Nota-se que até a região de localização dos pontos de início de vazão existe coincidência entre as três curvas. A partir do início das vazões a curva de altura 3,00 mca sofre um leve deslocamento para a esquerda, isso também pode ser observado na Figura 5.9. Ao se deslocar para a esquerda, os pontos de trabalho dessa curva se afastam dos pontos de máxima potência do arranjo fotovoltaico, ou seja, o desacoplamento da curva correspondente à altura de 3,00 mca é maior do que da altura de 5,40 mca. Sabe-se que o acoplamento do sistema de bombeamento com o de potência será tanto melhor quanto menor for a distância dos pontos de trabalho aos pontos de máxima potência do arranjo fotovoltaico, assim sendo, nas condições da Figura 5.20, o melhor acoplamento se dá para a altura de 5,40 mca.

Observa-se que para as duas alturas, os pontos de trabalho se situam abaixo tanto da tensão nominal de 12 V como da corrente nominal de 18 A, logo não se corre o risco de danificar a bomba por sobretensões ou sobrecorrentes com o funcionamento contínuo nessas situações.

5.3.3 Acoplamento da bomba de diafragma com um módulo fotovoltaico

A Figura 5.21 mostra a sobreposição de três curvas I & V da bomba com as curvas das variáveis de mesmo nome do arranjo formado por um módulo fotovoltaico.

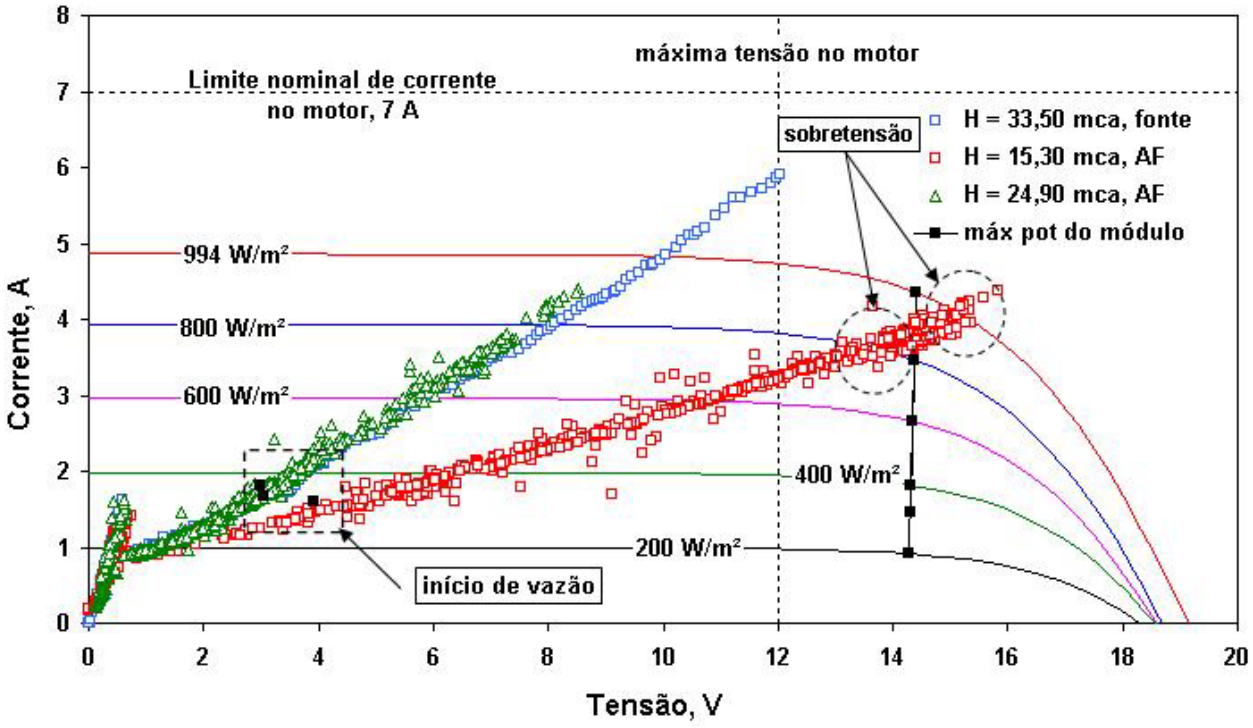


Figura 5.21 Acoplamento do conjunto motor e bomba de diafragma com um módulo fotovoltaico.

As curvas correspondentes às alturas de 15,30 e 24,90 mca foram obtidas com a bomba acoplada ao gerador fotovoltaico, enquanto que a curva relativa à altura de 33,50 mca foi obtida com a bomba alimentada pela fonte de potência em corrente contínua. Nota-se que até a região de localização dos pontos de início de vazão existe coincidência entre as três curvas. A partir do início das vazões a curva de altura 15,30 mca sofre um deslocamento para a direita, isso também pode ser observado na Figura 5.16, enquanto que a curva de altura 24,90 mca permanece coincidente com a curva de 33,50 mca. Ao se deslocar para a direita, os pontos de trabalho dessa curva se aproximam dos pontos de máxima potência do arranjo fotovoltaico, ou seja, o desacoplamento da curva correspondente à altura de 15,30 mca é menor do que da altura de 24,90 mca. Essa análise inicial pode levar a concluir que o melhor acoplamento se dá para a altura de 15,30 mca. Entretanto, deve-se levar em conta que a operação nessa pressão ou altura, por um período continuado de tempo, pode conduzir ao aparecimento de sobretensões quando os arranjos estiverem expostos a altas irradiâncias.

6 ANÁLISE DOS DESEMPENHOS

A análise do desempenho de um sistema de bombeamento passa, necessariamente, pela caracterização das bombas e dos sistemas. O processo de escolha de uma bomba para determinada aplicação depende, tecnicamente, da análise de seu desempenho quando submetida a determinadas condições operacionais. O desempenho da bomba fica caracterizado quando são conhecidas as relações entre vazão, altura, potência e eficiência do conjunto motor e bomba. Essas relações, que são expressas por meio de gráficos foram feitas conforme foi visto no Capítulo 3. Ao se fazer a sobreposição das curvas características da bomba com a curva do sistema, obtém-se a caracterização do sistema de bombeamento. A seguir é feita a caracterização das bombas e dos sistemas de bombeamento que são objeto de análise nesse trabalho.

6.2 Curva de altura e vazão – H & Q

Nos sistemas de bombeamento as alturas ou pressões desenvolvidas variam de acordo com a vazão. As curvas de altura e vazão mostram essa relação.

6.1.1 Bomba centrífuga

A Figura 6.1 mostra curvas características H & Q da bomba centrífuga para diversas tensões e/ou velocidades constantes. Os dados foram coletados durante os experimentos.

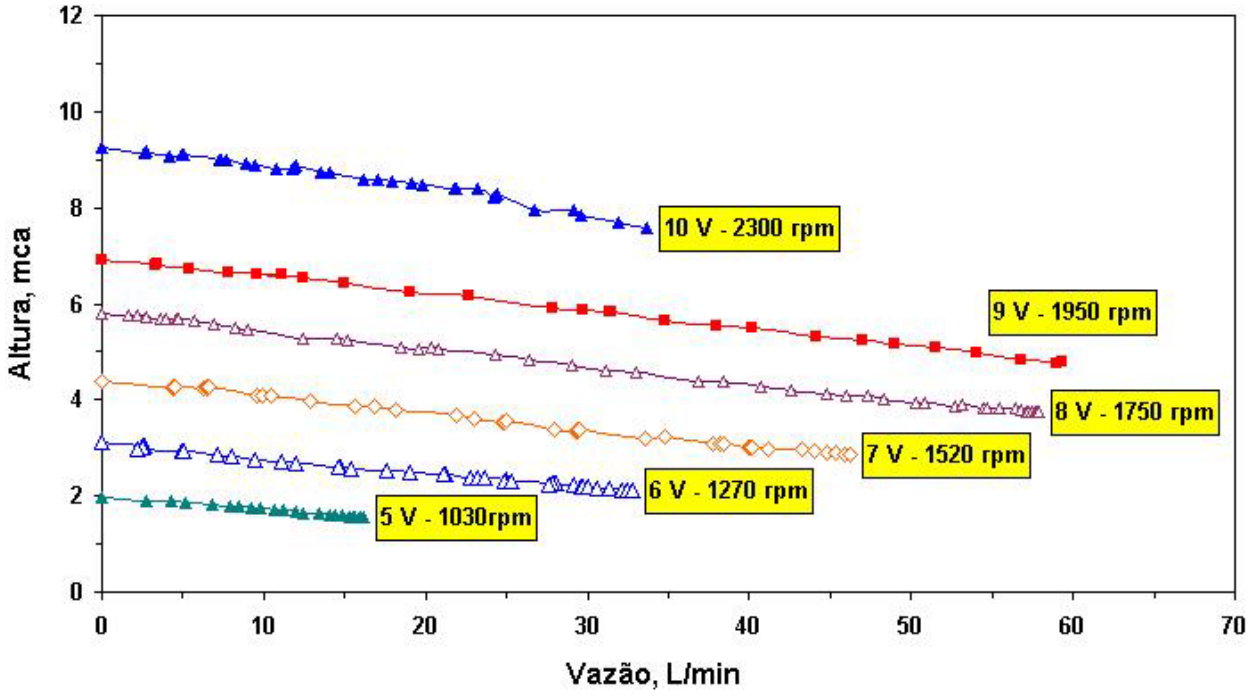


Figura 6.39 Curvas características H & Q para a bomba centrífuga.

A Figura 6.2 mostra a variação da altura com a vazão para a bomba centrífuga operando com tensão constante de 9 V e velocidade constante de 1950 rpm. Essa curva é representativa das demais curvas da Figura 6.1. Note-se que para a bomba atingir a plena vazão, ou seja, para variar desde o ponto de vazão zero até o máximo de 59 L/min, houve uma variação de 44% na altura desenvolvida.

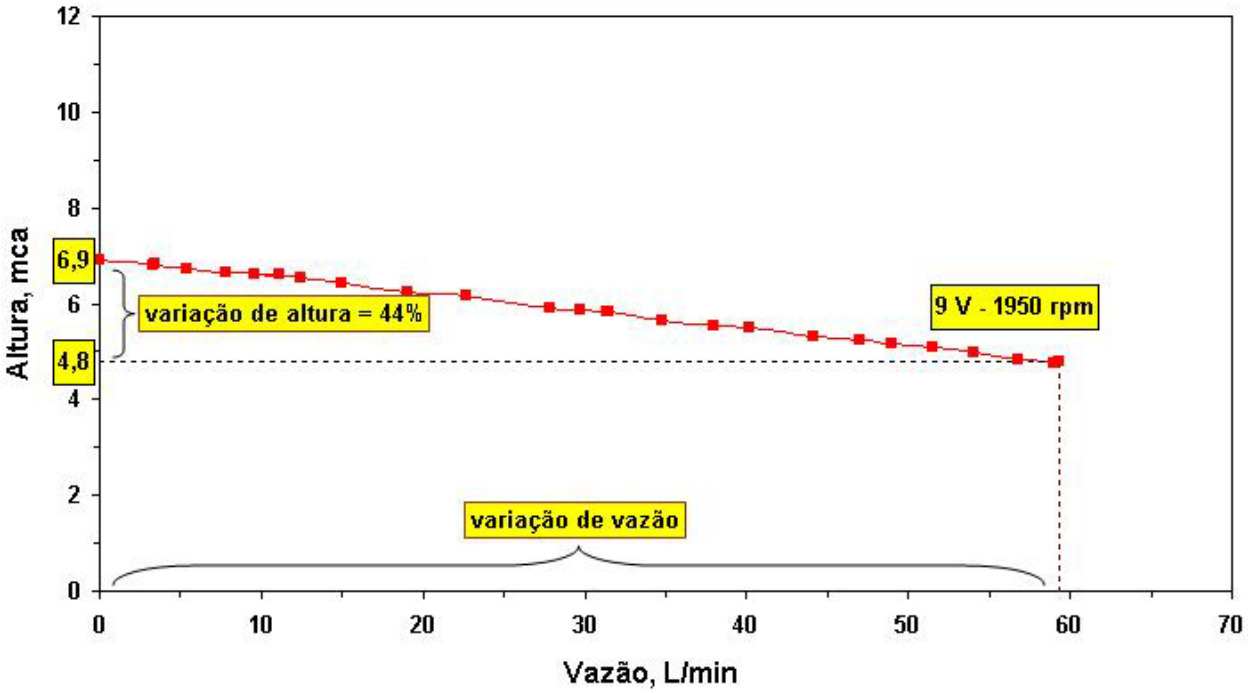


Figura 6.40 Variação da altura com a vazão para a bomba centrífuga.

6.1.2 Bomba de diafragma

Nessa bomba, onde o fluxo do líquido é pulsante, a altura também varia conforme o grau de fechamento da válvula de controle de vazão, ou seja, a pressão que a bomba desenvolve reduz na medida em que a vazão aumenta.

Nesse tipo de bomba, em função do dispositivo de segurança visto no Capítulo 4 item 4.1.7, não é possível bloquear completamente a saída do fluido quando a bomba estiver funcionando, assim sendo, os valores de vazões zero nunca serão alcançados quando o equipamento estiver em operação.

A Figura 6.3 mostra curvas características H & Q da bomba diafragma usada nesse trabalho, para diversas tensões e/ou velocidades constantes. As curvas foram obtidas com os dados coletados durante os experimentos.

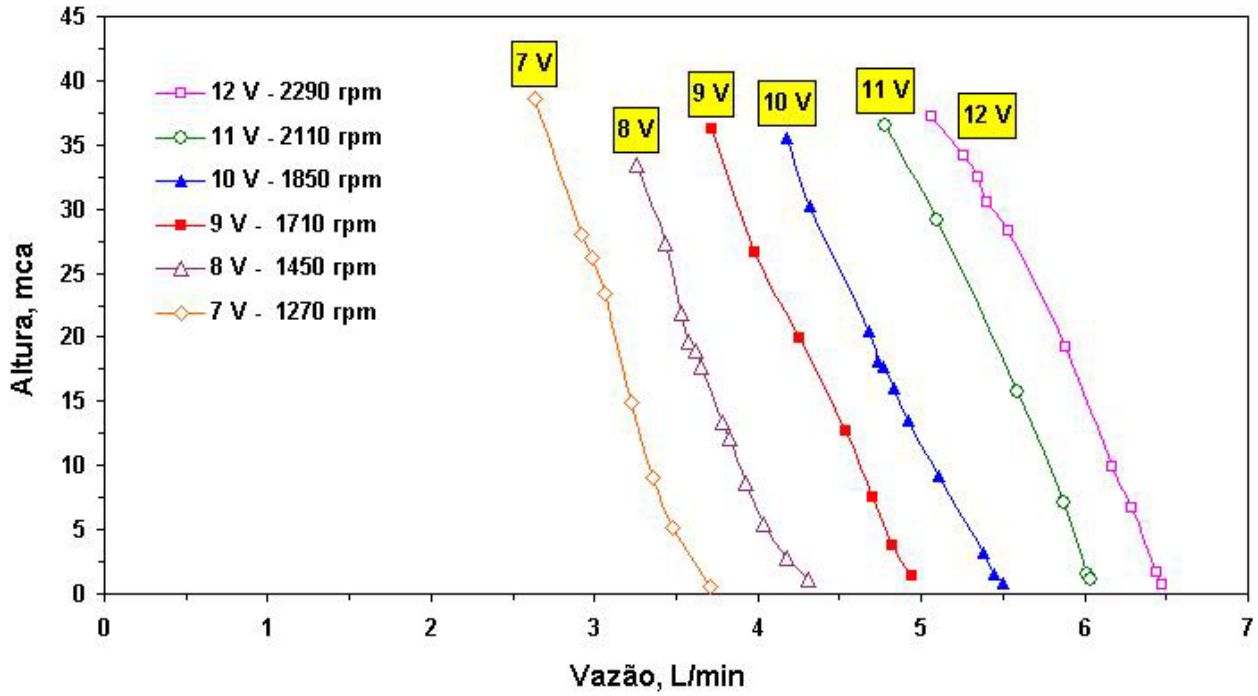


Figura 6.41 Curvas características H & Q para a bomba de diafragma, obtidas nos experimentos.

A Figura 6.4 mostra a sobreposição de duas curvas H & Q, da bomba de diafragma. Uma das curvas foi obtida com dados fornecidos pelo fabricante e a outra com medidas realizadas durante a execução desse trabalho. A sobreposição mostra que o comportamento das curvas é bastante aproximado.

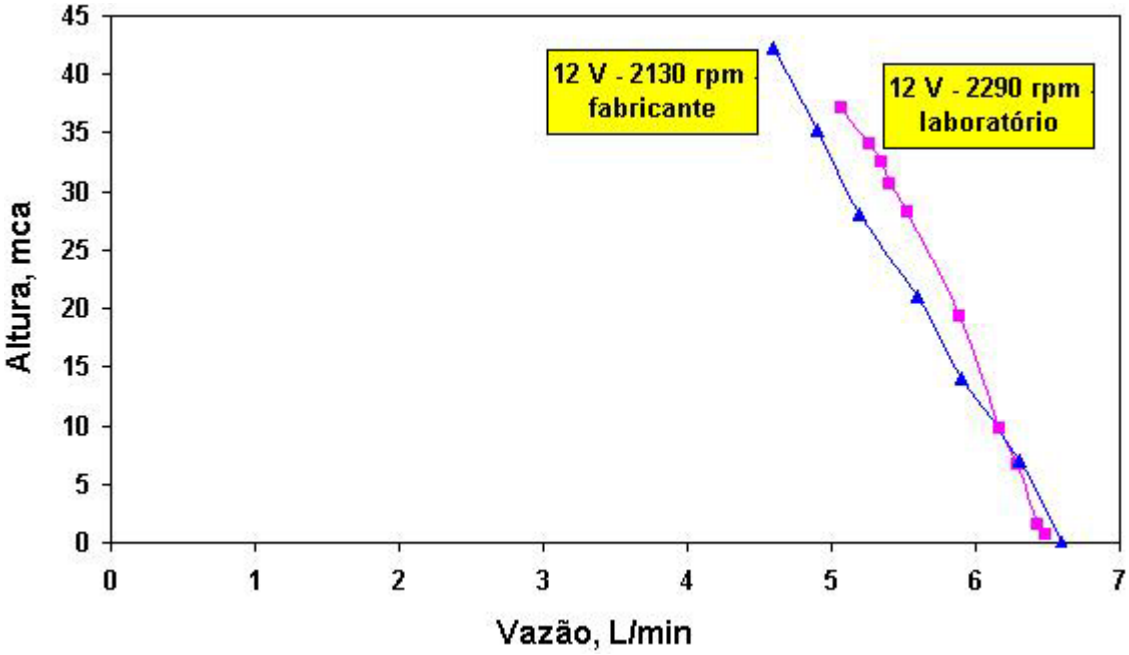


Figura 6.42 Sobreposição das curvas H & Q, da bomba de diafragma, obtidas com dados fornecidos pelo fabricante e com medidas feitas durante esse trabalho.

A Figura 6.5 mostra a variação da altura com a vazão para a bomba de diafragma operando com tensão constante de 9 V e velocidade constante de 1710 rpm. Essa curva é representativa das demais curvas da Figura 6.3. Nessa bomba a vazão pouco depende da altura ou grau de abertura e/ou fechamento da válvula de controle de vazão. Note-se que para a bomba atingir a máxima vazão, houve uma variação de 97 % na altura desenvolvida.

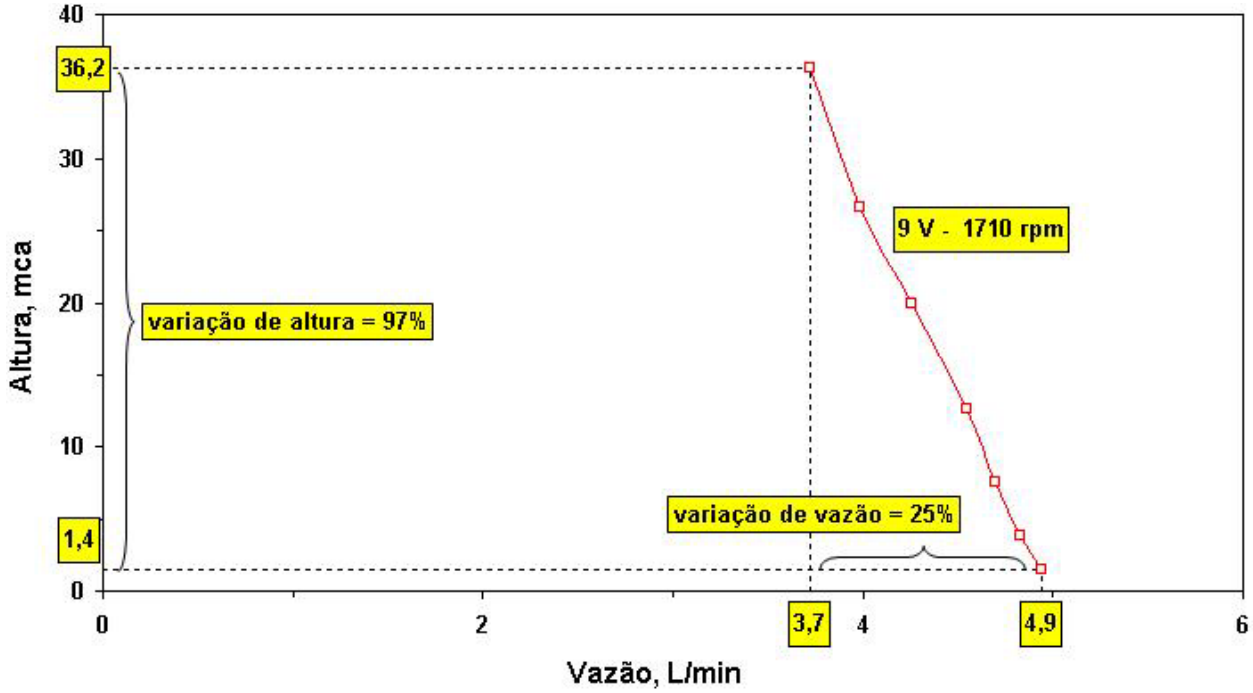


Figura 6.43 Variação da altura com a vazão para a bomba de diafragma.

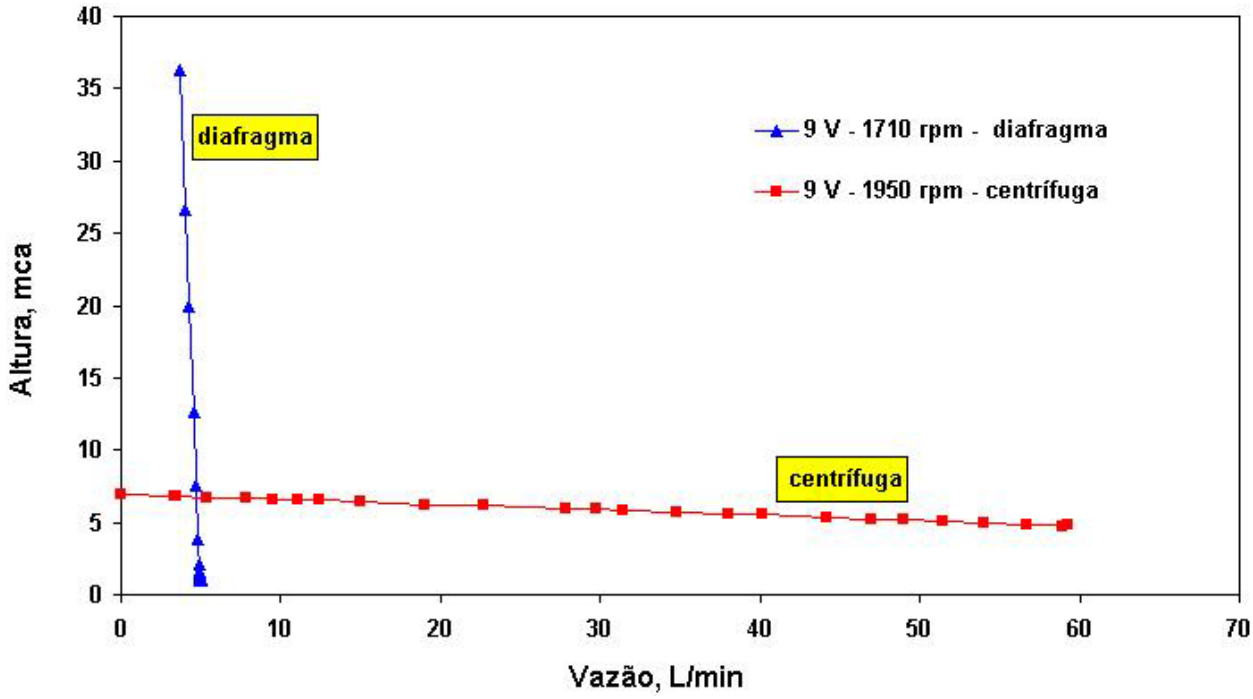


Figura 6.6 Sobreposição de curvas H & Q da bomba centrífuga e da bomba de diafragma.

Na Figura 6.6 estão sobrepostas as curvas H & Q da bomba centrífuga e da bomba de diafragma, operando em 9V/1950 rpm e 9V/1710 rpm, respectivamente. Note-se que a bomba centrífuga trabalha com pequenas variações de altura e grandes variações de vazão, enquanto que a bomba de diafragma trabalha com grandes variações de altura e pequenas variações de vazão. Pode-se dizer que na bomba centrífuga, a entrega de fluido depende da altura enquanto que na bomba de diafragma é independente.

6.2 Curva de potência & vazão – Pot & Q

A necessidade de potência varia de acordo com a quantidade de fluido que circula na bomba na unidade de tempo. A relação existente entre a potência de entrada e a vazão é mostrada pela curva de potência e vazão. O cálculo da potência elétrica é dado pela equação 3.5.

6.2.1 Bomba centrífuga

Nessas bombas a potência varia conforme o grau de fechamento da válvula de controle de vazão, ou seja, a potência que essa bomba solicita aumenta na medida em que a vazão aumenta.

A Figura 6.7 mostra curvas características Pot & Q da bomba centrífuga usada nesse trabalho, para diversas tensões e/ou velocidades constantes.

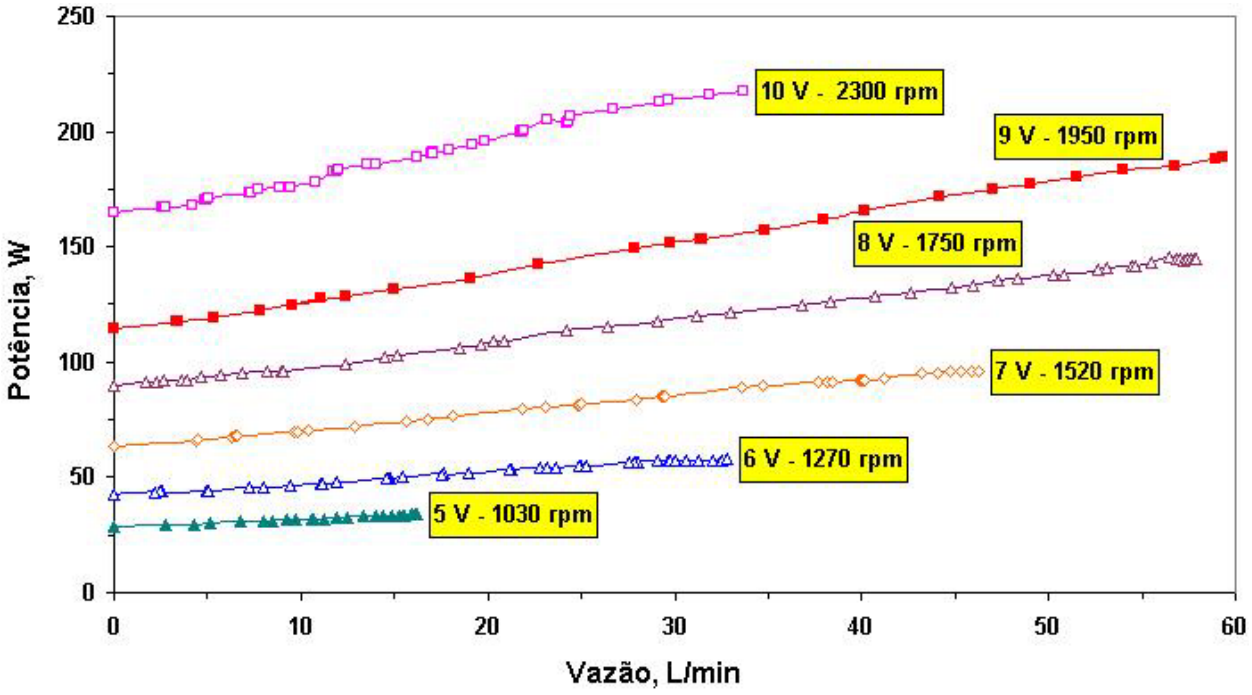


Figura 6.7 Curvas características Pot & Q para a bomba centrífuga.

A Figura 6.8 mostra a variação da potência com a vazão para a bomba centrífuga, quando

operando com tensão constante de 9 V e velocidade constante de 1950 rpm. Essa curva é representativa das demais curvas da Figura 6.1. Note-se que para a bomba atingir a plena vazão, ou seja, para variar desde o ponto de vazão zero até o máximo de 59 L/min, houve uma variação de 66 % na potência solicitada pelo motor.

É importante observar que em bombas centrífugas onde a altura decresce e a potência aumenta com o respectivo acréscimo da vazão, poderão ocorrer correntes e/ou tensões muito altas. Essas por sua vez, podem provocar danos elétricos e/ou mecânicos tanto nos motores quanto nas bombas.

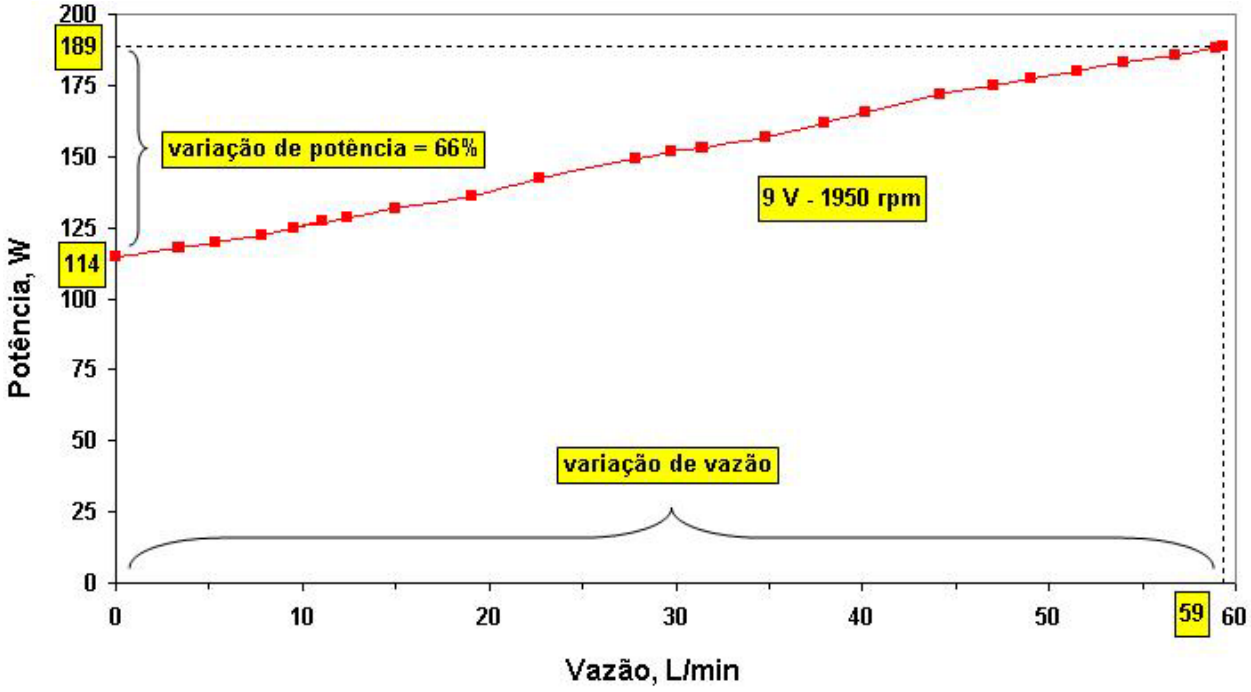


Figura 6.8 Variação da potência com a vazão para a bomba centrífuga.

6.2.2 Bomba de diafragma

A Figura 6.9 mostra curvas características Pot & Q da bomba de diafragma usada nesse trabalho, para diversas tensões e/ou velocidades constantes.

Nessa bomba, onde o movimento do líquido é pulsante, a potência também varia conforme o grau de fechamento da válvula de controle de vazão. Nesse caso, a potência que a bomba solicita diminui na medida em que a vazão aumenta. Do mesmo modo, na medida em que a vazão decresce, há um acréscimo da potência solicitada pela bomba.

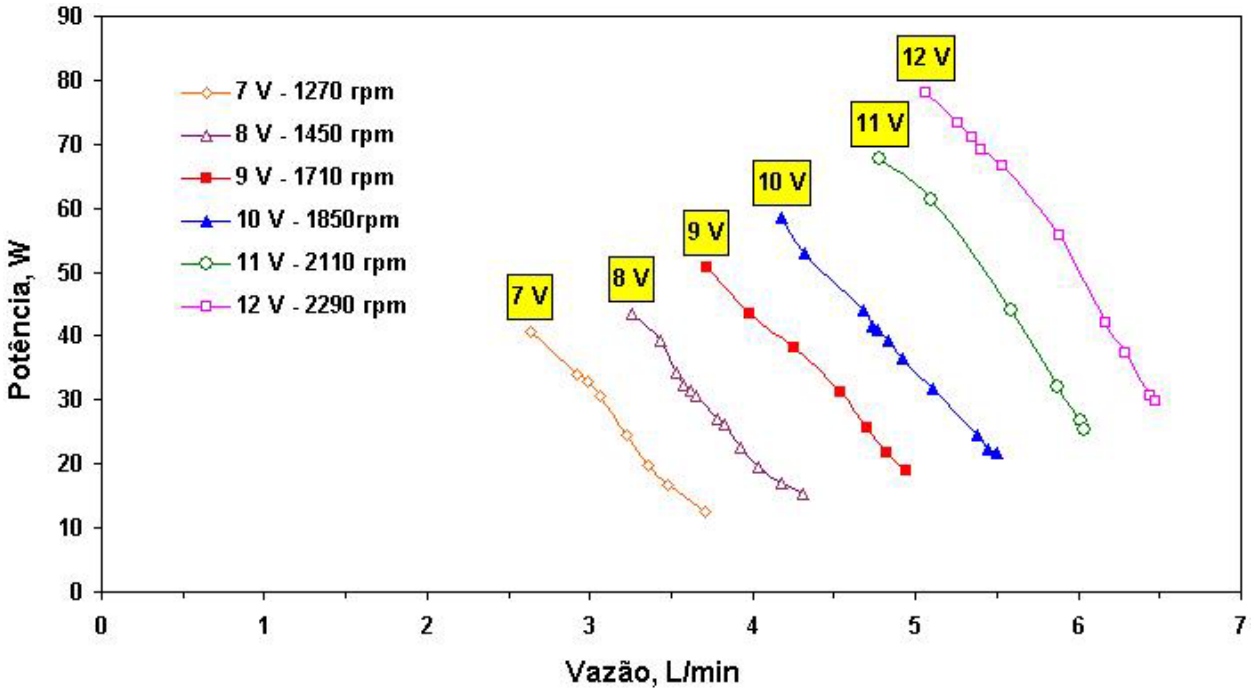


Figura 6.9 Curvas características Pot & Q para a bomba de diafragma.

A Figura 6.10 mostra a variação da potência com a vazão para a bomba de diafragma, quando operando com tensão constante de 9 V e velocidade constante de 1710 rpm. Essa curva é representativa das demais curvas da Figura 6.9. Note-se que ao atingir a plena vazão houve uma variação de 65 % na potência solicitada pelo motor.

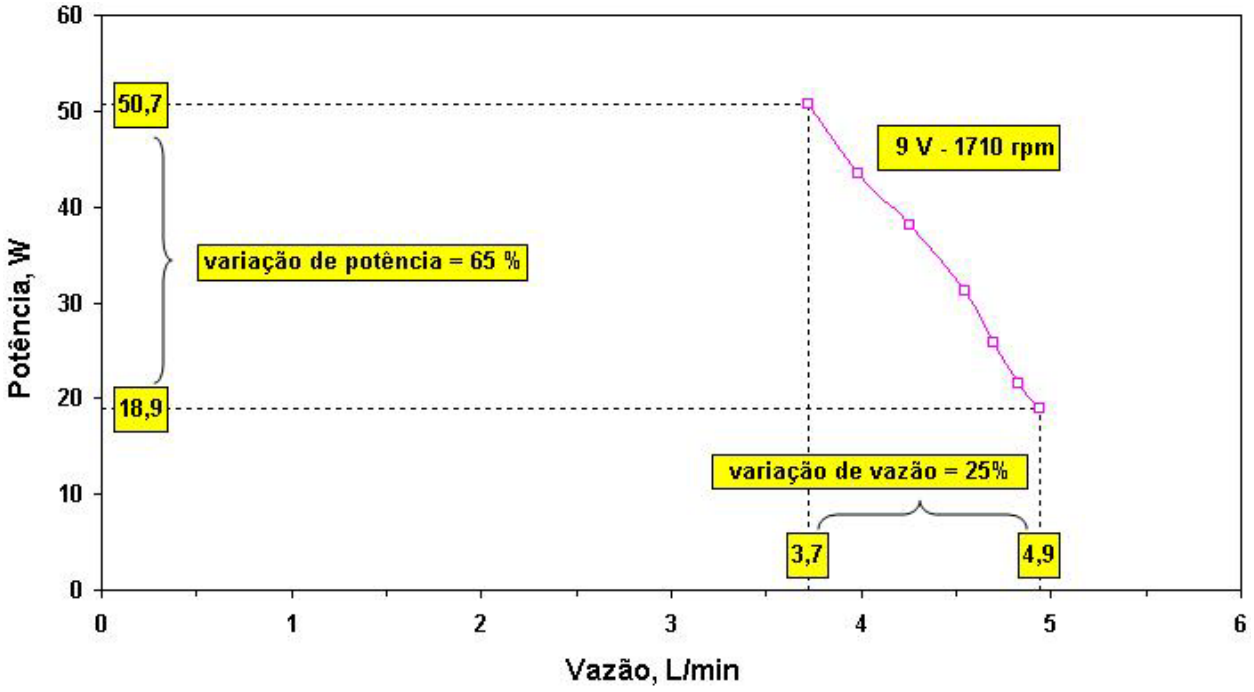


Figura 6.10 Variação da potência com a vazão para a bomba centrífuga

Na Figura 6.11 estão sobrepostas as curvas de altura e vazão, H & Q, assim como de potência e vazão, Pot & Q, para ambas as bombas. As curvas da bomba centrífuga foram obtidas com tensão de 9 V e velocidade de 1950 rpm e as curvas da bomba de diafragma foram obtidas com 9 V e 1710 rpm, conforme visto nas Figuras 6.8 e 6.10 respectivamente. Nesse gráfico, que serve somente para mostrar o comportamento das variáveis envolvidas, a escala para o conjunto de curvas da bomba centrífuga é diferente da escala do conjunto de curvas da bomba de diafragma.

As considerações feitas a seguir se referem às variações de vazões desde valores mínimos até valores de vazões plenas alcançados pelas bombas, ou seja, desde zero até 59 L/min para a bomba centrífuga e de 3,7 até 4,9 L/min para a bomba de diafragma. Para ambas as bombas o aumento de vazão acarreta decréscimo de altura desenvolvida, 44% para a bomba de centrífuga e 97% para a bomba de diafragma. Quanto à potência, aumenta para a bomba centrífuga em 66% e diminui para a bomba de diafragma na ordem de 65%.

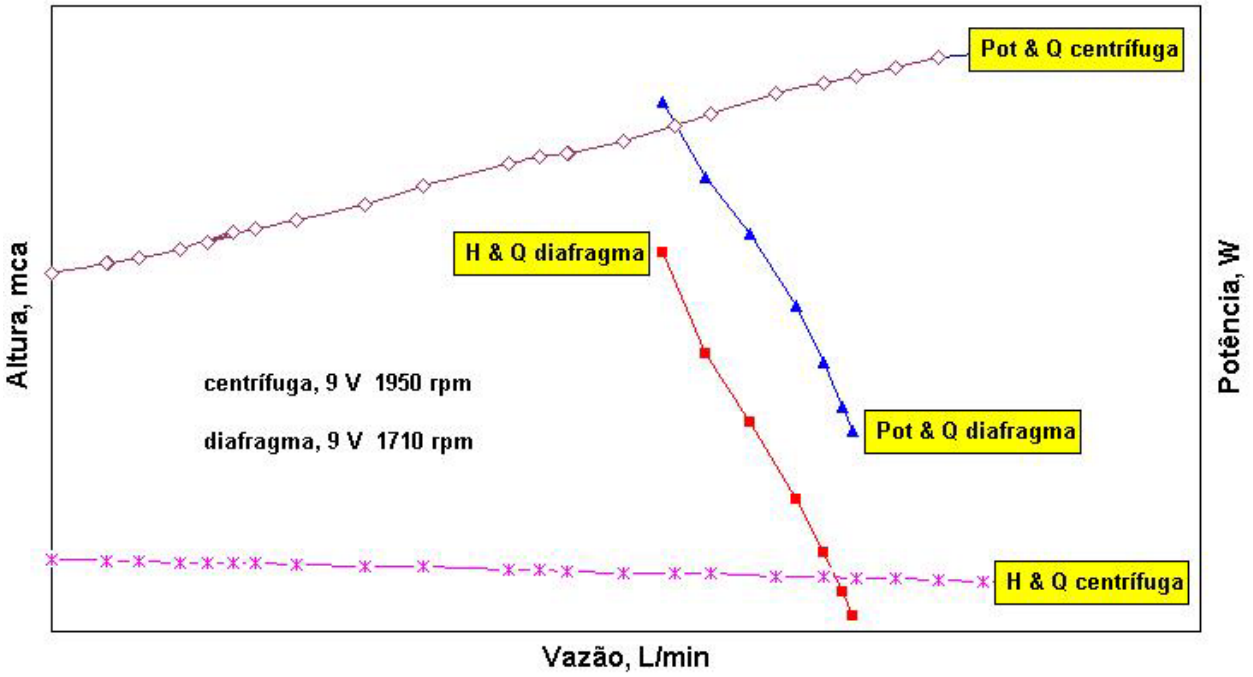


Figura 6.11 Sobreposição de curvas da H & Q e Pot & Q das duas bombas.

6.3 Curvas de eficiência e vazão – η & Q

Sempre que há o fluxo de um fluido em determinada direção existem também resistências ao seu movimento, as quais dependem das características próprias do liquido escoado, do regime de escoamento, dos materiais e equipamentos usados nas instalações e tubulações, assim como da velocidade com a qual o fluido está animado. O movimento do líquido é resultante da

transformação de energia elétrica da fonte em energia mecânica para a bomba e finalmente em energia hidráulica para o líquido. Essas transformações de energia geram perdas constantes e inevitáveis. Como decorrência disso a necessidade de energia elétrica é sempre maior do que a necessidade de energia hidráulica. Assim sendo, se faz necessário determinar com qual eficiência o conjunto formado pelo motor e a bomba opera. Ela é expressa pela relação entre a potência hidráulica produzida e potência elétrica solicitada pelo motor, ou seja:

$$\text{eficiência do conjunto motor e bomba} = \frac{\text{potência hidráulica produzida}}{\text{potência elétrica solicitada}}$$

A relação existente entre a eficiência do conjunto motor e bomba e a vazão é mostrada pela curva de eficiência e vazão. O cálculo da eficiência do conjunto motor e bomba é dado pela equação 3.7.

6.3.1 Bomba centrífuga

A Figura 6.12 mostra curvas características η & Q da bomba usada nesse trabalho, para diversas tensões e/ou velocidades constantes.

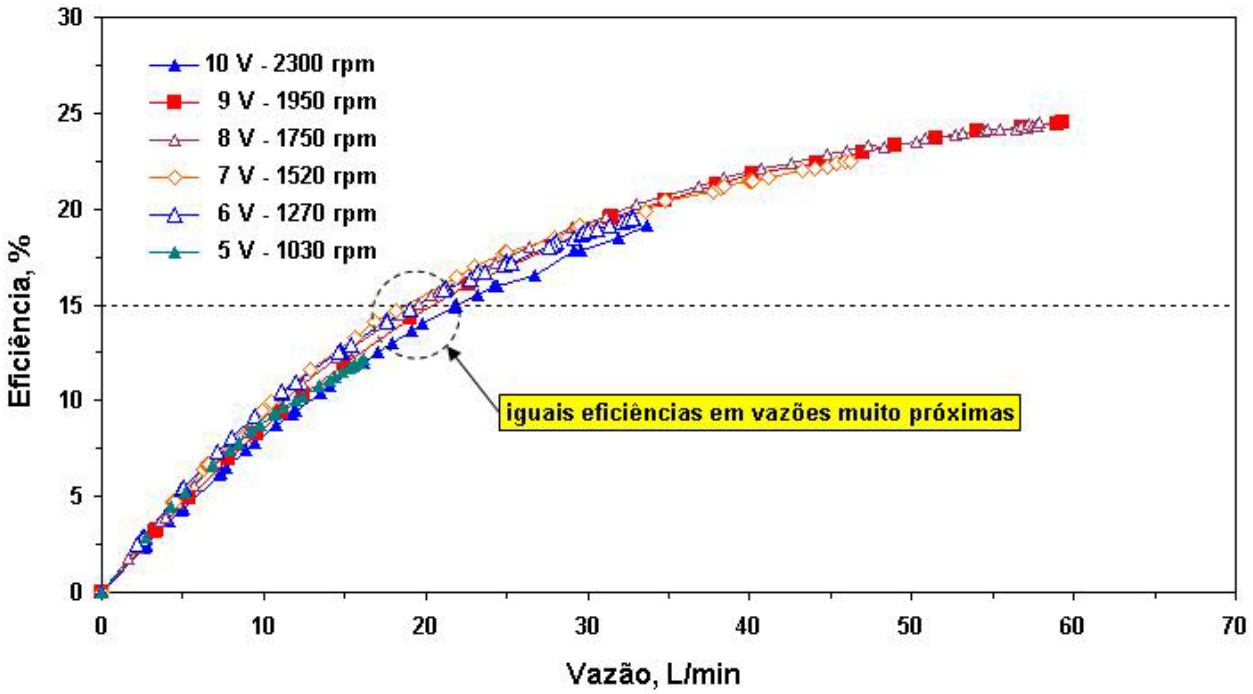


Figura 6.12 Curvas η & Q da bomba centrífuga.

Relativamente à Figura 6.12, nota-se que as diversas curvas, obtidas com a bomba operando com diferentes tensões e/ ou velocidades constantes, estão sobrepostas. Nesse caso existe um acréscimo não linear da eficiência do conjunto motor e bomba em resposta ao aumento de vazão, com a bomba operando em uma dada velocidade constante. A sobreposição das curvas caracteriza que determinado nível de eficiência do conjunto motor e bomba ocorre para a mesma vazão ou para vazões muito aproximadas, independentemente da velocidade e/ou tensão em que o motor está operando.

6.3.2 Bomba de diafragma

A Figura 6.13 mostra curvas características η & Q da bomba usada nesse trabalho, para diversas tensões e/ou velocidades constantes.

No caso dessa bomba, há o decréscimo da eficiência do conjunto motor e bomba com o aumento da vazão. Observa-se que um determinado valor de eficiência do conjunto motor e bomba, para diferentes tensões e/ou velocidades constantes, ocorre em distintos valores de vazões.

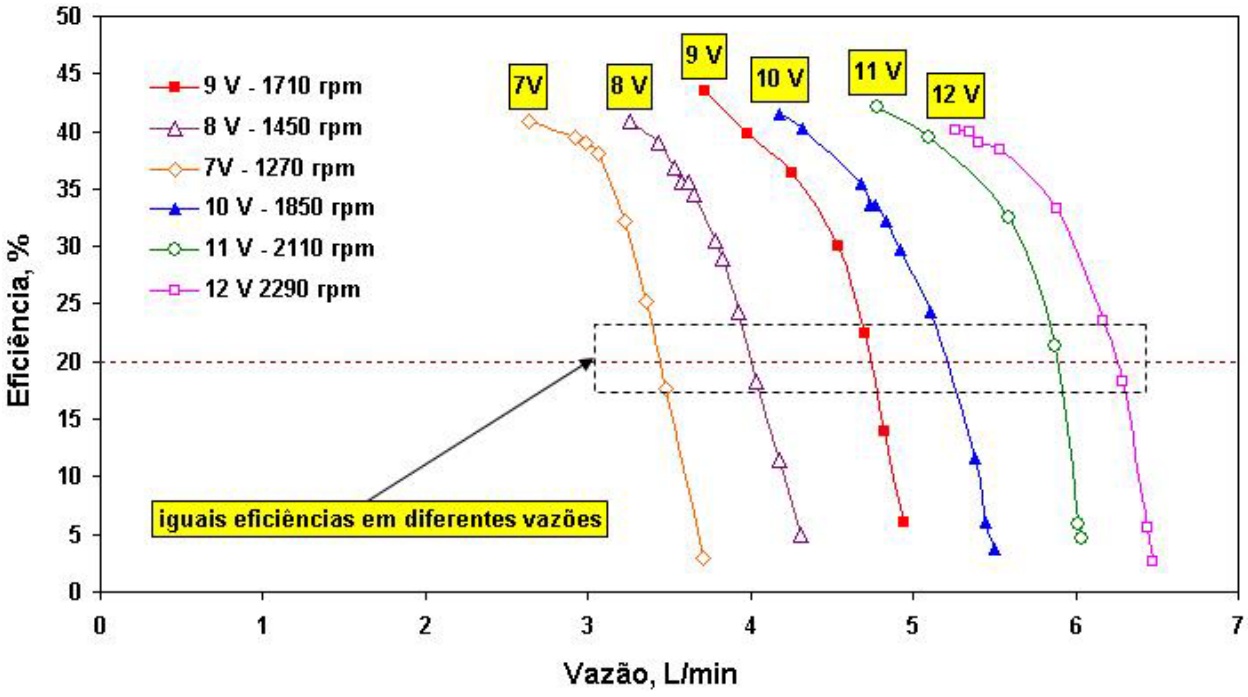


Figura 6.13 Curvas η & Q da bomba de diafragma.

Na Figura 6.14 estão sobrepostas as curvas de eficiência e vazão, η & Q, para as duas bombas. As curvas da bomba centrífuga foram obtidas com tensão de 9 V e velocidade de 1950 rpm e as curvas da bomba de diafragma foram obtidas com 9 V e 1710 rpm.

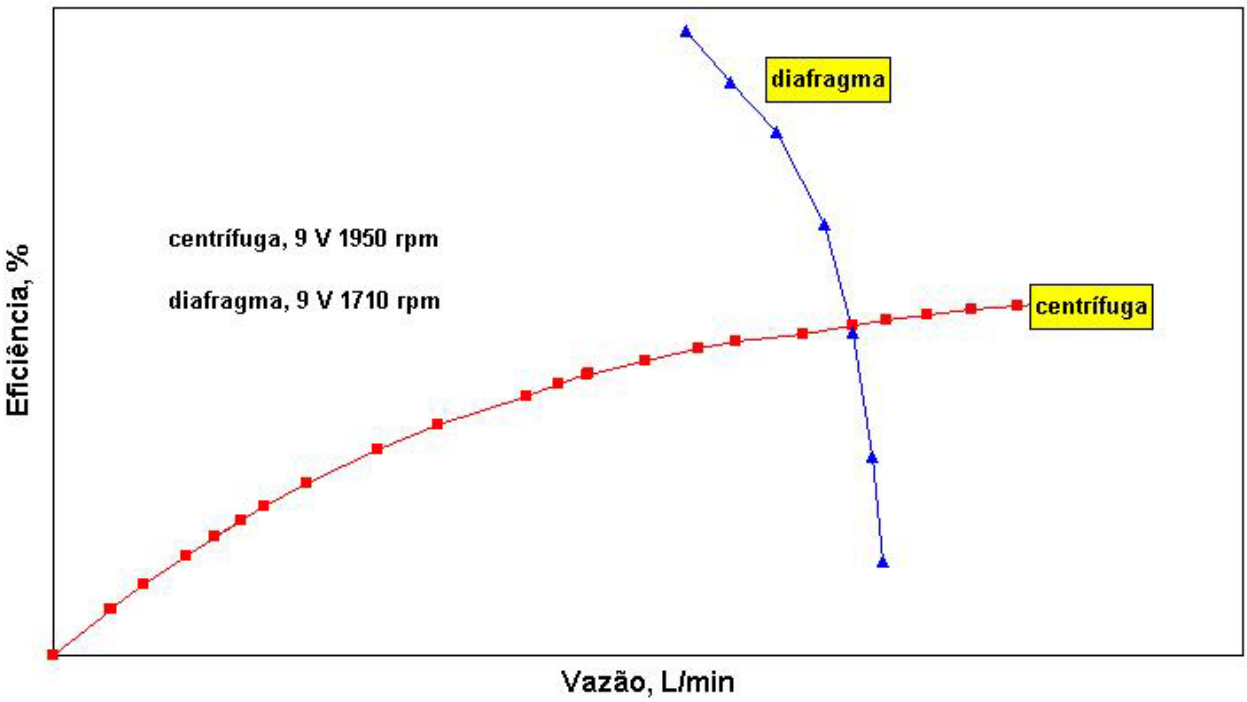


Figura 6.14 Sobreposição de curvas da η & Q das duas bombas.

Nesse gráfico, que serve somente para mostrar o comportamento das variáveis envolvidas, a escala usada na construção da curva da bomba centrífuga é diferente da escala usada na construção da curva da bomba de diafragma. O comportamento das curvas de eficiência e vazão das bombas é distinto. Para a bomba centrífuga a eficiência do conjunto motor e bomba aumenta com a vazão, enquanto que para a bomba de diafragma a mesma eficiência diminui com o aumento de vazão.

6.4 Curvas dos sistemas

A curva do sistema representa a energia que a bomba deve produzir para movimentar o líquido. A energia produzida destina-se a vencer as resistências impostas pela altura que o líquido deve ser elevado – altura estática e também pela oposição causada ao movimento pelas perdas por atrito e pela velocidade que o líquido está animado – altura dinâmica. As perdas, tanto estáticas quanto dinâmicas, podem ser graficamente relacionadas, resultando em uma curva chamada curva H & Q do sistema ou simplesmente curva do sistema.

6.4.1 Bomba centrífuga

A Figura 6.15 mostra a curva do sistema operado pela bomba centrífuga, para duas aberturas da válvula de controle de vazão. Note-se que o fechamento da válvula, que corresponde a um aumento de altura, desloca a curva para a esquerda.

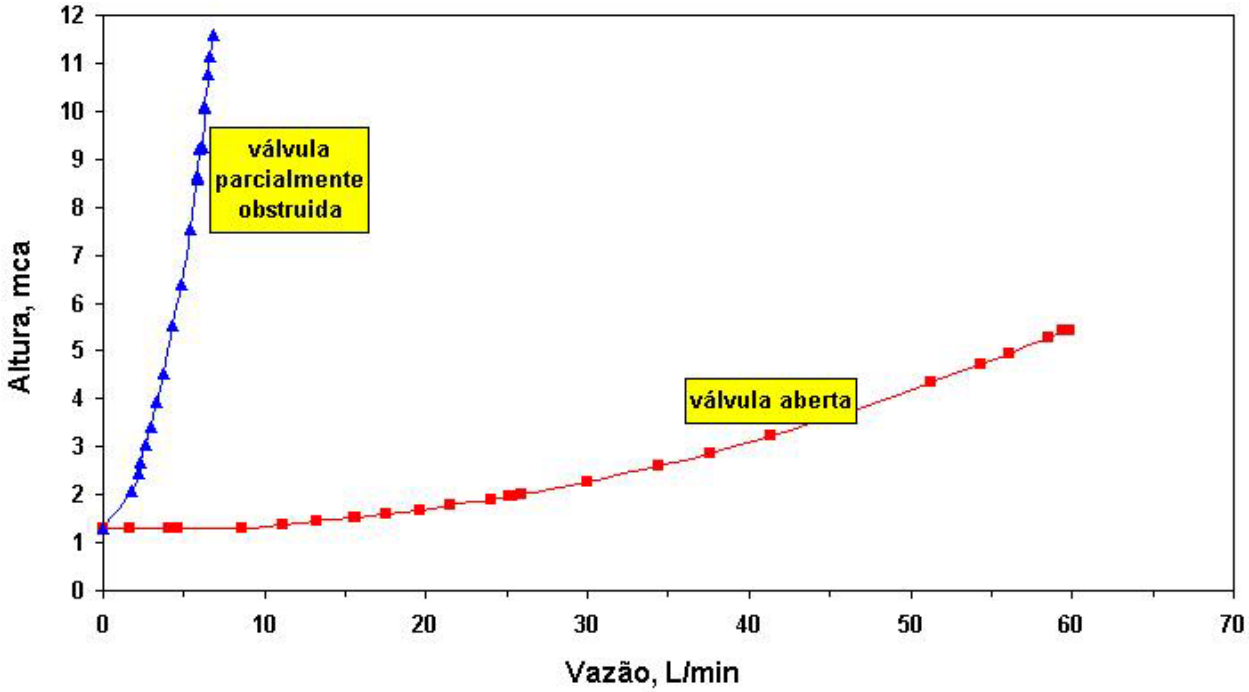


Figura 6.15 Curvas do sistema operado pela bomba centrífuga, para duas aberturas da válvula de controle de vazão.

6.4.2 Bomba de diafragma

A Figura 6.16 mostra a curva do sistema operado pela bomba de diafragma, para duas aberturas da válvula de controle de vazão.

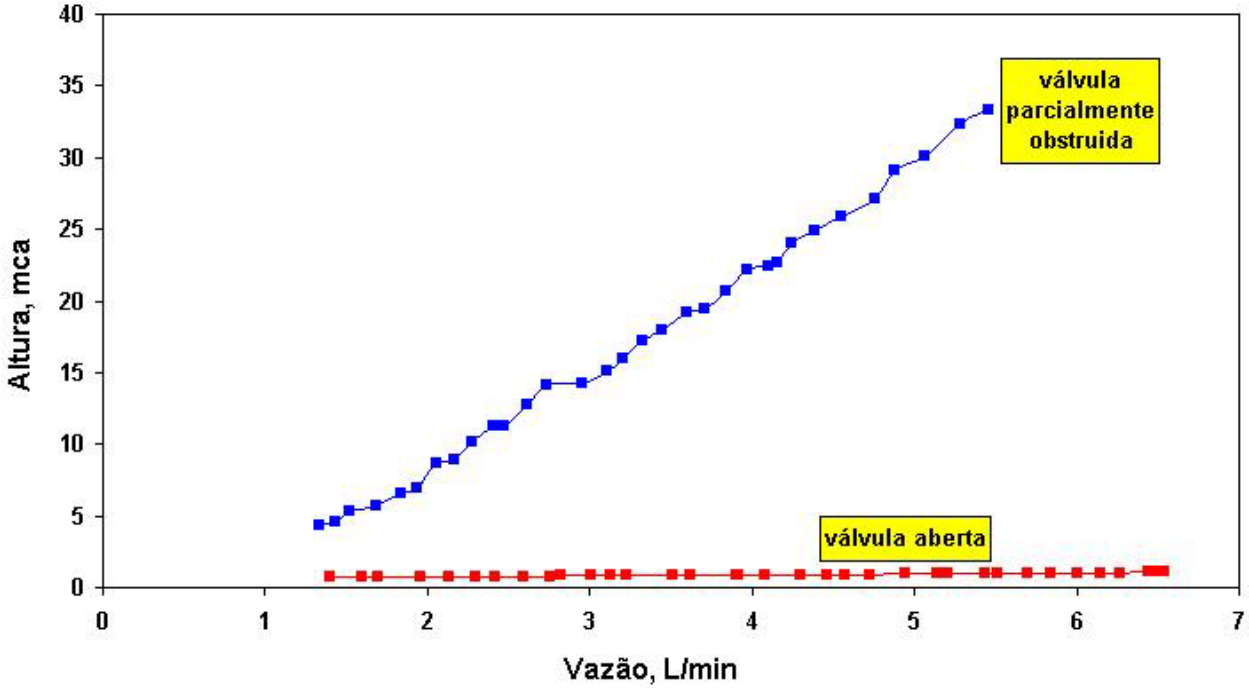


Figura 6.16 Curvas do sistema operado pela bomba de diafragma, para duas aberturas da válvula de controle de vazão.

Note-se que o fechamento da válvula, que corresponde a um aumento de altura, desloca a curva para a esquerda.

6.5 Relação entre bomba e sistema

A relação existente entre uma bomba e o sistema a qual ela pertence pode ser analisada por meio da sobreposição, em um mesmo gráfico, das curvas de desempenho da bomba com a curva do sistema. Na interseção de uma curva de vazão e altura da bomba, H & Q da bomba, com a curva do sistema, H & Q do sistema, encontra-se o ponto de trabalho para aquele regime de operação. A partir desse ponto, é possível determinar a vazão, a potência, a altura e também eficiência o conjunto motor e bomba está operando. De modo análogo, ao se fazer a sobreposição de diversas curvas de vazão e altura da bomba com a curva do sistema, pode-se prever qual o comportamento que terão as diversas variáveis em condições diferenciadas de trabalho.

A figura 6.17 mostra a sobreposição das curvas de vazão e altura da bomba centrífuga, com a curva do sistema. Note-se que as curvas da bomba são interceptadas pela curva do sistema nos ponto 1, 2, 3, 4 e 5. Esses são pontos de trabalho da bomba para os regimes considerados.

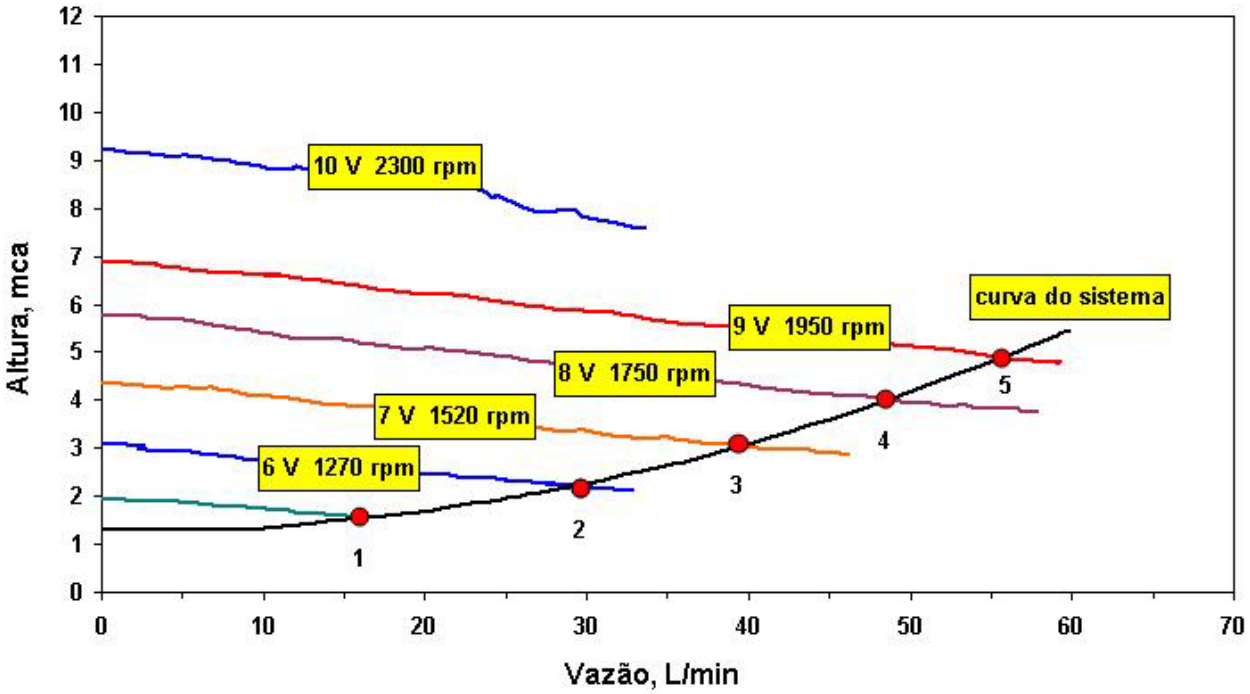


Figura 6.17 Sobreposição das curvas de altura da bomba centrífuga com a curva do sistema.

A Figura 6.18 mostra as curvas de altura, potência e eficiência do conjunto motor e bomba em função da vazão da bomba centrífuga, para a tensão de 9 V e velocidade de 1950 rpm. Sobreposta a elas está a curva do sistema, para plena abertura da válvula de controle de vazão.

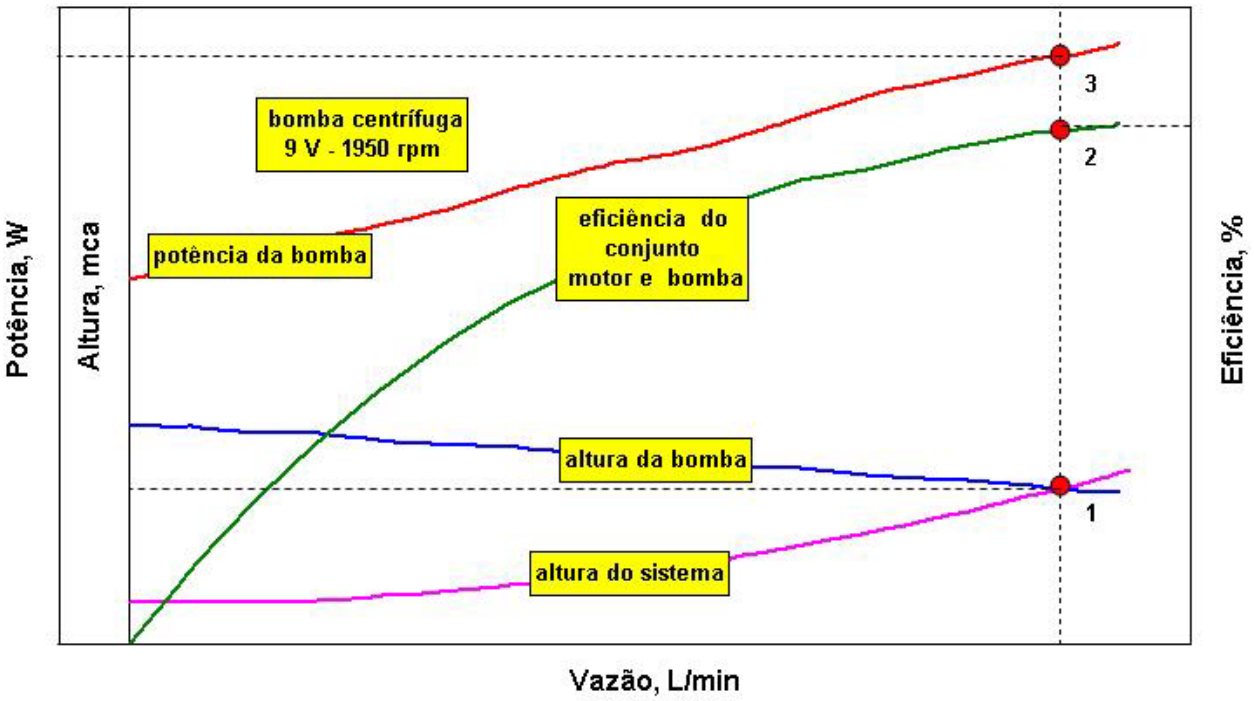


Figura 6.18 Sobreposição das curvas de desempenho da bomba centrífuga, para a tensão de 9 V e velocidade de 1950 rpm, com a curva do sistema.

O ponto 1 da Figura 6.18 representa o ponto de trabalho para o regime de operação da bomba. Nas ordenadas dos pontos 1, 2 e 3 faz-se a leitura da altura, da eficiência global nessa condição e da potência desenvolvida pela bomba.

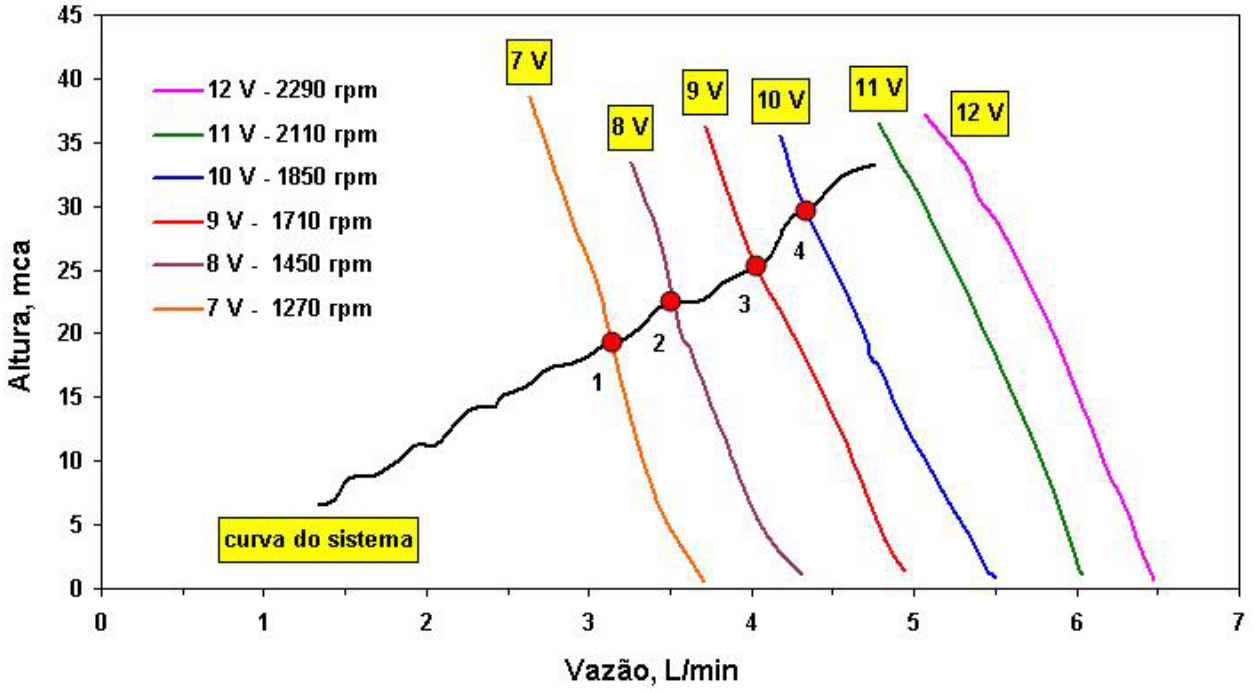


Figura 6.19 Sobreposição das curvas de altura e do sistema para a bomba de diafragma.

A figura 6.19 mostra a sobreposição das curvas de vazão e altura da bomba de diafragma, com a curva do sistema. Note-se que as curvas da bomba são interceptadas pela curva do sistema nos ponto 1, 2, 3 e 4. Esses são pontos de trabalho da bomba.

Na Figura 6.20 estão mostradas as curvas de altura, potência e eficiência do conjunto motor e bomba em função da vazão da bomba de diafragma, para a tensão de 9 V e velocidade de 1710 rpm. Sobreposta a elas está a curva do sistema, para plena abertura da válvula de controle de vazão.

Assim como para a bomba centrífuga, no encontro da curva de vazão e altura da bomba com a curva do sistema, localiza-se ponto de trabalho 1. Para esse regime, a leitura da ordenada desse ponto indica a altura desenvolvida pela bomba. Na mesma linha vertical e acima do ponto 1, localizam-se os pontos 2 e 3. A ordenada do ponto 2 indica o valor da eficiência do conjunto motor e bomba nessa condição. A ordenada do ponto 3 indica qual a potência solicitada pelo motor da bomba, no ponto de trabalho em que está operando.

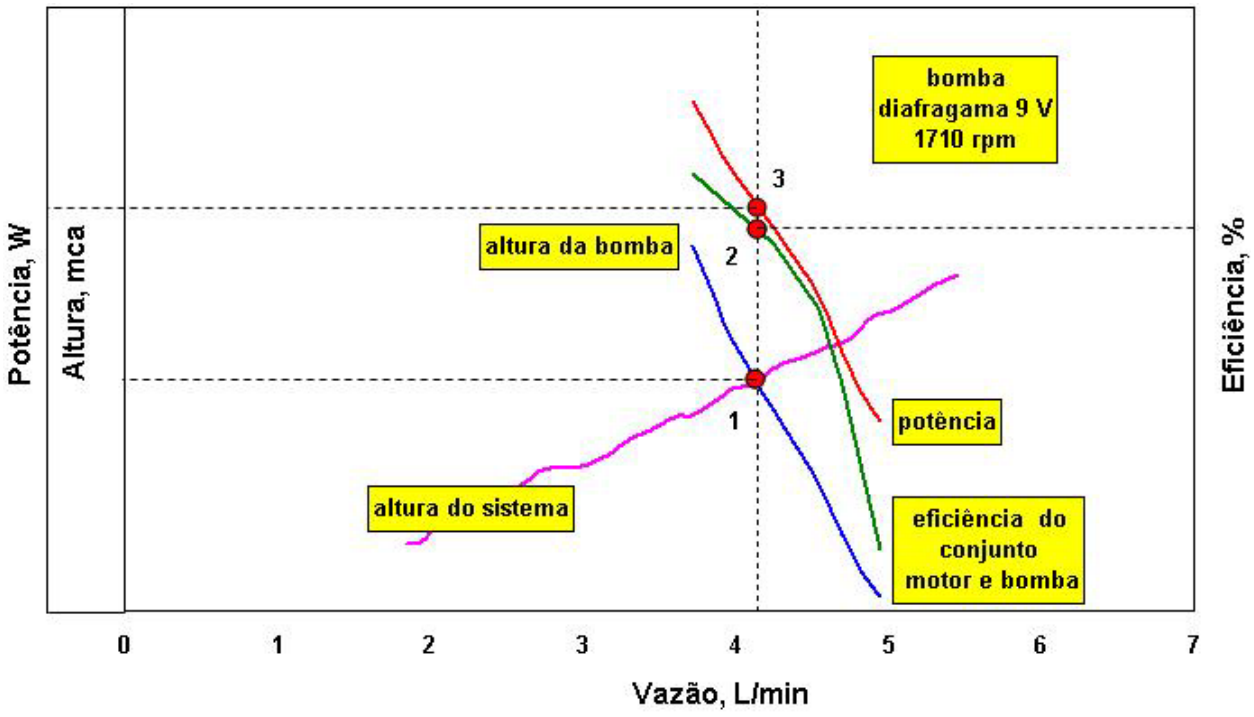


Figura 6.20 Sobreposição das curvas de desempenho da bomba de diafragma, para a tensão de 9 V e velocidade de 1710 rpm, com a curva do sistema.

6.6 Curvas de corrente & tensão

As curvas I & V são traçadas com a finalidade de conhecer o desempenho elétrico dos motores em função das alturas desenvolvidas pelas bombas.

No Capítulo 4, item 4.2.4, explica-se o método usado para obtenção das curvas I & V dos

motores das bombas e as Figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 mostram o comportamento elétrico desses motores.

6.7 Análise do desempenho dos módulos Siemens SP 75

A Figura 6.21 mostra as curvas características de corrente e potência em função da tensão, para um dos módulos Siemens SP 75 usado nesse trabalho.

As medidas que possibilitaram a construção das curvas obedeceram à metodologia apresentada por Prieb, 2002. Os experimentos e coletas de dados foram realizados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS. Todas as medidas foram feitas quando o módulo estava a uma temperatura de 47°C e recebendo uma irradiância de 954 W/m^2. É importante observar que a curva aqui apresentada somente caracteriza o módulo testado e para as condições de contorno especificadas.

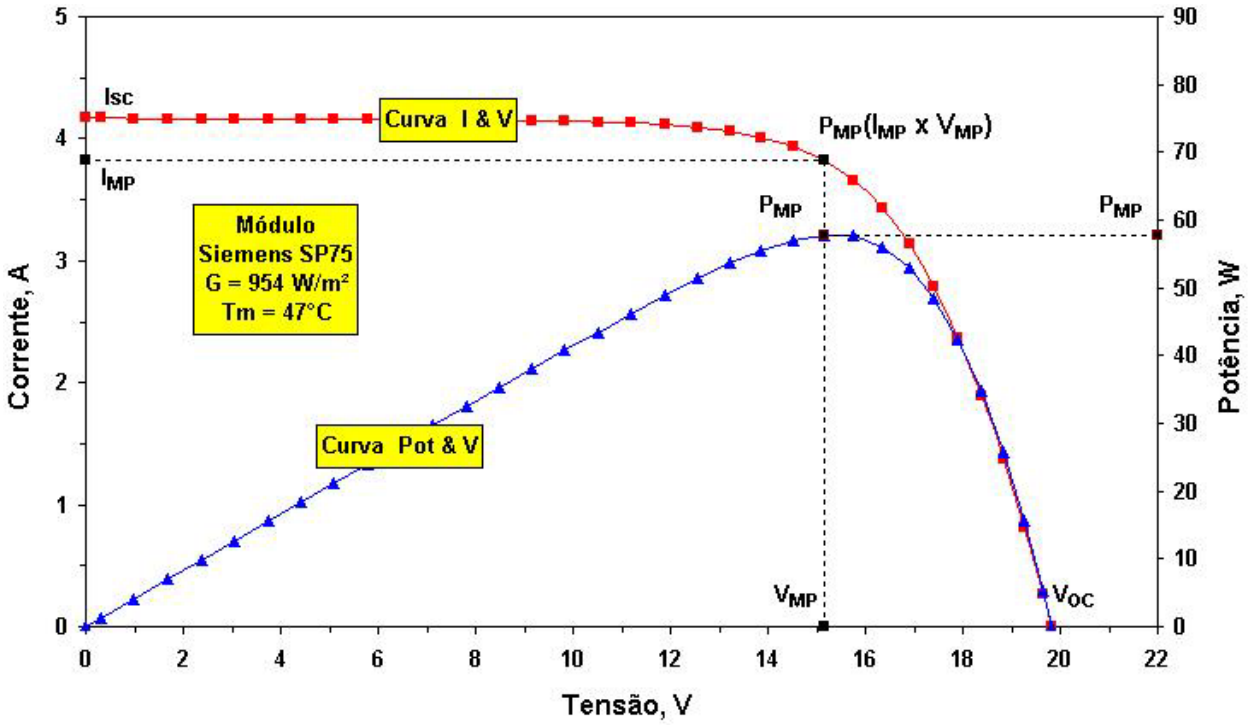


Figura 6.21 Curvas de corrente e de potência em função da tensão, obtidas no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, para um módulo Siemens SP75.

Na Figura 6.22 estão sobrepostas as curvas obtidas segundo o método apresentado por Prieb, 2002, e outra com o uso do programa computacional PVsize desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS [Vera, 2004]. Para a obtenção das curvas por meio do programa PVsize foram usados dados de catálogo para o mesmo módulo utilizado no trabalho.

O ANEXO 1 mostra a captura da tela do programa PVsize.

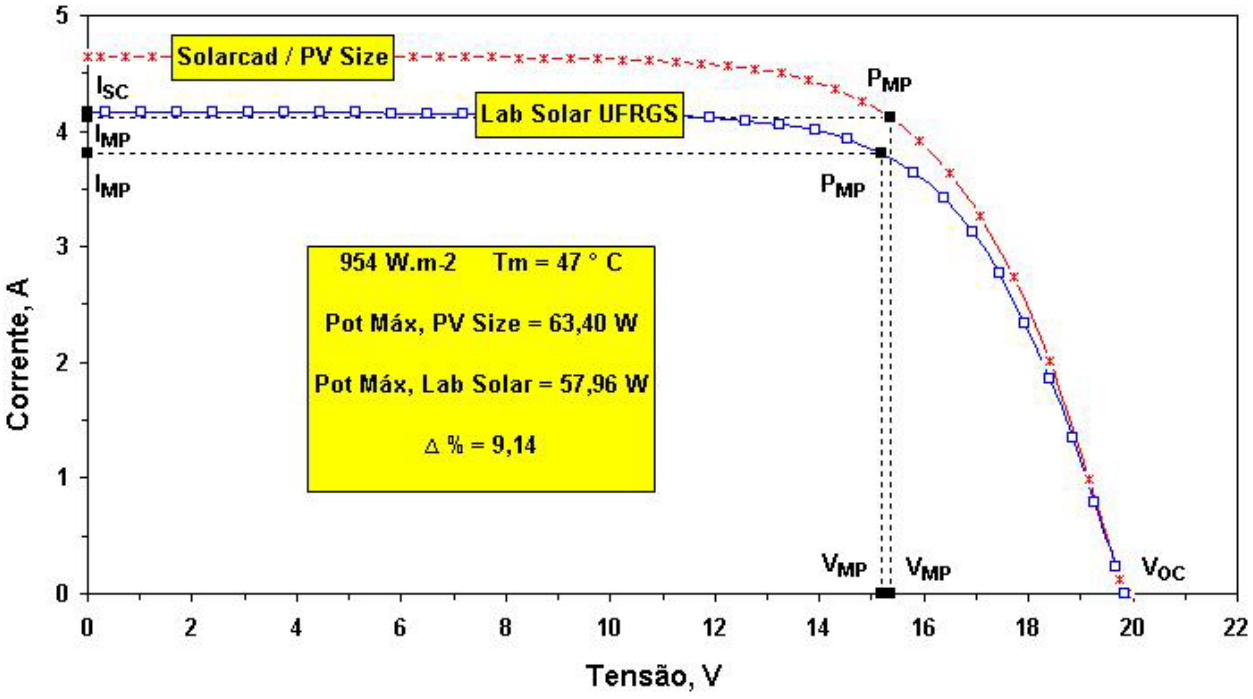


Figura 6.22 Curvas características de corrente e tensão obtidas por dois métodos distintos.

A correta determinação da curva de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico é de fundamental importância para a sua caracterização, pois é por meio da análise da curva que podem ser obtidos os cinco parâmetros elétricos, citados no Capítulo 3, que permitem determinar a qualidade do módulo e prever seu desempenho quando submetido a distintas condições de irradiância e temperatura das células.

Um módulo em operação experimentará uma variação contínua de radiação solar incidente e também de temperatura ao longo dos dias e das estações do ano e, possivelmente, nunca estará sujeito às condições consideradas como padrão. Portanto, para que se possa bem caracterizar os módulos a serem usados nos arranjos, há necessidade de que se tenha conhecimento do comportamento da intensidade de corrente e da tensão sob várias condições de irradiância e de temperatura.

A Figura 6.23 mostra as curvas representativas de corrente e tensão para um módulo fotovoltaico Siemens SP 75, quando submetido a diversas condições de irradiância e temperatura, ou seja, representa o efeito causado pela variação de radiação solar incidente e temperatura na curva característica do módulo. O manual distribuído por Siemens Solar Industries / Amazonas Energia Solar Ltda., por ocasião do 1º Curso de Treinamento em Energia Solar Fotovoltaica, 1990, apresenta curvas para as irradiâncias de 200, 400, 600, 800 e 1000 W/m^2, respectivamente, sempre na temperatura das células de 25°C. Nesse trabalho, as curvas foram feitas para as irradiâncias médias de 200, 400, 600, 800 e 994 W/m^2, sendo que para cada

nível de irradiância foi considerada a média das temperaturas das células. Todos os dados foram obtidos por meio de medidas experimentais e as curvas foram construídas com o suporte do programa computacional PVsize. No gráfico, os pontos de encontro da curva de máxima potência com as curvas I & V de cada irradiância representam as posições de máxima potência para cada uma das curvas.

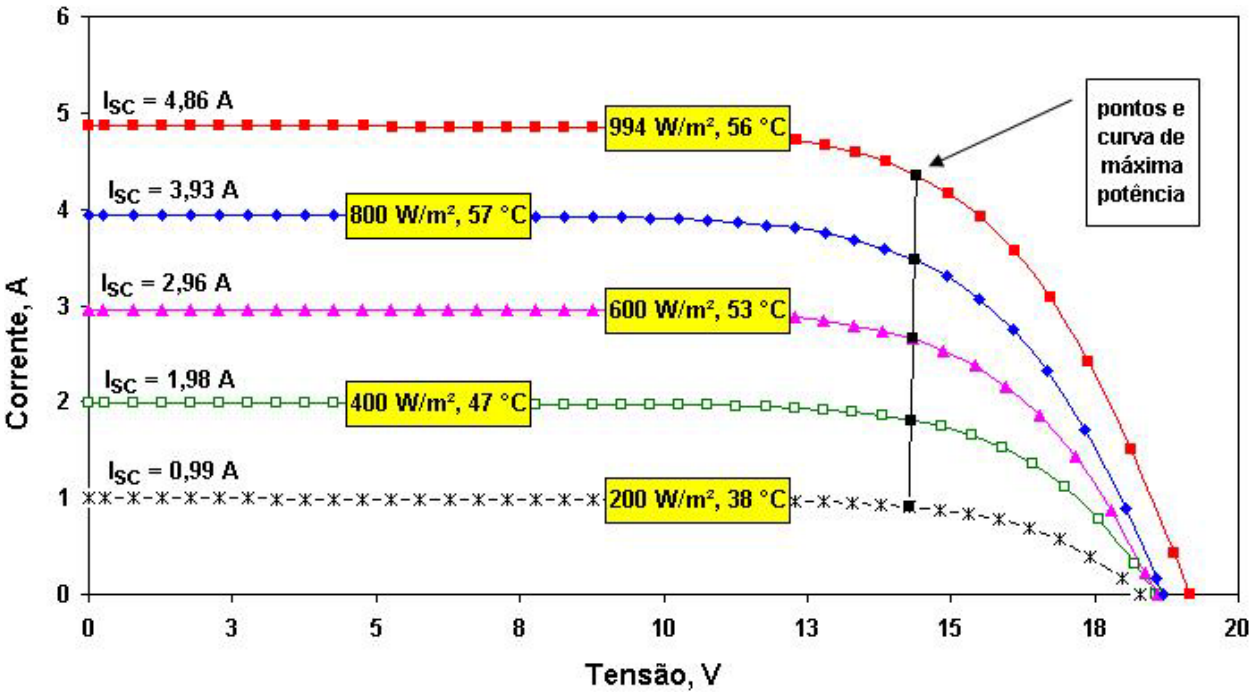


Figura 6.23 Curvas características de corrente e tensão para um módulo sob várias irradiâncias e temperaturas.

6.8 Análise do desempenho das bombas

A Figura 6.24 mostra as curvas de irradiância e vazão em função da hora local para a bomba de diafragma.

Nesse caso são analisadas situações de bombeamento, em dois dias, para as alturas de 16,30 e 20,60 mca, respectivamente. Note-se que o fechamento da válvula de controle de vazão, que se traduz no acréscimo de altura, não ocasiona um decréscimo significativo na vazão fornecida pela bomba. Para a altura de 16,30 mca a máxima vazão bombeada foi de 5,28 L/min enquanto que para a altura de 20,60 mca a máxima vazão bombeada foi de 4,15 L/min.

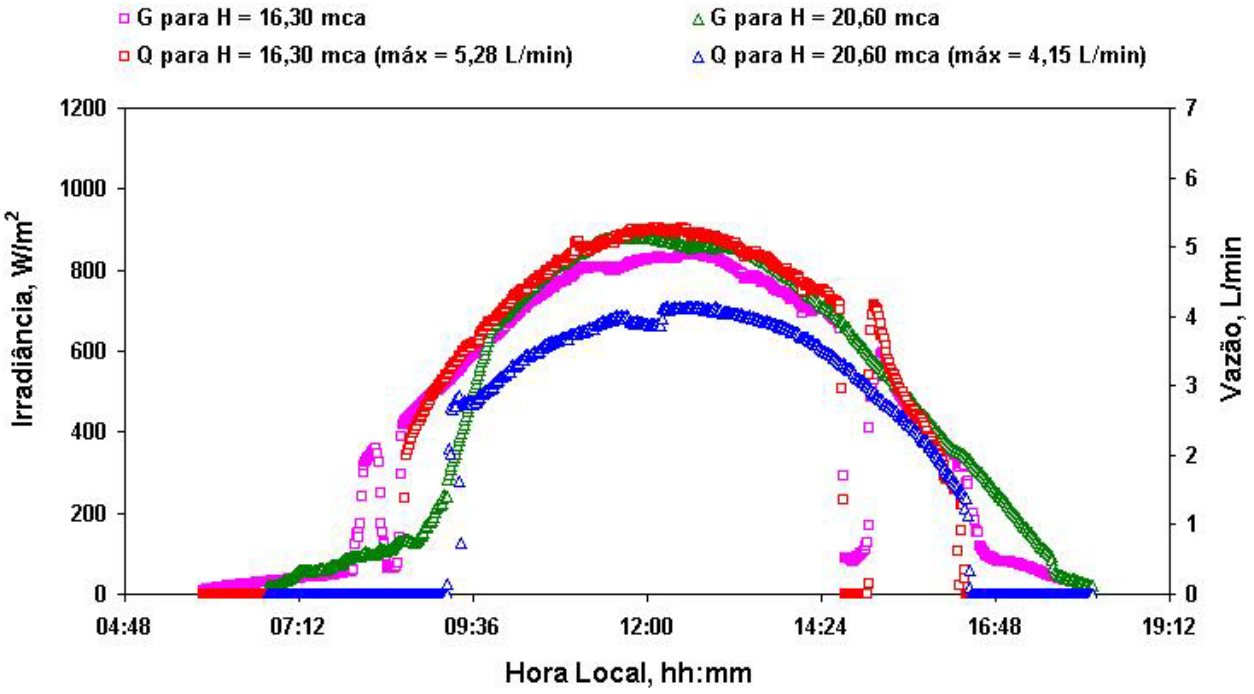


Figura 6.24 Curvas de irradiância G e vazão Q, em função da hora local, para a bomba de diafragma.

Na Tabela 6.1 são apresentados dados de limiares de irradiância das curvas da Figura 6.24.

Conforme visto no Capítulo 5, o limiar ou nível crítico de irradiância corresponde a um valor mínimo abaixo dos qual não ocorre o bombeamento. Nesse caso, o limiar de irradiância inicial corresponde ao nível mínimo de irradiância para iniciar o bombeamento assim como o limiar de irradiância final corresponde ao nível mínimo, quando termina o bombeamento.

Tabela 6.1 Dados de limiares de irradiância das curvas da Figura 6.24.

Limiar de Irradiância				
Altura, mca	Inicial		Final	
	Hora	W/m^2	Hora	W/m^2
16,30	08:40	430	16:16	341
20,60	09:16	627	16:26	331

A Figura 6.25 mostra as curvas de irradiância e vazão em função da hora local para a bomba centrífuga. Nesse caso são analisadas situações de bombeamento, em dois dias, para as alturas de 3,80 e 5,40 mca, respectivamente. Note-se que o fechamento da válvula de controle de

vazão, que se traduz no acréscimo de altura, ocasiona um decréscimo significativo na vazão fornecida pela bomba.

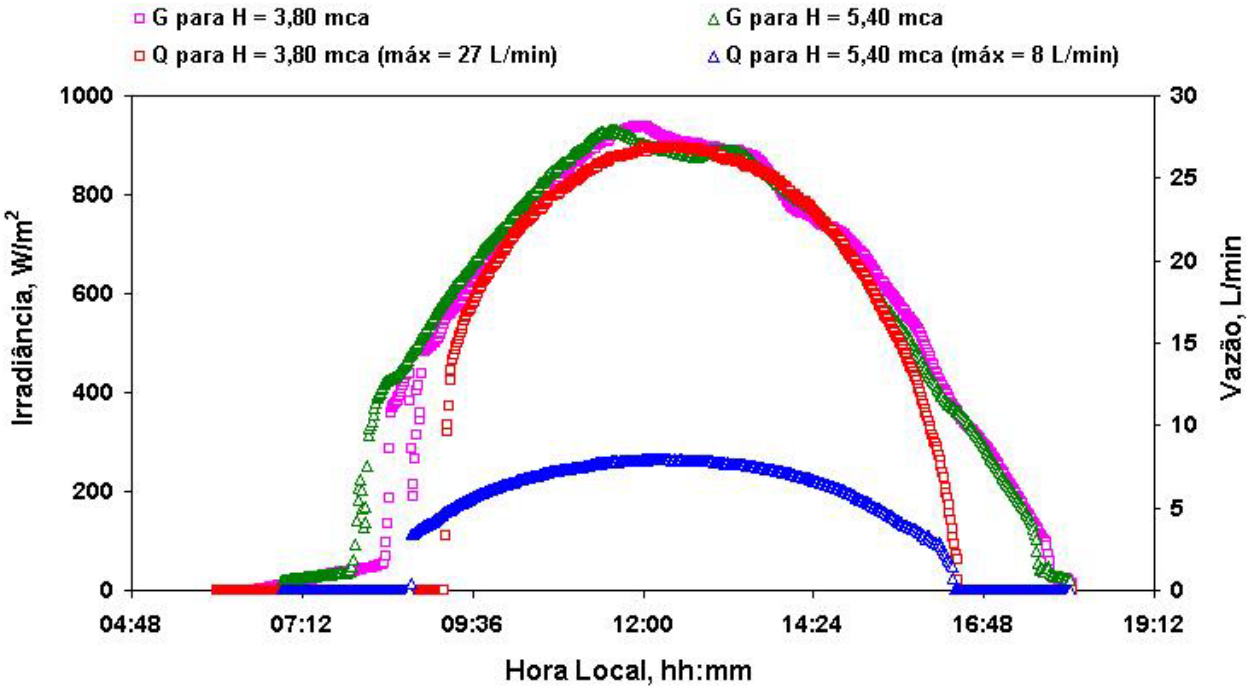


Figura 6.25 Curvas de irradiância G e vazão Q, em função da hora local, para a bomba de centrífuga.

Na Tabela 6.2 são apresentados dados de limiares de irradiância das curvas da Figura 6.25.

Tabela 6.2 Dados de limiares de irradiância das curvas da Figura 6.25.

Limiar de Irradiância				
Altura, mca	Inicial		Final	
	Hora	W/m^2	Hora	W/m^2
3,80	09:13	550	16:20	300
5,40	08:44	480	16:22	370

Em um sistema de bombeamento, a máxima eficiência do conjunto motor e bomba ocorre com a bomba operando com uma determinada velocidade, fornecendo uma determinada vazão e para uma específica altura. As condições de maximização da eficiência do conjunto motor e bomba ou minimização das perdas estão associadas às eficiências dos diversos componentes, ou seja, cada componente deverá estar operando próximo do ponto de sua máxima eficiência. Quando isso ocorrer o sistema estará bem balanceado.

A eficiência do conjunto motor e bomba é calculada como resultado da divisão da potência hidráulica pela potência elétrica [Karassik ,1986]. Esse cálculo é feito pela equação 3.7. Quando a eficiência é calculada para um determinado momento da operação, é chamada de eficiência instantânea.

A Figura 6.26 mostra as curvas de eficiências dos conjuntos motores e bombas em função da hora local, para as duas bombas e em diferentes alturas. Nota-se que para a bomba centrífuga as melhores eficiências ocorrem para a menor altura, enquanto que para a bomba de diafragma as melhores eficiências ocorrem para as maiores alturas. Para ambas as bombas, as máximas eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas ocorrem por volta do meio-dia, horário em que a incidência de radiação no plano dos módulos fotovoltaicos é maior. Ao comparar as diferenças entre as eficiências máximas alcançadas por cada uma das bombas, nas diferentes alturas, verifica-se que o diferencial é pequeno para a bomba de diafragma, da ordem de 3 %, enquanto que esse diferencial é maior para a bomba centrífuga, da ordem de 16 %.

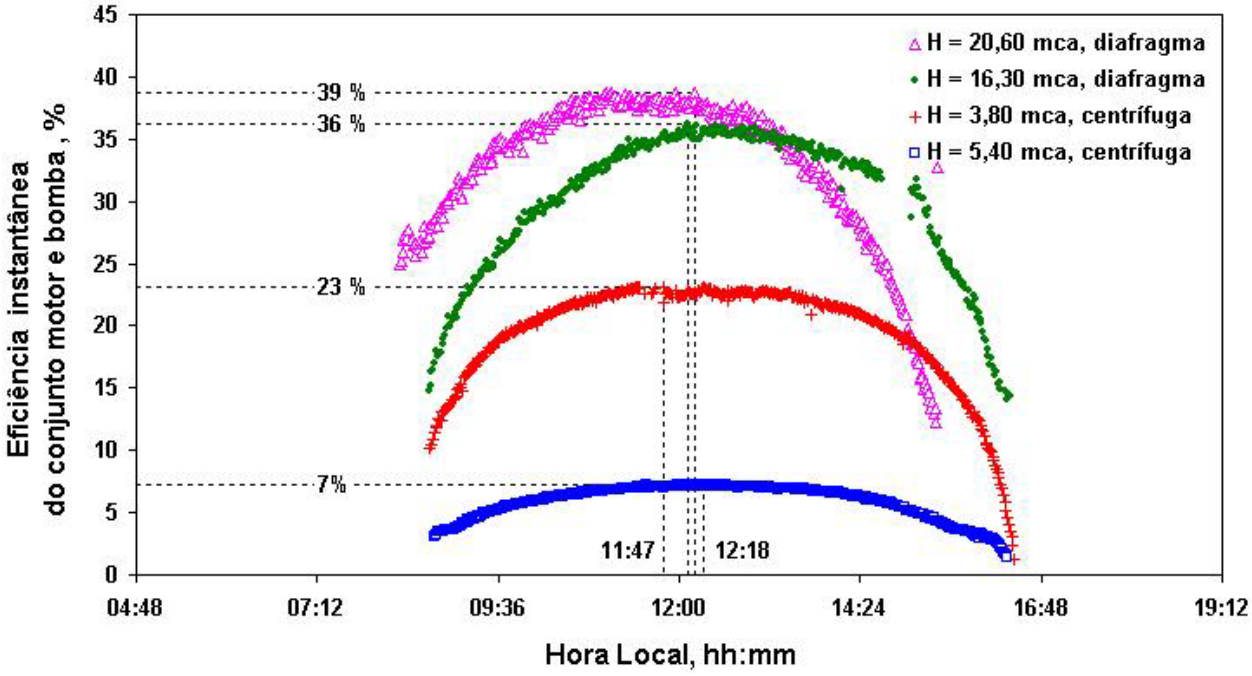


Figura 6.26 Curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas, em função da hora local, para duas bombas em diferentes alturas.

A Figura 6.27 mostra as curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas em função da irradiância, para as duas bombas e em diferentes alturas. Observa-se que para ambos os conjuntos, em qualquer altura, ao incremento de irradiância corresponde um aumento nas eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas. Para o conjunto motor e bomba de diafragma, a variação da eficiência instantânea na mesma irradiância incidente e para diferentes alturas é menor do que para o conjunto motor e bomba centrífuga.

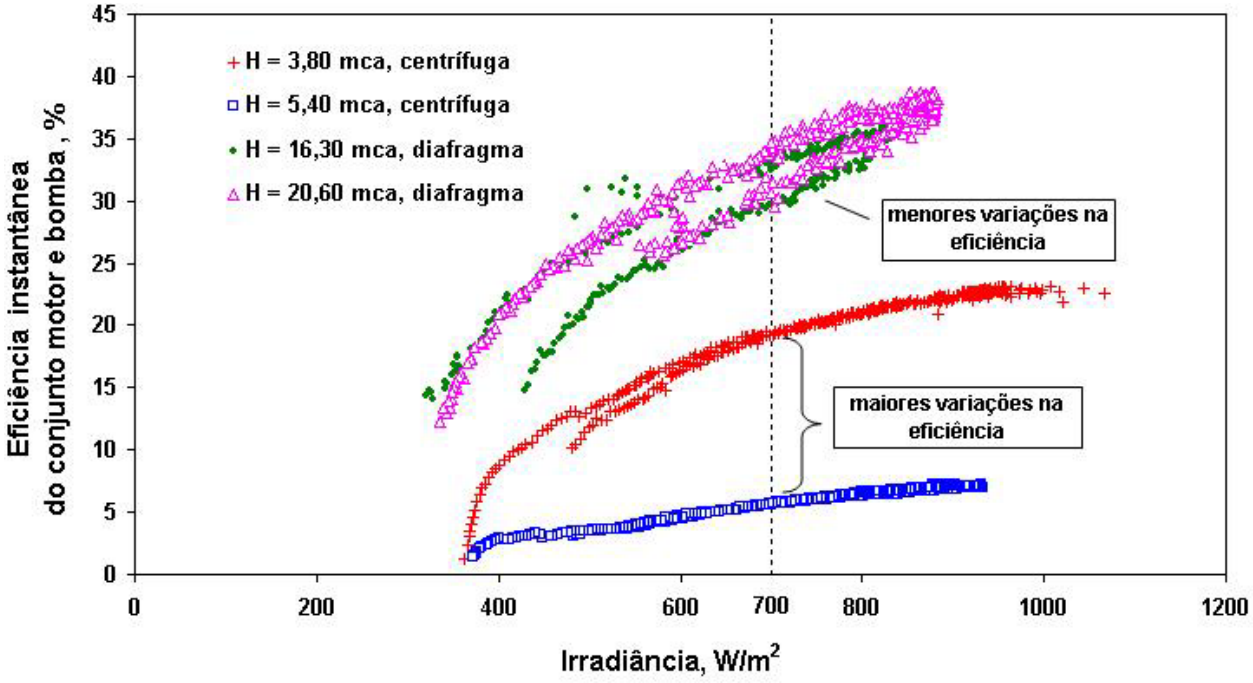


Figura 6.27 Curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas, em função da irradiância, para duas bombas em diferentes alturas.

Na Figura 6.28 os pontos das curvas foram substituídos por suas respectivas linhas de tendências. Para efeito meramente ilustrativo, as variações nas eficiências são destacadas pelas áreas coloridas.

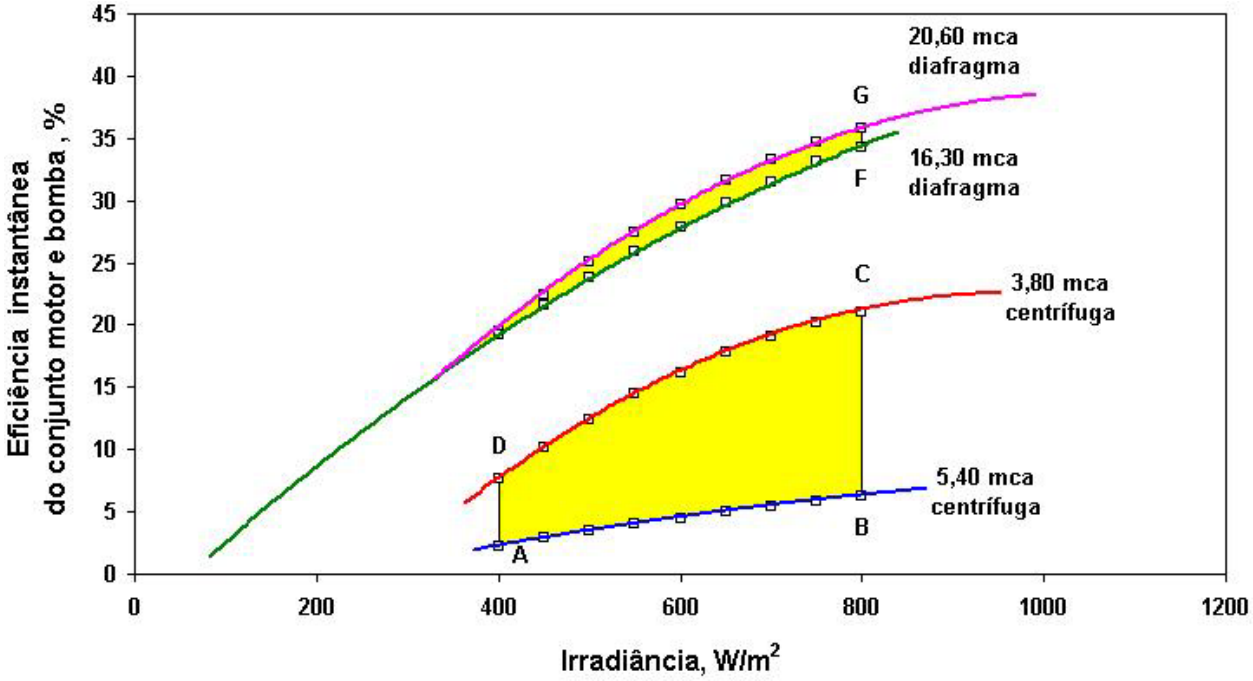


Figura 6.28 Áreas representativas das eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas em função da irradiância, para as duas bombas em diferentes alturas.

A Figura 6.29 mostra as curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas em função da altura, para as duas bombas em diferentes alturas ou aberturas da válvula de controle de vazão. Verifica-se que para a bomba de diafragma, a eficiência instantânea do conjunto motor e bomba pouco depende da altura desenvolvida. Para a bomba centrífuga, as eficiências instantâneas sofrem alterações sensíveis com a variação da altura. Ainda para a bomba centrífuga, as melhores eficiências são verificadas para menor altura. O intervalo de variação de altura é maior para a bomba de diafragma do que para a bomba centrífuga.

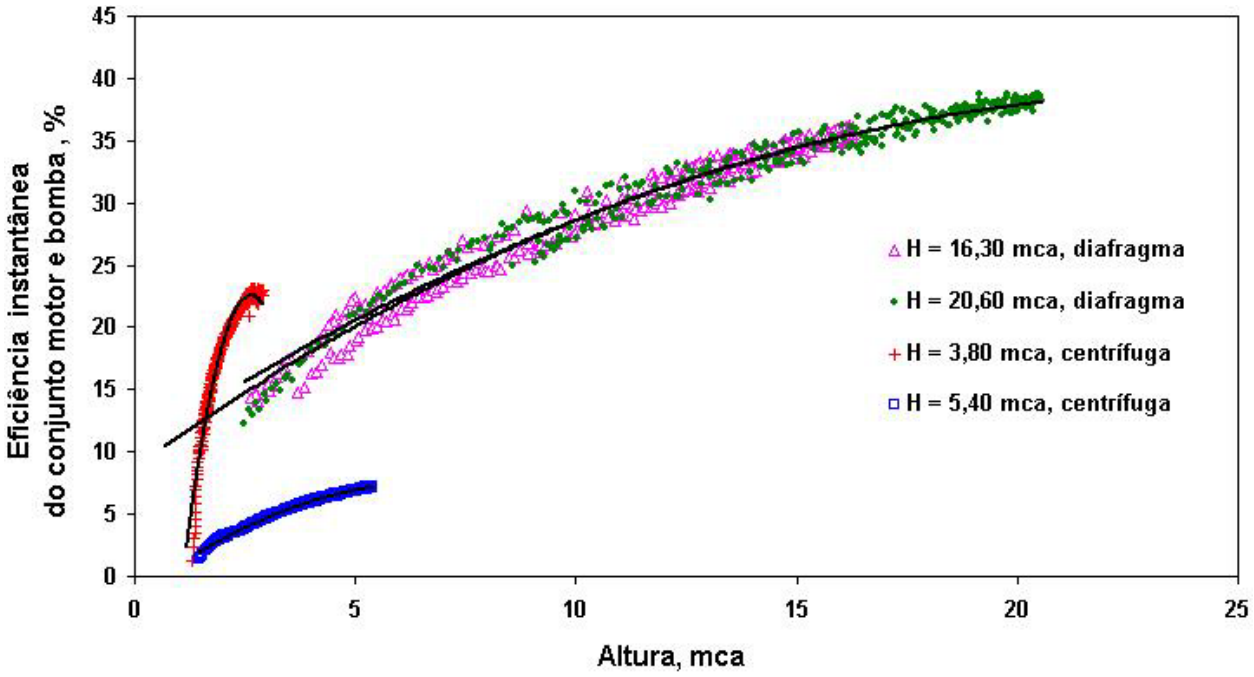


Figura 6.29 Curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas em função da altura, para as duas bombas em diferentes alturas.

A Figura 6.30 mostra as curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas em função da vazão desenvolvida, para as duas bombas, em diferentes alturas. Verifica-se que a bomba centrífuga apresenta sua melhor eficiência para a menor altura, enquanto que a bomba de diafragma apresenta sua melhor eficiência na maior altura.

Na bomba centrífuga, a vazão é altamente dependente da altura, ou seja, quanto maior a altura, menor a vazão. Na bomba de diafragma, a vazão é pouco dependente da altura desenvolvida, ou seja, as vazões pouco variam com a mudança da altura.

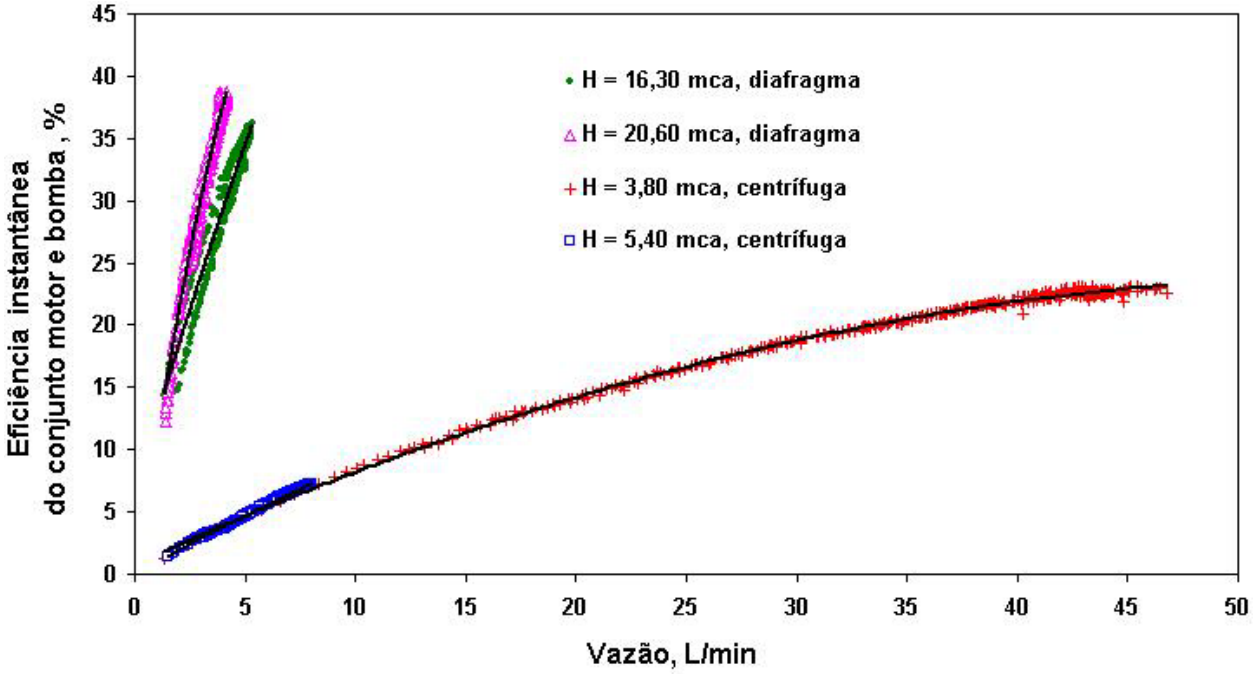


Figura 6.30 Curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas em função da vazão, para as duas bombas em diferentes alturas.

A Figura 6.31 mostra as curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos de motores e bombas em função da potência, em diferentes alturas. As eficiências instantâneas verificadas independem da potência solicitada, mas sim da altura.

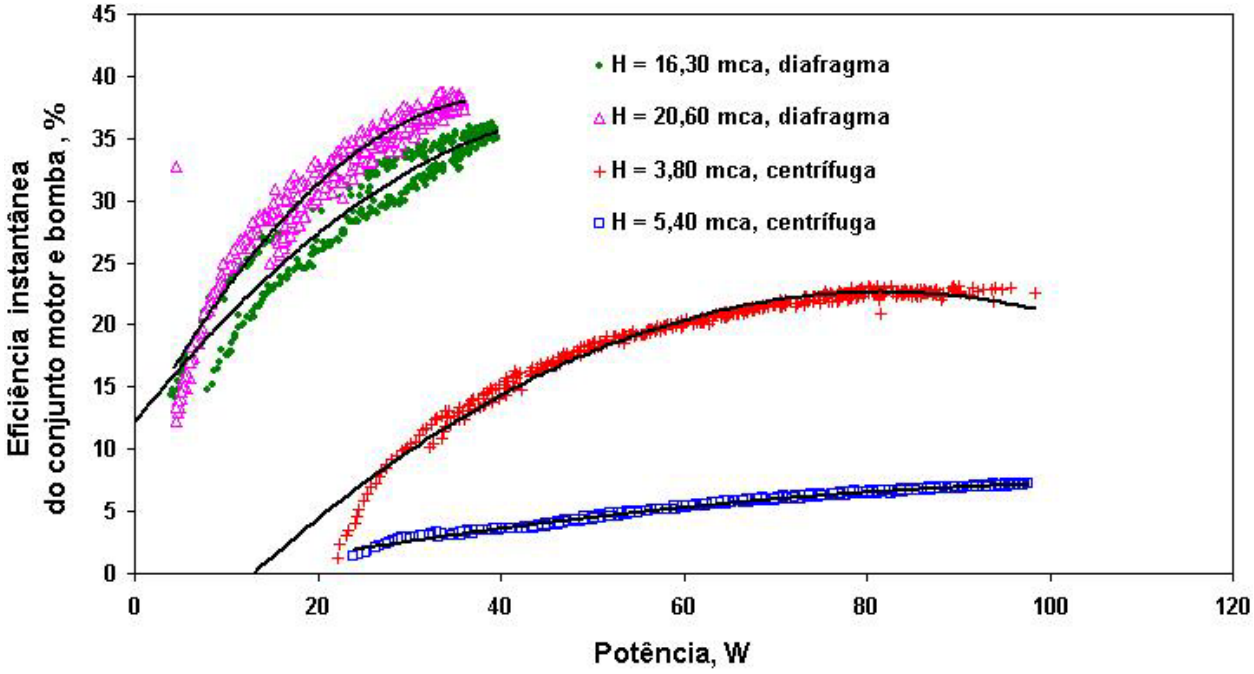


Figura 6.31 Curvas de eficiências instantâneas dos conjuntos motores e bombas em função da potência, para as duas bombas em diferentes alturas.

Conforme CIEMAT, 2000, a eficiência instantânea da conversão fotovoltaica é definida como o quociente entre a potência elétrica instantânea e a irradiância instantânea incidente no gerador fotovoltaico.

A potência elétrica instantânea, Pot_e é calculada pela equação 3.5.

A irradiância instantânea incidente no gerador fotovoltaico G_{gf} é obtida por:

$$G_{gf} = Ag \,.\, G \tag{6.1}$$

onde; Ag representa a área total do gerador, Hadi et al., 2003, e G é a irradiância solar.

O cálculo da eficiência instantânea da conversão fotovoltaica é obtido por:

$$\eta_{fv} = \frac{Pot_e}{G_{gf}} \tag{6.2}$$

A Figura 6.32 mostra as curvas de eficiência instantânea da conversão fotovoltaica em função da hora local, para as duas bombas e em diferentes alturas.

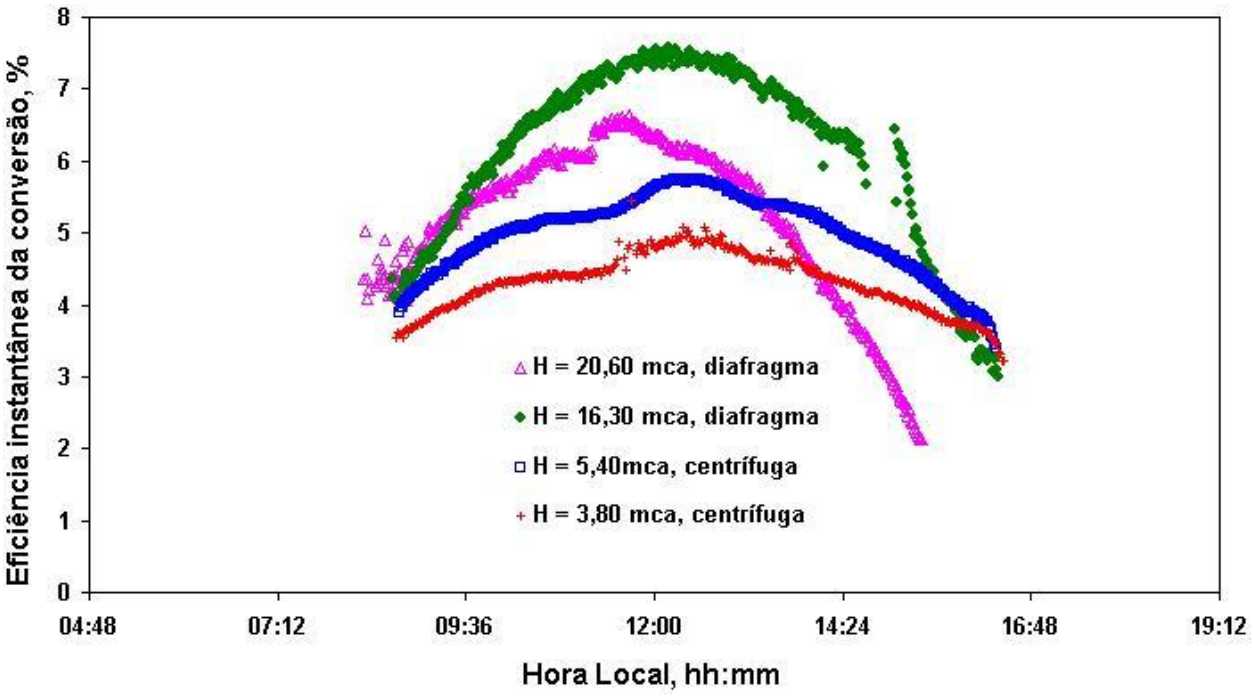


Figura 6.32 Curvas de eficiência instantânea da conversão fotovoltaica em função da hora local, para as duas bombas, em diferentes alturas.

A eficiência diária da conversão fotovoltaica é definida como o quociente entre a energia elétrica diária e a energia radiante diária recebida no gerador fotovoltaico.

A energia elétrica diária E_{ed}, J, é obtida por meio da integração da potência elétrica

instantânea Pot_e, ao longo do tempo t, ou seja:

$$E_{ed} = \int_{dia} Pot_e . dt \tag{6.3}$$

A energia radiante diária recebida pelo gerador fotovoltaico E_{dgf} é obtida por meio da integração da irradiância instantânea incidente no plano do arranjo fotovoltaico G, ao logo do tempo t, multiplicada pela área do gerador Ag, ou seja:

$$E_{dgf} = Ag \int_{dia} G . dt \tag{6.4}$$

O cálculo da eficiência diária da conversão fotovoltaica é feito do seguinte modo:

$$\eta_{fv\,diária} = \frac{E_{ed}}{E_{dgf}} \tag{6.5}$$

As equações 6.3, 6.4, 6.6 e 6.7 foram resolvidas com auxílio da aplicação da fórmula dos trapézios [Dacorso Netto, 1966].

Os valores de alturas, eficiência da conversão fotovoltaica, instantâneas máximas e diárias, assim como da energia solar diária recebida no plano dos arranjos fotovoltaicos, estão registrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 Eficiência da conversão fotovoltaica e energia solar diária.

Bomba	H, mca	η inst máx fv, %	η diária fv, %	Energia solar diária, kJ
Centrífuga	3,80	5,17	4,21	22800
	5,40	5,74	4,70	22200
Diafragma	16,30	7,66	5,82	19200
	20,60	6,60	4,88	20800

A Figura 6.33 mostra a eficiência da conversão fotovoltaica, instantâneas máximas e diárias, calculadas para duas alturas diferentes para cada bomba.

A Figura 6.34 mostra a energia solar diária recebida no plano dos módulos fotovoltaicos, para as condições da Tabela 6.3.

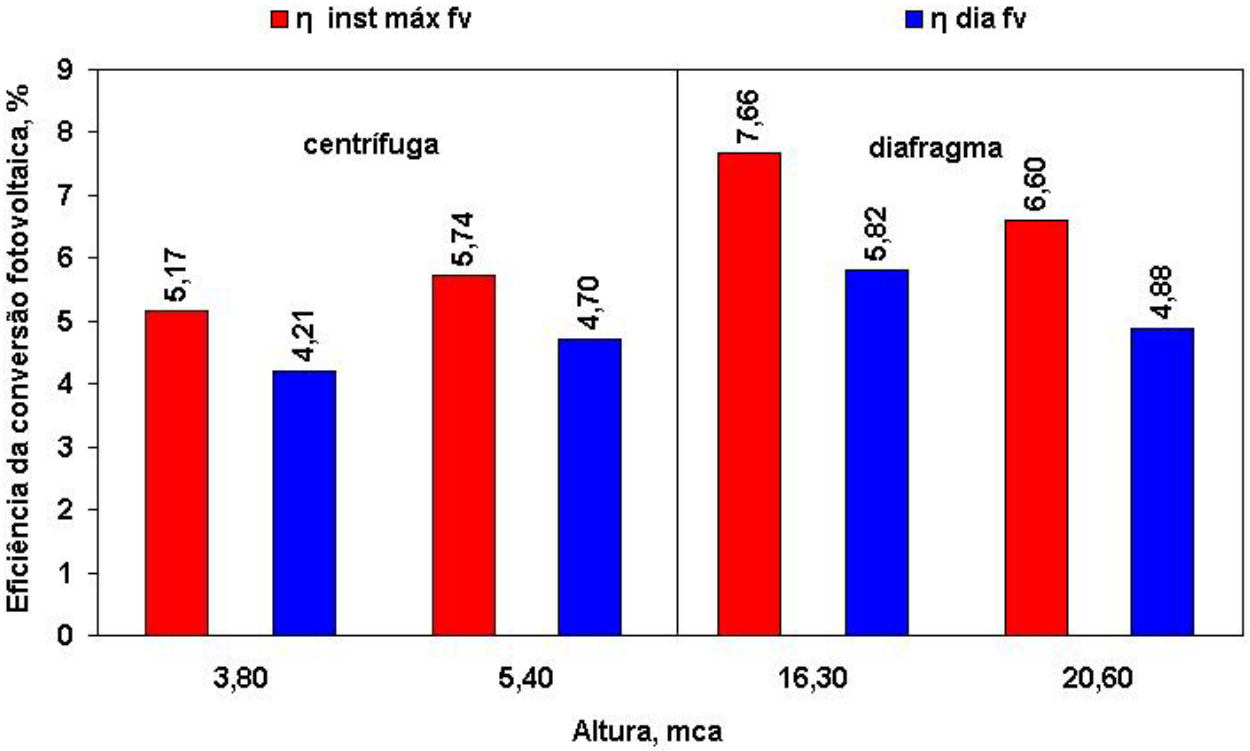


Figura 6.33 Eficiências máximas e diárias da conversão fotovoltaica verificadas em duas alturas diferentes para cada bomba.

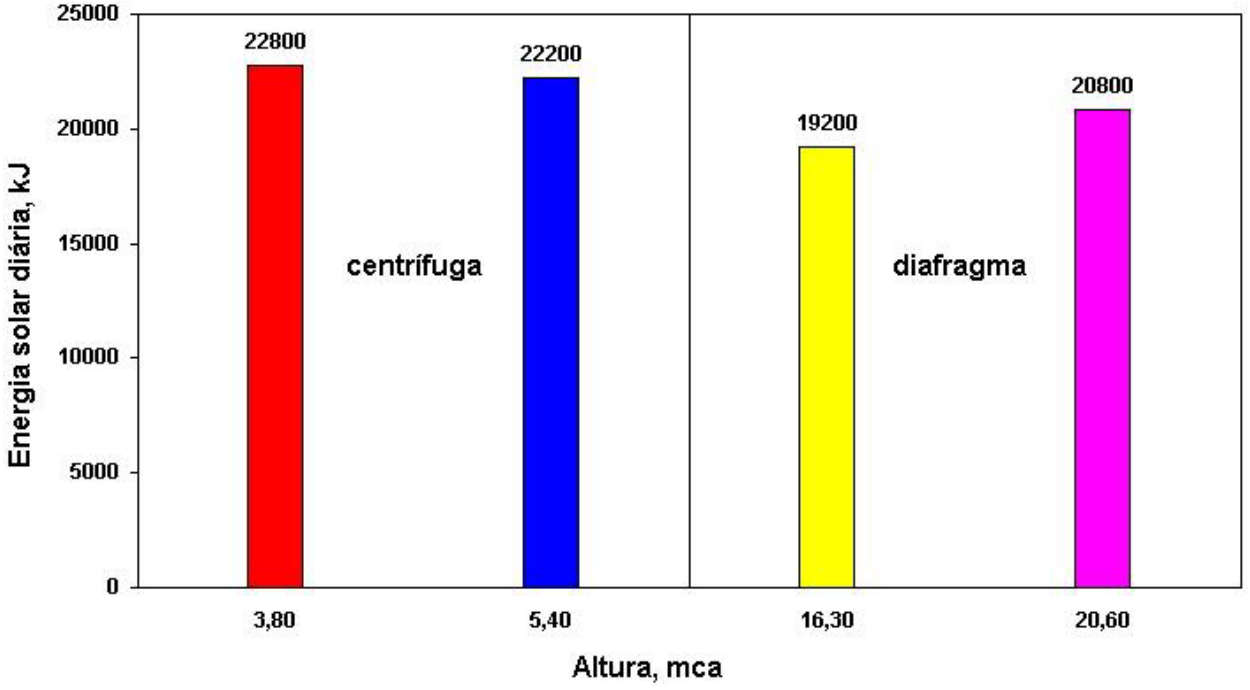


Figura 6.34 Energia solar diária recebida no plano dos módulos fotovoltaicos, para os dias considerados na Tabela 6.3.

Como foi visto no Capítulo 3, item 3.6, a eficiência diária do conjunto motor e bomba é definida como o quociente entre a energia hidráulica diária e a energia elétrica diária consumida.

A energia hidráulica diária E_{hd}, J, é obtida por meio da integração do produto da vazão instantânea Q, m^3/s, pela altura instantânea H, m, ao longo to tempo t, s, ou seja:

$$E_{hd} = \rho . g . \int_{dia} (Q.H).dt \tag{6.6}$$

onde ρ é a massa específica da água, 1000 kg/m^3 e g é a aceleração da gravidade.

A energia elétrica diária E_{ed}, J, é obtida por meio da integração da potência elétrica instantânea Pot_e, ao longo do tempo t, ou seja:

$$E_{ed} = \int_{dia} Pot_e .dt \tag{6.7}$$

O cálculo da eficiência diária do conjunto motor e bomba é feito do seguinte modo:

$$\eta_{ehd} = \frac{E_{hd}}{E_{ed}} \tag{6.8}$$

Os valores de alturas, eficiência global, instantâneas máximas e diárias, assim como do volume bombeado ao longo do dia, estão registrados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 Eficiência do conjunto motor e bomba e volume bombeado ao longo do dia.

Bomba	H, mca	η inst máx, %	η diária, %	Volume diário bombeado, m^3
Centrífuga	3,80	19,19	16,79	9,30
	5,40	7,22	6,08	2,90
Diafragma	16,30	35,95	32,07	1,82
	20,60	38,88	34,30	1,45

Conforme visto no Capítulo 3 para bombas centrífugas de superfície, com motores de imãs permanentes, com ou sem escovas, os valores para eficiências instantâneas estão na ordem de 30%, enquanto que os valores para eficiências diárias estão na ordem de 25%.

A Figura 6.35 mostra as eficiências instantâneas máximas e diárias dos conjuntos de motores e bombas, calculadas para duas alturas diferentes para cada bomba.

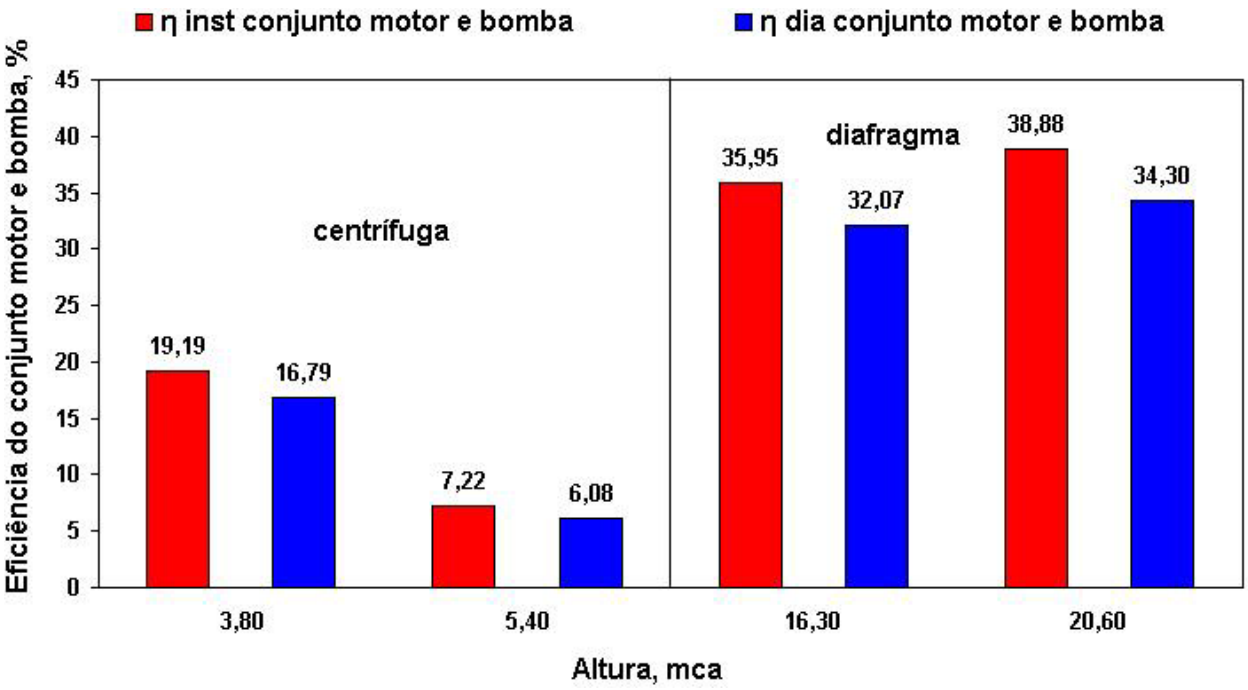


Figura 6.35 Eficiências instantâneas máximas e diárias dos conjuntos motores e bombas verificadas em duas alturas diferentes para cada bomba.

A Figura 6.36 mostra o volume diário bombeado para as condições da Tabela 6.4.

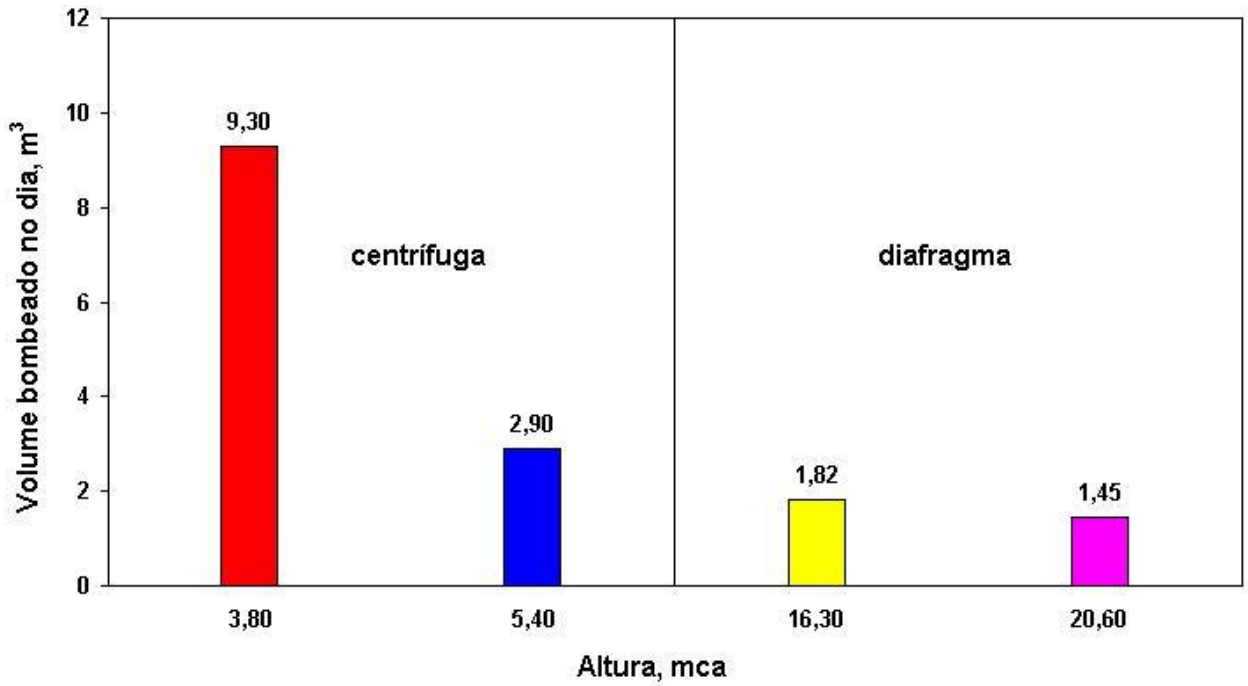


Figura 6.36 Volumes diários bombeados em duas alturas diferentes para cada bomba.

A Figura 6.37 mostra as curvas de vazão em função da irradiância incidente no plano dos módulos fotovoltaicos para as duas bombas e em alturas diferentes. O comportamento das duas bombas é diferente. Ao percorrer a linha vertical que passa pela irradiância de 800W/m^2 nota-se

que para a bomba centrífuga as variações nas alturas ocasionam alterações acentuadas na vazão desenvolvida, enquanto que para a bomba de diafragma os incrementos de altura não resultam em mudanças significativas na vazão.

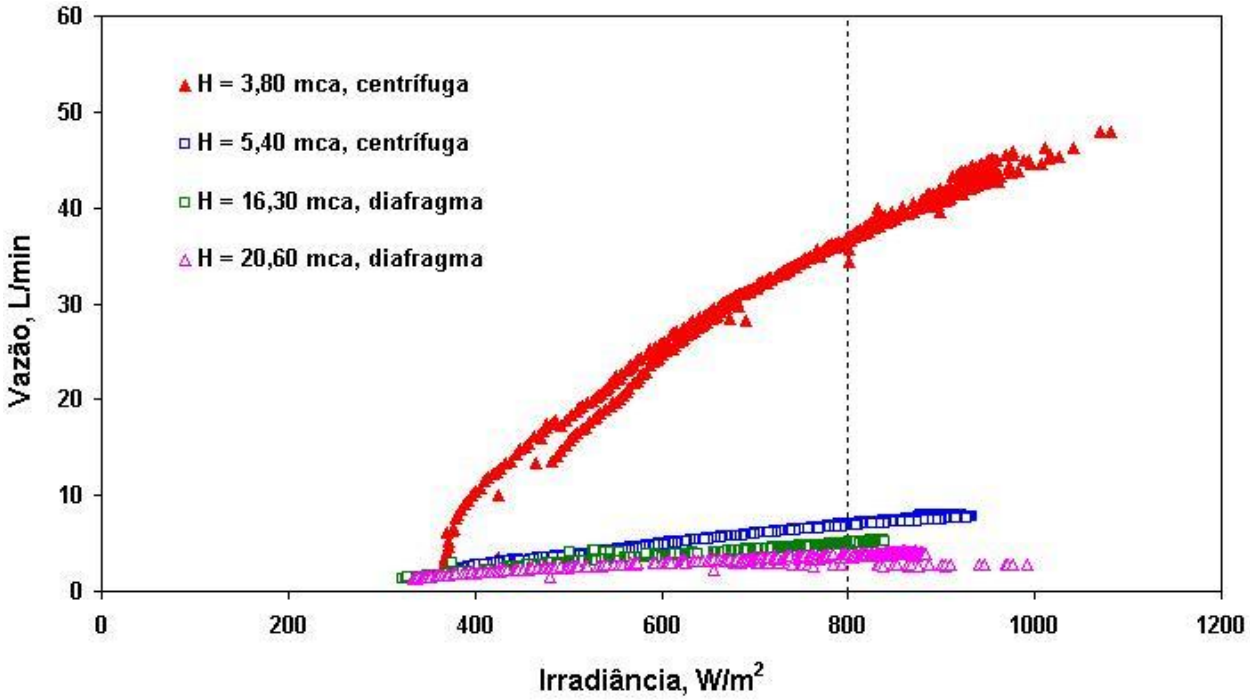


Figura 6.37 Curvas de vazão em função da irradiância e da altura para as duas bombas.

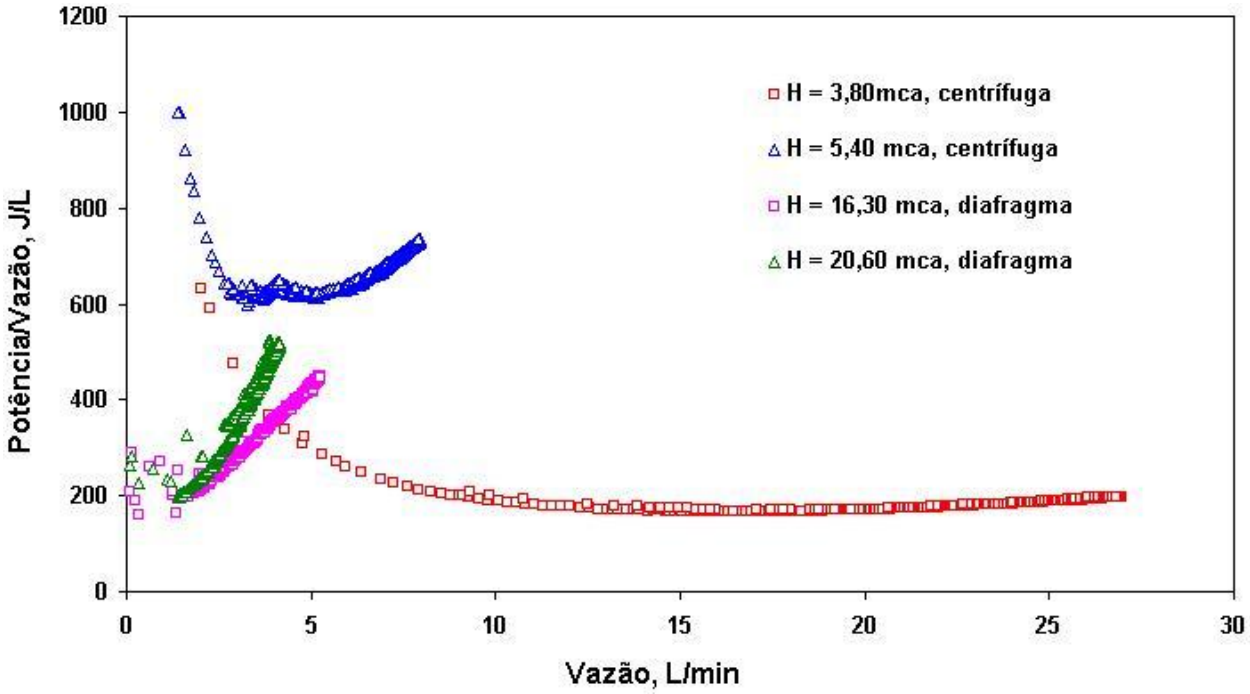


Figura 6.38 Curvas do quociente entre potência e vazão em função da vazão para as duas bombas em diferentes alturas.

A Figura 6.38 mostra a curva representativa do quociente entre a potência e a vazão em função da vazão, para as duas bombas em diferentes alturas. Nota-se que para a bomba centrífuga, na altura de 3,80 mca, a relação é inicialmente decrescente até a vazão de 15 L/min, dessa vazão em diante o quociente entre a potência e a vazão sofre um leve acréscimo, até as maiores vazões. Para a mesma bomba, na altura de 5,40 mca, a relação que inicialmente também é decrescente passa a crescer constantemente, de forma não linear, até as maiores vazões. Para a bomba de diafragma, tanto na altura de 16,30 quanto de 20,60 mca, o quociente entre a potência e a vazão desenvolvida cresce linear e acentuadamente desde o início do bombeamento.

7 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve por objetivo comparar, por meio de análises experimentais, o comportamento de dois sistemas de bombeamento de água cujos conjuntos motores e bombas foram diretamente acoplados aos geradores fotovoltaicos. Desse modo, a eletricidade requerida para acionar os conjuntos motores e bombas originava-se, na sua totalidade, da energia solar incidente no plano dos módulos fotovoltaicos. Para tanto, foi montada uma bancada de testes que permitiu avaliar e comparar o desempenho dos dois sistemas de bombeamento, um deles operando com uma bomba centrífuga e o outro com uma bomba volumétrica de diafragma.

A metodologia experimental utilizada, aliada às medidas realizadas, às observações feitas, às investigações conduzidas, às trocas de informações com os orientadores e com colegas, conduziram a conclusões consistentes e a interpretar de modo adequado as semelhanças assim como as diferenças entre os dois sistemas de bombeamento.

Os trabalhos experimentais foram realizados em duas etapas. Na primeira, os conjuntos motores e bombas foram acoplados em uma fonte de potência operando com corrente contínua e na outra os acoplamentos foram feitos diretamente aos geradores fotovoltaicos. Na primeira etapa, cada conjunto motor e bomba foi caracterizado por meio das curvas de corrente e tensão, altura e vazão, potência e vazão, eficiência do conjunto motor e bomba e vazão e também por meio das curvas de altura e vazão do sistema. Ao percorrer as curvas de corrente e tensão foi possível identificar pontos de picos de corrente ou de arranque dos motores e também pontos de início de vazão ou de início de escoamento da água no sistema. Das demais curvas, foi possível concluir que ambas as bombas tiveram seus comportamentos semelhantes aos descritos na bibliografia clássica referente ao assunto e também, no caso da bomba de diafragma, conforme o catálogo do fabricante. Destaca-se aqui que o comportamento das curvas de altura e vazão de ambas as bombas confirmam que a bomba centrífuga é adequada para operar com grandes vazões e pequenas alturas enquanto que a bomba volumétrica de diafragma é apropriada para operar com pequenas vazões e grandes alturas. Quando acoplados à fonte de potência e com a válvula de controle de vazão totalmente aberta, os conjuntos motores e bombas alcançaram as seguintes eficiências instantâneas máximas: 22 % para a bomba centrífuga e 42 % para a bomba de diafragma. Antes de acoplar os conjuntos motores e bombas aos arranjos fotovoltaicos fez-se o levantamento da curva de corrente e tensão de um dos módulos usado nesse trabalho. A curva assim medida foi comparada com outra, obtida por meio dos dados de catálogo, corrigidos para as condições de ensaio por meio de um programa desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS. A sobreposição das duas curvas permitiu concluir que elas não se ajustaram perfeitamente uma à outra. Esse não ajustamento mostrou discrepâncias nos cálculos da potência

de saída dos módulos, sendo que nos pontos de máxima potência o diferencial alcançou o valor de 9,14%. Entretanto, conforme catálogo do fabricante, esse diferencial está abaixo do tolerado, que é de 10%. Pode-se concluir, portanto, que os resultados estavam dentro da tolerância admitida. É importante salientar que para geradores de pequena potência de saída, essa tolerância de 10% é aceitável. Contudo, para projetos que envolvam geradores destinados a fornecer elevadas potências de saída esse índice deve ser muito bem equacionado, pois poderá comprometer o desempenho dos sistemas a eles acoplados.

Na segunda etapa, os conjuntos motores e bombas foram acoplados aos arranjos fotovoltaicos. Concluiu-se que o melhor arranjo para acoplar a bomba centrífuga era o formado por três módulos fotovoltaicos ligados em paralelo, onde o desacoplamento de 35,34% oferecia a segurança de não ocasionar sobretensões e/ou sobrecorrentes no motor quando a irradiância fosse alta. Para a bomba de diafragma, a melhor opção de acoplamento recaiu sobre um só módulo fotovoltaico, pois qualquer outra opção de acoplamento, ou seja, com maior número de módulos, poderia ocasionar sobretensões e/ou sobrecorrentes quando a irradiância fosse muito alta.

Da análise do funcionamento dos conjuntos motores e bombas quando acoplados aos arranjos fotovoltaicos foram extraídas várias conclusões. Dentre essas, julga-se de fundamental importância relatar sobre as eficiências da conversão fotovoltaica e eficiência dos conjuntos motores e bombas.

Da análise da eficiência da conversão fotovoltaica conclui-se o seguinte:

1 para o conjunto motor e bomba centrífuga;

- a instantânea máxima e a maior diária ocorreram para a maior altura;
- a instantânea máxima foi de 5,74%, na altura de 5,40 mca;
- a maior diária foi de 4,70%, na altura de 5,40 mca;

2 para o conjunto motor e bomba de diafragma;

- a instantânea máxima e a maior diária ocorreram para a menor altura;
- a instantânea máxima foi de 7,66 %, na altura de 16,30 mca;
- a maior diária foi de 5,82 %, na altura de 16,30 mca.

Da análise da eficiência dos conjuntos motores e bombas concluiu-se o seguinte:

1 para o conjunto motor e bomba centrífuga;

- a instantânea máxima e a maior diária ocorreram para a menor altura;
- a instantânea máxima foi de 19,19%, na altura de 3,80 mca;
- a maior diária foi de 16,79 %, na altura de 3,80 mca;

2 para o conjunto motor e bomba de diafragma;

- a instantânea máxima e a maior diária ocorreram para a maior altura;
- a instantânea máxima foi de 38,88 %, na altura de 20,60 mca;
- a maior diária foi de 34,30 %, na altura de 20,60 mca.

Concluiu-se que a diferença de altura influenciou consideravelmente na eficiência do conjunto motor e bomba centrífuga e não foi determinante na eficiência do conjunto motor e bomba de diafragma.

Além das conclusões referentes às eficiências, podem-se citar outras, tais como:

1 para um mesmo conjunto de motor e bomba, o limiar de irradiância para início de vazão foi sempre maior do que o limiar de irradiância para o final de vazão;
2 para o conjunto motor e bomba centrífuga os valores de limiares de irradiância para início de vazão, independentemente da altura, apresentaram valores muito próximos, para o conjunto motor e bomba de diafragma os limiares de irradiância para início de vazão se mostraram dependentes da altura, menor para a menor altura e maior para a maior altura;
3 para ambos os conjuntos motores e bombas, independentemente da altura, os limiares de irradiância para o final de vazão apresentaram valores muito próximos.

A tecnologia fotovoltaica para a aplicação em bombeamento de água é uma promissora aplicação da energia solar. Entretanto, ela exige continuados e desafiadores estudos teóricos e práticos. Espera-se que esses desafios sejam elementos motivadores para o prosseguimento desse trabalho.

Para futuros trabalhos sugere-se o seguinte: usar na bomba centrífuga outros tipos de impelidores, acoplar a bomba centrífuga com outros modelos de motores – tanto em corrente contínua como em corrente alternada, realizar os experimentos com diferentes alturas estáticas, usar seguidor de máxima potência com a finalidade de maximizar a transferência de potência dos geradores aos motores das bombas, usar rastreador ou seguidor solar de modo a promover ganhos em volume de água bombeada, usar acumuladores (baterias eletroquímicas) que permitam utilizar a energia elétrica armazenada em situações de insuficiência ou ausência de radiação solar, usar a energia solar coletada em excesso para gerar energia elétrica com outras finalidades, estudar a aplicação do bombeamento em sistemas não autônomos e desenvolver um programa computacional que permita simular as situações de bombeamento aqui apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, M., Chenlo, F., **"Testing Resuts of PV Pumping Systems for Stand Alone Installations",** Laboratorio del Instituto de Energia Renovables, Editorial CIEMAT, Madrid, España.

Alonso, M., Chenlo, F., 1992. **"Diseño y Dimensionado de Sistemas de Bombeo Fotovoltaico"**, Laboratorio del Instituto de Energia Renovables, Editorial CIEMAT, Madrid, España.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989. **"NBR 6400/MB–1032 Bombas Hidráulicas de Fluxo (Classe C) – Ensaios de Desempenho e Cavitação"**, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

Cisneros, L. M. J., 1977. **"Manual de Bombas",** Editorial Blume, Barcelona, Espanha.

Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. **"Solar Engineering of Thermal Process"**, John Wiley & Sons, New York, USA.

Fraenkel, P., 1980. **"Water Pumping Devices"**, Intermediate Technology Publications, Southampton Row - London, UK.

Fraidenraich, N., Lyra, F., 1995. **"Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotermoelérica e fotovoltaica"**, Editora Universitária da UFPE, Recife - PE, Brasil.

Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica – GETEF, 1995. **"Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos",** CRESESB/CEPEL, Brasil.

Hadi, H., Tokuda, S., Rahadjo, S., 2003. **"Evaluation of Performance of Photovoltaic System with Maximum Power Point (MPP)"**, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 75, Nos. 3-4, pp. 673-678.

http://www.solar.ufrgs.br/#pvsize, acessado em 24 de maio de 2006.

Iqbal, M., 1983. **"An introduction to Solar Radiation",** Academic Press, Toronto, Canada.

Jaehnig, D., Klein, S.A., Beckman, W. A., 1998. **"Experimental Validation Of Photovoltaic Water Pumping Models"**, The 1998 International Solar Energy Conference a part of Solar 98: Renewable Energy for the Americas – June 14-17, Albuquerque - New Mexico, USA.

Karassik, I. J., Krutzsch, W. C., Fraser, W. H., Mesina, J.P., 1985, **"Pump Handbook"**, McHill, Inc., USA

Karassik, I. J., McGuire T., 1998. **"Centrifugal Pumps"**, Chapman & Hall, New York, USA.

Krenzinger, A., 1998**. "Células Fotovoltaicas"**, apostila elaborada para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC – UFRGS, Laboratório de Energia Solar, Porto Alegre – RS, Brasil.

Krenzinger, A., 2006. Experiência pessoal do Prof. Krenzinger.

Lorenzo, E., Araújo, G., Ejido, M., Cuevas, A., Miñano, J., 1991. **"Electricidad Solar Fotovoltaica"**, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, España.

Macaggnan, M.H., 2006. Experiência pessoal do Prof. Macagnan.

Macagnan, M. H., 1995. **"Introdução à Radiação Solar",** apostila elaborada para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PROMEC – UFRGS, Laboratório de Energia Solar, Porto Alegre – RS, Brasil.

Macintyre, A. J., 1986. **"Instalações Hidráulicas"**, Editora Guanabara, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

Mackay, R.C., 2000. **"Centrifugal and Positive Displacement Pumps in the Operating System – The Pump Handbook Series"**, Pumps & Systems.

Mattos, E. E. de, Falco, R. de, 1998. **"Bombas Industriais"**, Editora Interferência Ltda., Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

Netto, César D., 1966. **"Elementos de Cálculo Infinitesimal"**, Companhia Editora Nacional, São Paulo - SP, Brasil.

Prieb, C. W. M., 2002. **"Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos",** Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil.

Protogeropoulus, C., Pearce, S., 2000. **"Laboratory Evaluation and System Sizing Charts for a 'Second Generation' Direct PV-Powered, Low Cost Submersible Solar Pump"**, Solar Energy, Volume 68, No. 5, pp. 453-474.

Sandia National Laboratories, 2001. **"Guia para el desarrollo de proyectos de Bombeo de Agua com Energia Fotovoltaica"**, Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University, New México, USA.

Serie Ponências, 2000. **"Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energia Solar Fotovoltaica",** Editorial CIEMAT, Madrid, España.

Siemens Solar Industries/Amazonas Energia Solar, 1990. **"1° Curso de Treinamento em Energia Solar Fotovoltaica",** Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

Silva, E. L. da, Menezes, E. M., 2001. **"Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação"**, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Laboratório de Ensino a Distância, Florianópolis - SC, Brasil.

Szokolay, S., 1997. **"O Imperativo Ambiental"**, Trabalho apresentado para o PLEA

(Passive and Low Energy Architecture), Kushiro, Japão.

Vera, L.H., 2004. **"Programa Computacional Para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos",** Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre –RS, Brasil.

Vilela, O. C., 2001. **"Caracterização, Simulação e Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos de Abasteciemnto de Água",** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN – DEN / UFPE, Recife - PE, Brasil.

Wildi, T., 2000. **"Electrical Machines, Drives, and Power Systems",** Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES

Abidin, Firatoglu Z., Yesilata, B., 2004. **"New Approaches on the Optimization of Directly Coupled PV Pumping Systems"**, Solar Energy, Volume 77, No. 1, pp. 81-93.

Akbaba, M., Qamber, I., Kamal, A., 1998. **"Matching of Separately Excited DC Motors to Photovoltaic Generators for Maximum Power Output"**, Solar Energy, Volume 63, pp. 375-385.

Betka, A., Moussi, A., 2004. **"Performance Optimization of a Photovoltaic Induction Motor Pump System",** Renewable Energy, Volume 29, No. 14, pp. 2167-2181.

Borchardt, I. G., Zaro, M. A., 1982. **"Instrumentação – Guia de Aulas Práticas",** Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, Brasil.

Cuadros, F., López-Rodrígues, F., Marcos, A., Coello, J., 2004. **"A Procedure to Size Solar-Powered Irrigation (Photoirrigation) Schemes",** Solar Energy, Volume 76, pp. 465-473.

Dodge, Mark, Stinson Craig, 1999. **"Running Microsoft Excel 2000",** Microsoft Press, Redmond - Washington, USA.

Fedrizzi, M. C., 1997. **"Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamentos Fotovoltaicos"**, Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil.

Ghoneim, A.A., 2005. **"Design Optimization of Photovoltaic Powered Water Pumping Systems",** Energy Conversion and Management, In Press, Corrected Proof, Available online.

Hamid, M., Metwally, B., Anis, W. R., 1996. **"Dynamic Performance of Directly Copupled Photovoltaic Water Pumping System Using D.C. Sunt Motor"**, Energy Conversion. Management, Volume 37, No. 9, pp. 1407-1416.

Jafar, M., 2000. **"A Model for Small-Scale Photovoltaic Solar Water Pumping"**, Renewable Energy, Volume 19, Nos. 1-2, pp. 85-90.

Kolling, Evandro M., Souza, N. M. De, Ricieri, Reinaldo P., Sampaio, Sílvio C., Dallacort, Rivanildo, 2004, **"Análise Operacional de um Sistema de Bombeamanto de Água"**, Eng. Agric. Jaboticabal, Vol.24. No. 3, pp. 527-535.

Naajier, G. J., **" Instalaciones Solares Fotovoltaicas Para Bombeo De Água"**. In: Poblet, J. M., (Coord.), 1983. Marcombo, S.A., Barcelona, España.

Odeh, I., Yohanis,Y.G., Norton, B., 2005. **"Economic Viability of Photovoltaic Water Pumping Systems",** Solar Energy, Article in Press, Corrected Proof, Available online.

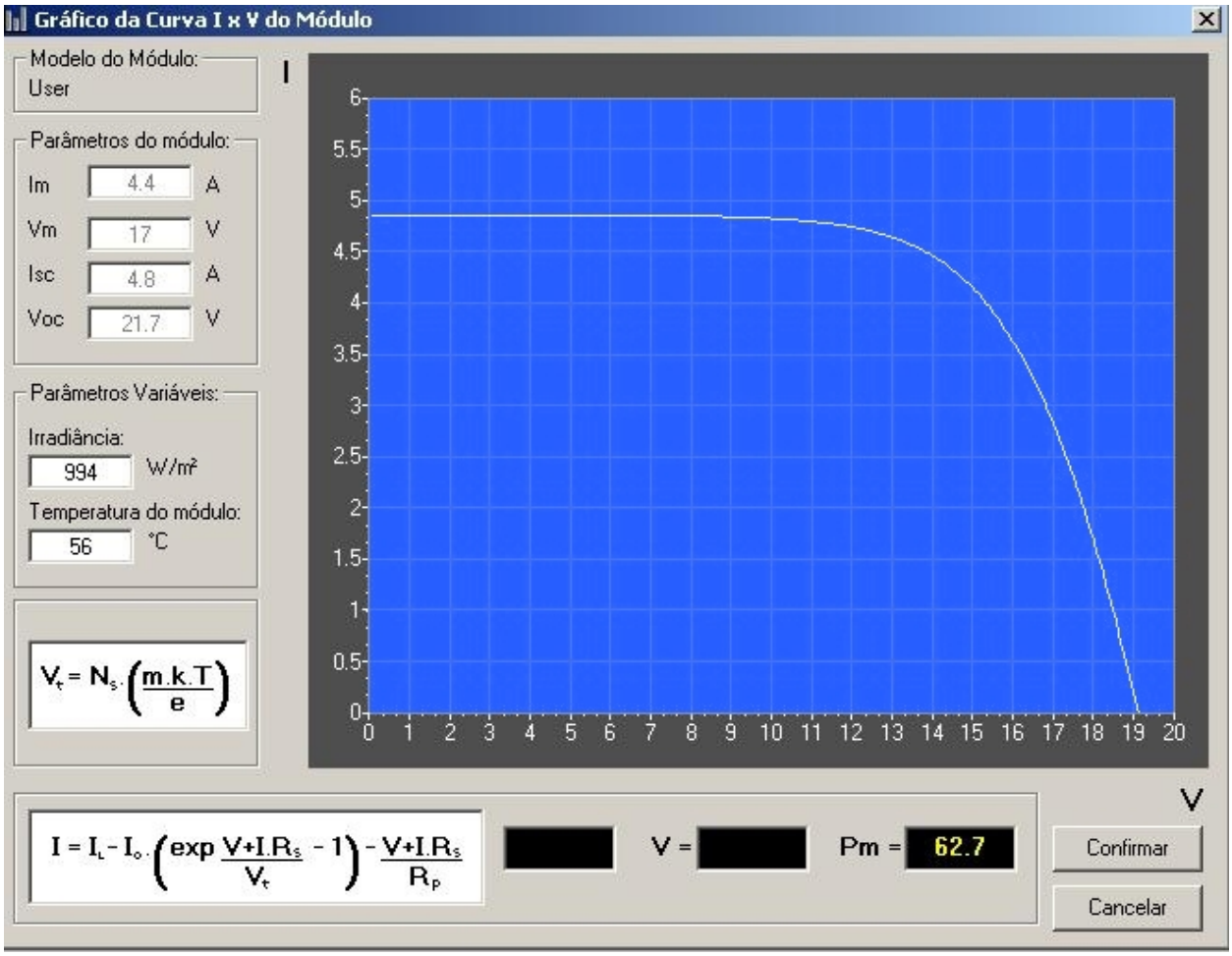
Suerhcke, H., Appelbaum, J., Reshef, B., 1997. **"Modeling a Permanent Magnet DC Motor/Centrifugal Pump Assembly in a Photovoltaic Energy System"**, Solar Energy, Volume 59, Nos. 1-3, pp. 37-42.

Thomas, M. G., 1992. **"La Opción Solar Para El Bombeo De Água",** Sandia National Laboratories, Albuquerque - New México, USA.

Tiba, C., Fraidenraich, N., Barbosa, E. M. de S., 1999. **"Instalação de Sistemas Fotovoltaicos Para Residências Rurais e Bombeamento de Água"**, Editora Universitária da UFPE, Recife - PE, Brasil.

Zilles, R., Fedrizzi, M.A., Trigoso, F.M., Santos, R.R., 1999. **"Avaliação dos Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico – Pontal do Paranapanema – Prodeem Fase I"**, Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, São Paulo - SP, Brasil.

ANEXO 1



Captura da tela do programa PVsize

ANEXO 2

SHURflo®

First in Fluid Innovation

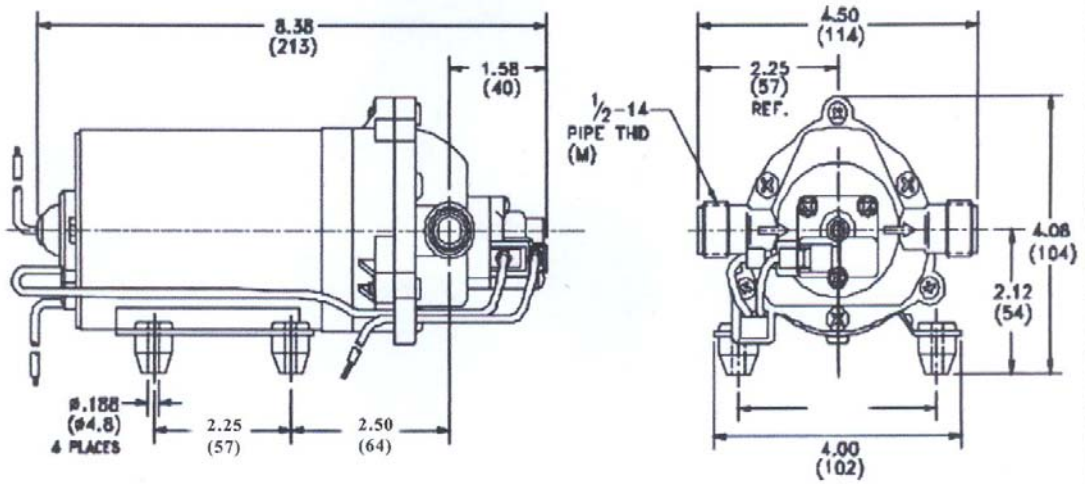
PRODUCT DATA SHEET

MODEL: 8000-443-136

SPECIFICATIONS:

MODEL NUMBER: 8000-443-136
PUMP DESIGN: Positive Displacement 3 Chamber Diaphragm Pump
CHECK VALVE: (1-Way Operation) Prevents Reverse Flow
CAM: 3.0 Degree
MOTOR: Permanent Magnet, P/N 11-111-00
VOLTAGE: 12 VDC Nominal
PRESSURE SWITCH: Adjustable Shut-Off (Range 40-60 PSI)
Factory Set @ 60 PSI, Turn On 45PSI ± 5 PSI
LIQUID TEMPERATURE: 170 Degrees Fahrenheit (77 Degrees Centigrade) Max.
PRIME: Self-Priming Up To 12 Ft. Vertical,
Max. Inlet Pressure 30 PSI (2.1 Bar)
PORTS: 1/2"-14 Male Parallel Thread
MATERIAL OF CONSTRUCTION:
PLASTICS- Polypropylene
VALVES- EPDM
DIAPHRAGM- Santoprene
FASTENERS- Zinc Plated Steel
NET WEIGHT: 4.56 Lbs (2.07Kg)
DUTY CYCLE: Continuous (See Temperature Rise Chart)
TYPICAL APPLICATIONS: Water Delivery

DIMENSIONS:



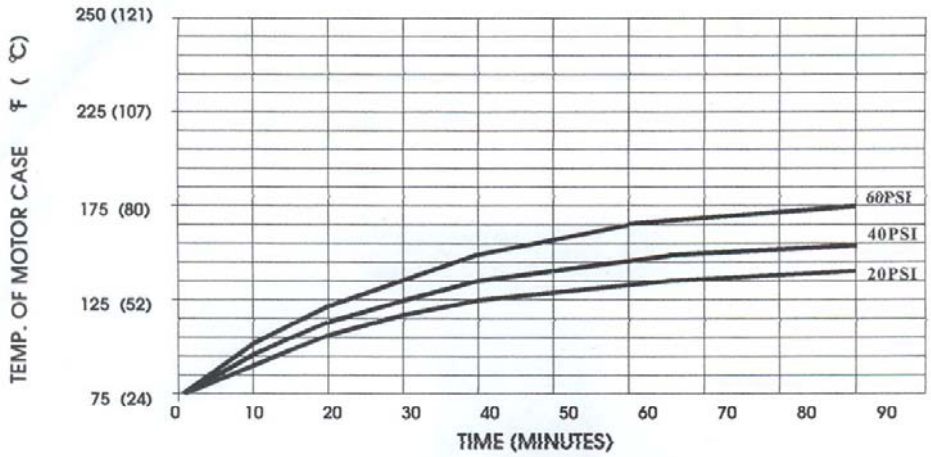
FILE #8000-443-136 REVISED: ISSUED: 4/1/93

Especificações da bomba volumétrica de diafragma da marca Shurflo, dados fornecidos pelo fabricante.

ANEXO 3

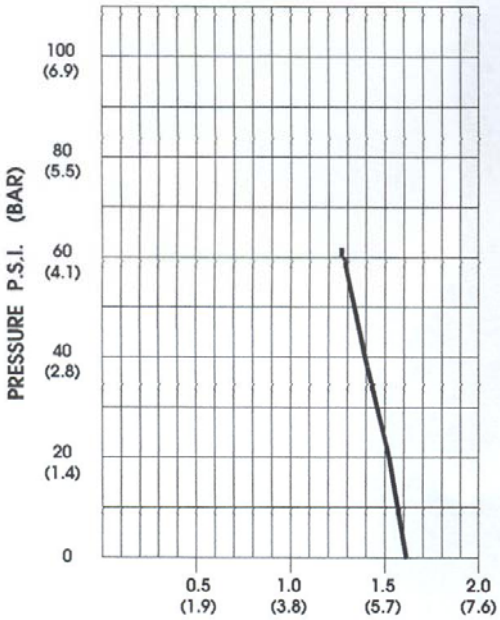
MODEL: 8000-443-136

TEMPERATURE RISE



THIS GRAPH IS FOR USE AS A DESIGN GUIDE. IT IS BASED ON RUNNING CONTINUOUSLY WITH AN AMBIENT TEMPERATURE OF 70° F IN STILL AIR.

TYPICAL PERFORMANCE



PRESSURE (PSI)	FLOW (GPM/LIT)	RPM MIN/MAX	CURRENT (AMPS)	VOLTAGE (VOLTS)
OPEN	1.75/6.6	2290/2315	3.1	12VDC
10	1.66/6.3	225/2255	3.4	"
20	1.57/5.9	2170/2205	4.2	"
30	1.48/5.6	2130/2155	4.9	"
40	1.38/5.2	2045/2085	5.6	"
50	1.30/4.9	2020/2045	6.9	"
60	1.23/4.6	1893/1970	7.2	"

-SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE.
-ALL DATA BASED ON TESTING WITH WATER AT AMBIENT TEMPERATURE.

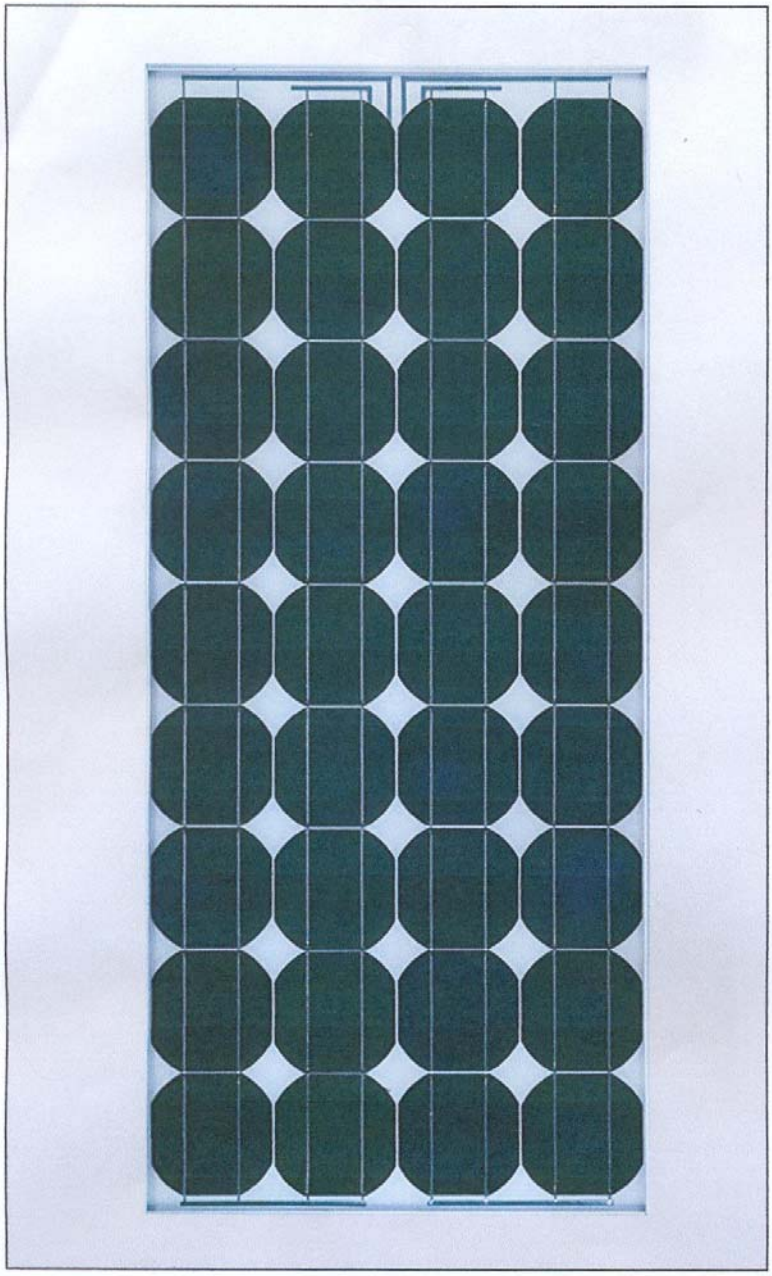
5900 KATELLA AVENUE, CYPRESS CA. 90630 (562) 795-5200 (800) 854-3218 FAX (562) 795-7554
SHURflo EAST, 52748 PARK SIX COURT, ELKHART, IN 46514 (219) 262-0478/(800) 762-8094/FAX 219-262-0478
SHURflo EUROPEAN DIVISION, LIBERTY HOUSE 105 BELL ST., REIGATE, SURREY, UNITED KINGDOM 44-737-242290/FAX 44-737-242282

Curvas de pressão e temperatura da bomba marca Shurflo, dados fornecidos pelo fabricante.

ANEXO 4

SIEMENS

Solar module SP75



When it comes to reliable and environmentally-friendly generation of electricity from sunlight, solar modules from Siemens provide the perfect solution. Manufactured in compliance with the most stringent quality standards, Siemens Solar modules are designed to withstand the toughest environmental conditions and are characterized by their long service life. Siemens Solar modules are covered by a 25-year limited warranty on power output – your guarantee of trouble-free solar power generation.

PowerMax® technology

Siemens' proprietary PowerMax® technology optimizes the energy production of individual cells and solar modules for all types of environmental conditions. PowerMax® process optimization includes a special refining technique for ingots, a clean room semiconductor grade production process, and a multistage proprietary TOPS™ (Texture Optimized Pyramidal Surface) process. The TOPS process incorporates the formation of textured pyramids on the surface of the solar cell. These pyramids are then specially treated to passivate the surface. The cell's optical properties are optimized for maximum absorption of photons from the sun's light. TOPS also maximizes photon absorption from direct and diffused light (typical under cloudy conditions). This means that light absorption is especially high, even at low light levels. Siemens PowerMax® solar cells deliver maximum energy throughout the day.

Solar module

Model:	**SP75**
Rated power:	**75 Watts**
Limited Warranty:	**25 Years**

Certifications and Qualifications

- UL-Listing 1703
- TÜV safety class II
- JPL Specification No. 5101-161
- IEC 61215
- CE mark
- FM Certification

Ilustração e comentários sobre o módulo Siemens SP75 usado nesse trabalho.

ANEXO 5

Intelligent module design

- All cells are electrically matched to assure the greatest power output possible.
- Ultra-clear tempered glass provides excellent light transmission and protects from wind, hail, and impact.
- Torsion and corrosion resistant anodized aluminum module frame ensures dependable performance, even through harsh weather conditions and in marine environments.
- Built-in bypass diodes (12V configuration) help system performance during partial shadowing.

High quality

- Every module is subject to final factory review, inspection and testing to assure compliance with electrical, mechanical and visual criteria.
- 36 PowerMax® single-crystalline solar cells deliver excellent performance even in reduced-light or poor weather conditions.
- Cell surfaces are treated with the Texture Optimized Pyramidal Surface (TOPS™) process to generate more energy from available light.
- Fault tolerant multi-redundant contacts on front and back of each cell provide superior reliability.
- Solar cells are laminated between a multi-layered polymer backsheet and layers of ethylene vinyl acetate (EVA) for environmental protection, moisture resistance, and electrical isolation.
- Durable back sheet provides the module underside with protection from scratching, cuts, breakage, and most environmental conditions.
- Laboratory tested and certified for a wide range of operating conditions.
- Ground continuity of ≤ 1 ohm for all metallic surfaces.
- Manufactured to exacting Siemens quality standards.

Easy installation

- ProCharger™-CR junction box accepts conduit, cable or wire and is designed for easy field wiring.
- Lightweight aluminum frame and pre-drilled mounting holes for easy installation.
- Factory configured for 12V operation and may be reconfigured in the field for 6V operation.
- Modules may be wired together in series or parallel to attain required power levels.

Performance warranty

- 25 Year limited warranty on power output.

Further information on solar products, systems, principles and applications is available in the Siemens Solar product catalog.

Siemens modules are recyclable.

Solar module SP75

Electrical parameters			
Maximum power rating P_{max}		[Wp] 1)	12 V/6 V 75
Rated current I_{MPP}		[A]	4.4/8.8
Rated voltage V_{MPP}		[V]	17.0/8.5
Short circuit current I_{SC}		[A]	4.8/9.6
Open circuit voltage V_{OC}		[V]	21.7/10.9
Thermal parameters			
NOCT 2)		[°C]	45 ±2
Temp. coefficient: short-circuit current			2.06 mA / °C
Temp. coefficient: open-circuit voltage			-.077 V / °C
Qualification test parameters 4)			
Temperature cycling range		[°C]	-40 to +85
Humidity freeze, Damp heat		[%RH]	85
Maximum system voltage		[V]	600 V per UL (1000 V per ISPRA)
Wind Loading	PSF	[N/m²]	50 [2400]
Maximum distortion 3)		[°]	1.2
Hailstone impact	Inches	[mm]	1.0 [25]
	MPH	[m/s]	52 [v=23]
Weight	Pounds	[kg]	16.7 [7.6]

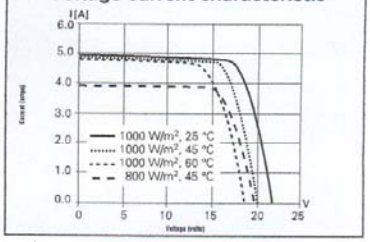
1) Wp (Watt peak) = Peak power (Minimum Wp = 70 Watts)

Air Mass AM = 1.5
Irradiance E = 1000 W/m²
Cell temperature T_c = 25 °C

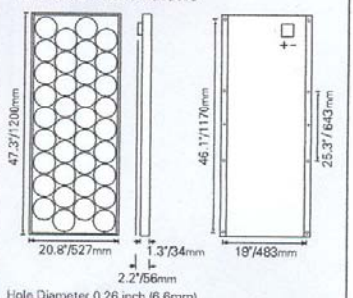
2) Normal Operating Cell Temperature at:
Irradiance E = 800 W/m²
Ambient temperature T_u = 20 °C
Wind Speed v_w = 1 m/s

3) Diagonal lifting of module plane
4) Per IEC 61215 test requirements
5) 12 volt configuration

Voltage-current characteristic



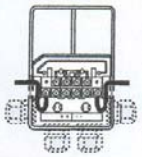
Module dimensions



Hole Diameter 0.26 inch (6.6mm)
Mounting hole dimensions are center to center

ProCharger™-CR Junction-box

Maximum cable diameter: 4mm²
Type of protection: IP44



Your address for photovoltaics from Siemens Solar

© Siemens Solar 1998 Status 11/98 - Subject to modification.

Siemens Solar GmbH
A joint venture of
Siemens AG and Bayernwerk AG
Postfach 46 07 05
D-80915 München
Germany

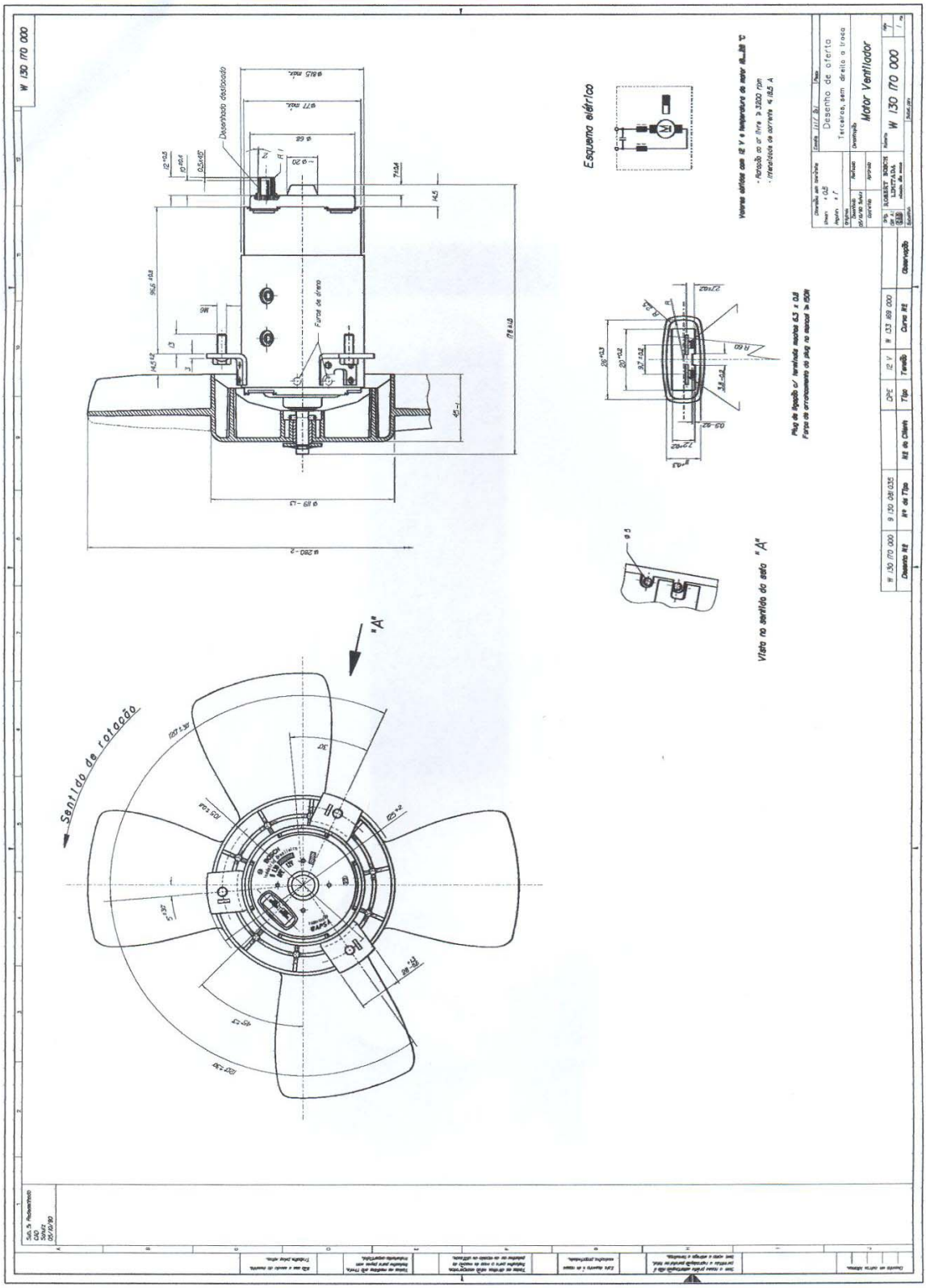
Siemens Solar Industries
P.O.Box 6032
Camarillo, CA 93011, U.S.A.
Web site: www.siemenssolarpv.com
E-mail: sunpower@solarpv.com
Tel: 805-482-6800
Fax: 805-388-6395

Siemens Showa Solar Pte. Ltd.
166 Kallang Way
Singapore 349249
Tel: 65-842-3886
Fax 65-842-3887

Order No. 019897, Rev. D

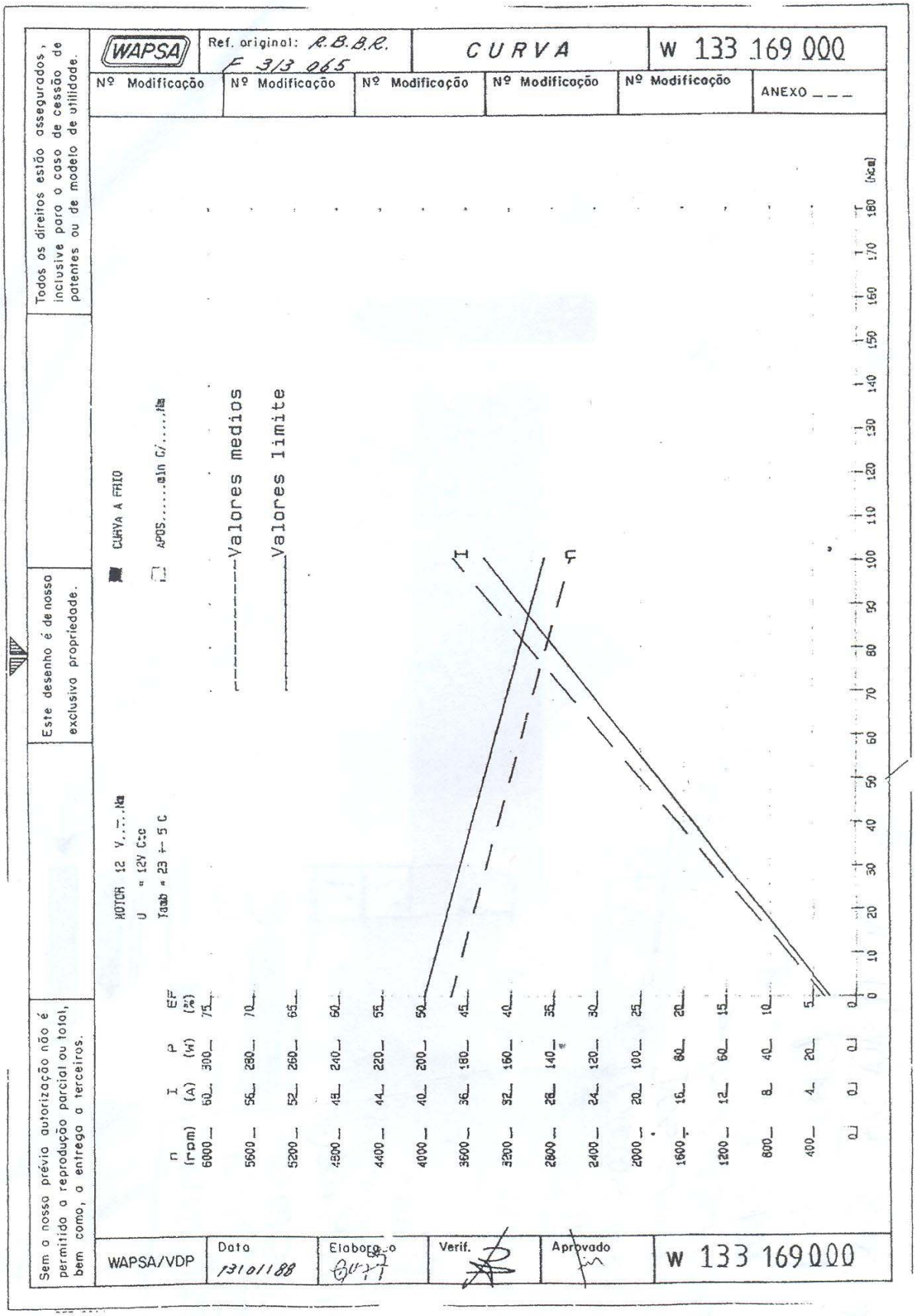
Especificações do módulo Siemens SP 75.

ANEXO 6



Desenho do motor que foi acoplado na bomba centrífuga, dados fornecidos pelo fabricante.

ANEXO 7



Curvas do motor usado na bomba centrífuga, dados fornecidos pelo fabricante.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo