

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



AVALIAÇÃO DE SISTEMA EÓLIO-ELÉTRICO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

LUIZ CARLOS NASCIMENTO LOPES

Fortaleza
Agosto de 2011

LUIZ CARLOS NASCIMENTO LOPES

AVALIAÇÃO DE SISTEMA EÓLIO-ELÉTRICO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.


Orientador: Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr.

Fortaleza
Agosto 2011

LUIZ CARLOS NASCIMENTO LOPES

AVALIAÇÃO DE SISTEMA EÓLIO-ELÉTRICO DE BOMBEAMENTO
DE ÁGUA

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência e Acionamentos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.


Luiz Carlos Nascimento Lopes


Orientador:


Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr.

Banca Examinadora:


Prof. Adeon Cecílio Pinto, Dr.


Prof. Demercil de Souza Oliveira Júnior, Dr.


Prof. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto, Dr.

L854a Lopes, Luiz Carlos Nascimento
Avaliação de sistema eólico-elétrico de bombeamento de água /
Luiz Carlos Nascimento Lopes, 2011
150 f.; il.; enc.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho
Área de concentração: Eletrônica de potência e Acionamentos
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de
Tecnologia, Fortaleza, 2011.

1. Engenharia Elétrica. 2. Controle eletrônico. 3. Bombas centrífugas.
4. Energia – fontes alternativas. I. Carvalho, Paulo Cesar Marques de
(orient.). II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD 621.3

DEDICATÓRIA

À Deus, que por seu infinito amor e pura misericórdia me concedeu vida e saúde. Para que eu, também usando do amor, encontre através da pesquisa, formas saudáveis de atender as demandas da coletividade.

Aos meus amigos, colegas e a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Meus pais, Manoel Lopes Sobrinho e Francisca Nascimento Lopes; meus irmãos Carlos Jivago e Carlos José, meus filhos Priscila Vanessa, Luiz Vinício e Maria Luiza, a minha enteada Maria Eduarda e minha esposa Maria Laudicelia pelos momentos de alegria proporcionados a minha pessoa.

A todos os familiares, eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Deus que tudo criou, usando da força do amor. E que pela sua infinita bondade para com ser humano, tudo nos permite fazer, mas nunca esqueçamos que somos responsáveis pelos resultados do que fazemos!

Ao professor, orientador e amigo, Paulo Carvalho. Agradeço pela orientação, atenção e oportunidade de convivência durante esta temporada.

Aos colegas professores do IF- Sertão Pernambucano, da coordenação do curso de eletrotécnica; João Tercio, Áureo Cezar, Américo, Amenaíde, Ricardo, Raniere, Arnaldo pinho *in memoriam* e em especial ao professor e amigo Rangel, que considero um dos grandes responsáveis por minha formação no mestrado.

Aos demais colegas do IF- Sertão Pernambucano na pessoa do Professor Cícero Antônio, pelo apoio moral e administrativo necessários para liberação integral durante o curso.

Aos professores do departamento de Engenharia Elétrica Henrique Cunha, José Carlos, Luís Henrique e Fernando Antunes, Demercil por oportunizarem novos conhecimentos e fornecer os subsídios à descoberta de um novo panorama dos conhecimentos anteriores.

Ao Centro de Ciências Agrárias da UFC na figura do seu diretor Prof. Dr. Sebastião Medeiros Filho, e cumprimentos especiais aos Prof. Wladimir e Prof. Marcos Esmeraldo.

Aos servidores da UFC: Gadelha, Mário Sérgio e Rafael no apoio administrativo.

Ao Prof. Dr. Adeon Cecílio Pinto da UNIVASF pelo farto material de estudo referente à energia eólica; prontamente disponibilizado.

Aos colegas: Daniel, Fábio Timbó, George, Herminio, Heiner, Luciene, Maikel, Renato, Sigfredo Neto, Andre Pimentel, Daniele e Sandro Juca.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida pelo PIQDTec.

Ao CNPq pelo financiamento do projeto.

“Vide também para os navios, ainda que eles sejam tão grandes e acionados por fortes ventos estes são guiados por um leme muito pequeno para onde quer que deseje o piloto dirigi-lo”.

Tiago 3:4

RESUMO

Lopes, L.C.N. “*Avaliação de um sistema eólico-elétrico de bombeamento de água*”, Dissertação de mestrado em Engenharia elétrica, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2011, 170 p.

Esta dissertação implementa uma planta de uma unidade de bombeamento suprida por eletricidade a partir da energia eólica, para viabilizar a extração da água de poços. Instalada na Estação de Engenharia de Pesca no Campus do Pici situado na Universidade Federal do Ceará (UFC), em Fortaleza - CE, Brasil. A unidade dispõe de um aerogerador (1 kW-220 Vca), um controlador de carga, um sistema de bombeamento de água a partir de poço até um reservatório elevado. A energia elétrica para o acionamento do sistema de bombeamento pode ser fornecida pelo tanto pelo aerogerador quanto através da rede elétrica convencional. Outro aspecto enriquecedor do trabalho foi o desenvolvimento de uma tubulação configurável em que é possível submeter à bomba a diversas cargas hidráulicas, para fins de realização dos testes operacionais. A planta desenvolvida foi capaz de bombear, em média, 4.318 L/dia de água com o valor máximo 10.698 L/dia a uma velocidade de vento média de 3,84 m/s. Os rendimentos médios alcançados foram 10% (eólico/hidráulico) e 41% (elétrico /hidráulico) para uma velocidade de 6,5 m/s. Os ensaios realizados demonstraram baixa robustez do aerogerador utilizado, comprometendo, dessa forma, a disponibilidade operacional e a confiabilidade do equipamento. São sugeridos ações para garantir a viabilidade da unidade usada no bombeamento de água acionada por aerogerador de pequeno porte.

Palavras-chave: Turbina eólica, bomba centrífuga, sistema hidráulico, controlador de carga.

ABSTRACT

Lopes, L.C.N. *“Evaluating of a wind-electric system for water pumping”*, Master Dissertation in Electrical Engineering, Federal University of Ceará (UFC), Fortaleza, 2011, 170p.

This dissertation implements the plant of an unit of pumping water supplied by electricity from the wind energy, to make possible the wells water extraction in semi-arid regions installed at the Station of Engineering Fishing on Pici's Campus of University Federal of the Ceará (UFC), in Fortaleza - CE, Brazil. The unit has a wind turbine (1kW-220 Vac), a load controller, and a water pumping system from a well to an elevated reservoir. The electricity to water pumping system can be powered by wind turbine or conventional grid. Other aspect that improves the work was the development of a piping that can be configured to submit the water pumping system to several hydraulics loads to accomplish the operational tests. The developed plant was able to pump, on an average, 4.318 L/day of water with the maximum value of 10.698 L/day to an average wind speed of 3,84 m/s. The reached average efficiency were : 10% (wind/hydraulic) and 41% (electric/hydraulic) by a wind speed of 6,5 m/s. The accomplished rehearsals demonstrated low robustness of the wind turbine used, pledging, thus, the operational availability and the equipment reliability. Actions are suggested to guarantee the viability of this model of water pumping powered by small size wind turbines.

Words-key: wind turbine, centrifugal pump, hydraulic systems, load controller.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SIMBOLOS	xviii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxi
LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA	xxii

CAPÍTULO 1

CONTEXTO ATUAL DA ENERGIA EÓLICA.....	1
1.1 Objetivos.....	5
1.1.1 Objetivo Geral.....	5
1.1.2 Objetivos Específicos.....	5
1.2 Metodologia.....	5
1.3 Estrutura do Trabalho.....	6

CAPITULO 2

SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADOS POR FONTES

RENOVÁVEIS DE ENERGIA.....	7
2.1 Tecnologias de Bombeamento.....	7
2.1.1 Classificação das Bombas.....	8
2.2 As Bombas Volumétricas.....	11
2.2.1 Sistemas de bombeamento elétrico com bomba de diafragma.....	12
2.2.2 Sistema de Bombeamento Fotovoltaicos Implementado com Bomba Volumétrica.....	14
2.2.3 Bomba vibratória como alternativa à bomba de cavidade progressiva.....	18
2.2.4 Bomba Volumétrica Acionada por Aerogerador.....	20
2.3 As Bombas Hidrodinâmicas ou Cinéticas.....	22
2.3.1 Bombas Centrífugas.....	22
2.3.2 Funcionamento da Bomba Centrífuga.....	23
2.3.3 Características Operacionais das Bombas Centrífugas.....	24
2.3.4 A Bomba Centrifuga Operando em Velocidade Variável.....	26

2.3.5	Bomba Centrífuga Acionada Pela Rede Elétrica.....	28
2.3.6	Bomba Centrífuga Acionada por Aerogerador.....	29

CAPITULO 3

DESCRIÇÃO DA PLANTA DO SISTEMA EÓLICO DE BOMBEAMENTO DE

ÁGUA.....	33
3.1	Descrição Geral da Planta..... 33
3.1.2	Descrição Resumida da Planta..... 33
3.1.3	Princípio de Funcionamento do Sistema Eólico de Bombeamento de Água..... 40
3.2	Descrição do Sistema Elétrico da Planta..... 42
3.2.1	Aerogerador..... 45
3.2.1.1	A Turbina Eólica..... 45
3.2.1.2	O sistema de Orientação..... 46
3.2.1.3	Gerador..... 46
3.2.2	Controlador..... 48
3.2.3	Motor de Indução de Acionamento da Bomba..... 50
3.2.4	Conversor de Frequência..... 52
3.2.5	Analisador de Energia (Ligações Elétricas)..... 54
3.2.6	Dispositivos Elétricos de Uso Geral..... 55
3.2.6.1	Disjuntores..... 55
3.2.6.2	Quadro de Comando do Motor..... 55
3.2.6.3	Tomadas de Força e Lâmpadas..... 57
3.2.6.4	Cabos Elétricos..... 57
3.3	Descrição do Sistema Hidráulico da Planta..... 58
3.3.1	Tubulação..... 59
3.3.2	Poço (Fonte de Água)..... 63
3.3.3	Reservatório..... 65
3.3.4	Bomba Centrífuga..... 66
3.4	Descrição do Sistema de Aquisição de Dados..... 69
3.4.1	Computador..... 70
3.4.2	O Analisador de Energia..... 71
3.4.3	Datalogger..... 73

3.4.4	Os Sensores.....	76
3.4.4.1	Anemômetro.....	76
3.4.4.2	Tacogerador.....	77
3.4.4.3	Transdutor de pressão de vácuo.....	79
3.4.4.5	Transdutor de vazão.....	80
3.5	Procedimentos para Escolha da Bomba (Dimensionament).....	81
3.5.1	Escolha da bomba em Função das Características do Vento Local.....	81
3.5.2	Escolha da bomba em Função das Características do Poço.....	85

CAPITULO 4

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA UNIDADE DESENVOLVIDA.....	88	
4.1	Comportamento do Vento para Local.....	91
4.1.1	Características do Local.....	91
4.1.2	Turbulência.....	92
4.1.3	Distribuição Weibull para Velocidade do Vento Local.....	93
4.1.4	Comportamento do Vento para Local.....	93
4.1.5	Fator de Forma K.....	94
4.1.6	O fator de escala C.....	95
4.1.7	Distribuição da Velocidade do Vento no Local para o Período de 2010.....	96
4.1.8	Valores Médios para o Local.....	98
4.1.9	A Energia Eólica Disponibilizada para o Período.....	99
4.2	A Disponibilidade de Energia Elétrica em Função do Vento.....	101
4.2.1	Potência Elétrica na Saída do Aerogerador, e a Utilizada pelo Conjunto Motor-Bomba.....	101
4.2.2	Energia Disponibilizada pelo Aerogerador GRW 246.....	102
4.2.3	Fator de Capacidade do Aerogerador GRW 246.....	106
4.3	Comportamento da Bomba em Função da Velocidade do Vento.....	107
4.3.1	Potência Absorvida pelo Motor da Bomba em Função da Velocidade Vento.....	107
4.3.2	Curvas de Rotação da Bomba.....	108
4.3.3	Curvas de vazão da bomba.....	109
4.4	Comportamento das Variáveis Não-Elétricas do Processo.....	110
4.5	O Volume de Água Bombeada e a Energia Gerada pelo Sistema.....	114

4.5.1	Ensaio Realizado em Janeiro de 2010.....	114
4.5.2	Medições Realizadas em Novembro de 2010.....	116
4.6	Estudos Relacionados à Tubulação Hidráulica da Planta.....	119
4.6.1	Modelo do Sistema Hidráulico da Planta.....	119
4.6.2	Perdas de Carga em Tubos e Conexões da Tubulação.....	121
4.6.3	Ponto de Operação do Sistema de Bombeamento.....	124
4.6.4	Configuração do Circuito Hidráulico de Elevação.....	127
4.6.5	Rendimento e Potência do Sistema Hidráulico.....	130
4.6.6	Cálculo do NPSH.....	134
4.7	Principais Dificuldades Superadas.....	136

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	141
Conclusões.....	143
Sugestões de Trabalhos Futuros.....	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	149
APÊNDICE A - Publicação Produzida.....	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Comparação entre o fluxo de água do Rio São Francisco e o regime de vento no Nordeste do Brasil [5].....	3
Figura 2.1	Diagrama de blocos dos tipos de bombas hidráulicas.....	9
Figura 2.2	Estrutura interna da bomba de diafragma submersa [12].....	11
Figura 2.3	Sistema implementado com bomba de diafragma do tipo submersa, adaptado de [12].....	13
Figura 2.4	Altura manométrica total [12].....	14
Figura 2.5	Gráfico de desempenho [12].....	14
Figura 2.6	Sistemas de bombeamento fotovoltaico, adaptado de [13].....	15
Figura 2.7	Diagrama de montagem de uma bomba de cavidade progressiva submersa [13].....	17
Figura 2.8	Bombeamento FV com bomba submersa do tipo vibratória [15].....	19
Figura 2.9	Bombas d'água Anauger Solar [15].....	20
Figura 2.10	Sistema de bombeamento eólico elétrico com bomba submersa.....	21
Figura 2.11	Corte de uma bomba centrífuga: (a) vista lateral do caracol e (b) vista frontal do caracol [11].....	22
Figura 2.12	Eficiência versus velocidade específica da bomba centrífuga.....	25
Figura 2.13	Altura, eficiência, e potência motora em função da vazão.....	25
Figura 2.14	Curvas da altura versus vazão para duas velocidades diferentes (n_1 , n_2).....	26
Figura 2.15	Sistema de bombeamento usando uma bomba centrífuga, adaptado de [21]...	28
Figura 2.16	Bombeamento eólico implementado com bomba centrífuga.....	31
Figura 3.1	Esquema geral da planta do sistema de bombeamento eólico.....	34
Figura 3.2	Vista panorâmica da planta do sistema de bombeamento eólico.....	36
Figura 3.3	Suspensão dos tubos e cabos.....	37
Figura 3.4	Poço alimentador de água da planta.....	38
Figura 3.5	Painéis da planta e fiação elétrica.....	38
Figura 3.6	Detalhes da tubulação residente no interior do cubículo.....	39
Figura 3.7	Sistema de aerogeração para bombeamento de água.....	40
Figura 3.8	Diagrama multifilar do sistema elétrico da planta da unidade eólica de bombeamento de água.....	42
Figura 3.9	Transmissão de energia elétrica entre gerador e motor.....	44

Figura 3.10 Conjunto, turbina, gerador e sistema de direcionamento, integrados.....	47
Figura 3.11 Diagrama elétrico do controlador de carga.....	49
Figura 3.12 Circuito de força de um conversor de frequência.....	52
Figura 3.13 Conversor de Frequência CFW 08 [26].....	53
Figura 3.14 Painel traseiro do Analisador de Energia RE 6010 [27].....	54
Figura 3.15 Ligação elétrica do analisador de energia para entrada em estrela.....	54
Figura 3.16 Interior do quadro de comando do motor.....	56
Figura 3.17 Diagrama do sistema de tubulação.....	59
Figura 3.18 Detalhes da tubulação exterior ao cubículo.....	62
Figura 3.19 Parâmetros característicos conseguidos com a máxima vazão Q_M	65
Figura 3.20 Reservatório e parte da tubulação externa.....	66
Figura 3.21 Curvas de performance hidráulica da bomba centrífuga modelo CP-4R [21].....	68
Figura 3.22 Esquema de interligação dos dispositivos do sistema de aquisição de dados.....	69
Figura 3.23 Painel frontal em (a) e driver RS 485/ RS 232 em (b) [31].....	71
Figura 3.24 Janela aberta na tela do PC com uma guia de leitura online [31].....	72
Figura 3.25 Quadro com o datalogger, atenuador e bateria de back up.....	73
Figura 3.26 Diagrama de interligação entre datalogger e sensores.....	74
Figura 3.27 Gráfico gerado pelo PC208 das variáveis de processo [33].....	75
Figura 3.28 Anemômetro de conchas modelo Met-One 014 [34].....	76
Figura 3.29 Em (a) micro-motor, e componentes eletrônicos em (b) componentes do acoplamento.....	77
Figura 3.30 Circuito elétrico do tacogerador.....	78
Figura 3.31 Transdutor de pressão de vácuo [35].....	79
Figura 3.32 Medidor de vazão 2537 [36].....	80
Figura 3.33 Sistema eólico-elétrico de bombeamento da água de um poço.....	85
Figura 4.1 Variação do valor de k ao longo dos meses de 2010.....	94
Figura 4.2 Relação C/V ao longo de 2010.....	95
Figura 4.3 Distribuição de Weibull para diferentes valores de K em função da velocidade do vento.....	96
Figura 4.4 Histograma e curva de Weibull em função da velocidade do vento para 2010.....	97

Figura 4.5	Dia típico para os meses de janeiro a dezembro de 2010.....	98
Figura 4.6	Curva de potência disponível no vento e potência de Betz.....	100
Figura 4.7	Curvas de potência do motor P_m e do aerogerador P_g em função da velocidade de vento.....	102
Figura 4.8	Produção energética mensal do GRW 246 em função da velocidade média [23].....	103
Figura 4.9	Comportamento energético do aerogerador em função da frequência de distribuição da velocidade média do vento.....	103
Figura 4.10	Estimativa da energia mensal gerada e utilizada mensalmente em 2010.....	105
Figura 4.11	Curva da potência do motor em função da velocidade média do vento a partir de dados.....	107
Figura 4.12	Curva da potência motor em função da velocidade média do vento gerada a partir dos dados.....	108
Figura 4.13	Curva de rotação do motor em função da velocidade média do vento a partir de dados.....	108
Figura 4.14	Curva de rotação do motor em função da velocidade média do vento gerada a partir dos dados.....	108
Figura 4.15	Curva da vazão da bomba em função da velocidade média do vento a partir de dados.....	109
Figura 4.16	Curva da vazão da bomba em função da velocidade média do vento gerada a partir dos dados.....	109
Figura 4.17	Curvas das variáveis não-elétricas em função da velocidade do vento.....	110
Figura 4.18	Curvas de rendimento do sistema em função da velocidade do vento local.....	113
Figura 4.19	Volume de água bombeado em função da velocidade média do vento.....	114
Figura 4.20	Volume de água bombeado e a energia produzida função da velocidade média do vento (janeiro de 2010).....	115
Figura 4.21	Volume de água bombeado e energia produzida em função da velocidade média do vento (novembro de 2010).....	117
Figura 4.22	Modelo Hidráulico do Sistema de Bombeamento de Água.....	120
Figura 4.23	Curva da perda de carga para o tubo de 25 DN em função da vazão [11].....	121
Figura 4.24	Esquema do sistema de tubulação utilizado para cálculo das perdas.....	122
Figura 4.25	Pontos de operação quando do uso da válvula de pé de 25 DN.....	126
Figura 4.26	Pontos de operação quando do uso da válvula de pé de 32 DN.....	127

Figura 4.27 Curvas da altura manométrica em função da vazão e da rotação para VP 25 DN.....	128
Figura 4.28 Curvas da altura manométrica em função da vazão e da rotação para VP 32 DN.....	130
Figura 4.29 Performance da bomba centrífuga modelo CP-4R [21].....	131
Figura 4.30 Potência absorvida pelo motor e potência hidráulica de saída da bomba p/ DT=8,20 m.....	131
Figura 4.31 Vazão e rendimento em função da frequência, para altura geométrica de 8,20m.....	133
Figura 4.32 Curvas do NPSHb e NPSHd em função da vazão.....	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características de Bombas Usadas em Sistema de Bombeamento Fotovoltaico [13].....	17
Tabela 2.2	Modelos de bombas vibratórias alimentadas a 24 Vcc [13].....	19
Tabela 3.1	Características Técnicas do Aerogerador, GERAR 246 [23].....	49
Tabela 3.2	Características Eletromecânicas do Motor [25].....	52
Tabela 3.3	Tubos e conexões hidráulicas usados na implementação da tubulação.....	64
Tabela 3.4	Dados do conjunto motor-bomba [21].....	68
Tabela 4.1	Planos de operação adotados para averiguação de dados.....	89
Tabela 4.2	Classificação da superfície quanto à rugosidade.....	93
Tabela 4.3	Dados de vento correspondente a cada mês em 2010.....	94
Tabela 4.4	Dados de vento para o período de 2010.....	99
Tabela 4.5	Estimativa de contribuição energética do gerador GRW 246 para carga nominal em 2010.....	106
Tabela 4.6	Estimativa de contribuição energética do gerador GRW 246 para o motor da bomba em 2010.....	106
Tabela 4.7	Fator de capacidade do gerador GRW 246 para carga nominal e o motor da bomba.....	107
Tabela 4.8	Variáveis de processo em sinal de tensão.....	112
Tabela 4.9	Variáveis de processo em unidades de cada variável.....	113
Tabela 4.10	Energia gerada e a quantidade de água bombeada no período.....	117
Tabela 4.11	Energia gerada e a quantidade de água bombeada no período.....	119
Tabela 4.12	Desníveis totais em função da configuração das válvulas para vários desníveis de sucção.....	126
Tabela 4.13	Comportamento do sistema bombeamento em função da frequência.....	135
Tabela 4.14	Condições ambientais.....	136
Tabela 4.15	Condições operacionais da bomba.....	137

LISTA DE SÍMBOLOS

A_T	Área varrida pela turbina
c	parâmetro de escala
C_p	coeficiente de desempenho
C_{PBz}	Coefficiente de potência de Betz
E_{Ng}	sinal elétrico de rotação
E_{Qg}	sinal elétrico de vazão
E_{Vg}	sinal elétrico de vácuo
f_w	frequência de Weibull de distribuição da velocidade do vento
f	frequência
f_r	frequência de distribuição de classe da velocidade do vento
H_g	altura geométrica
H_D	altura dinâmica
H_E	altura estática
h	altura
I	corrente
k	parâmetro de forma
L/dia	litro por dia
L	indutância
n_s	Velocidade específica
n	velocidade rotacional
P_m	potência elétrica absorvida no motor
P_h	potência hidráulica
P_{Bz}	Potência disponível no eixo da turbina
P_g	potência elétrica de saída do aerogerador
Q	vazão
Q_R	vazão de reposição de água
Q_M	vazão máxima
r	raio
S	turbulência
va	velocidade média anual
v_c	Velocidade de partida da turbina

v_i	Velocidade instantânea do vento
v_m	Velocidade média do vento
v_{me}	Velocidade do vento que produz a máxima energia
v_r	velocidade nominal da turbina
V_{cc}	tensão em corrente contínua
V_{ca}	tensão em corrente alternada
$Vol.$	volume
Z_o	comprimento de rugosidade
%	percentagem
3~	trifásico
γ	peso específico do líquido
η_h	rendimento da bomba
ρ	densidade do ar
ω_m	velocidade angular

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AME</i>	altura manométrica de elevação
<i>AMS</i>	altura manométrica de sucção
<i>AMT</i>	altura manométrica total
AE	analisador de energia elétrica
BAT	bateria
BC	bomba centrífuga
<i>C_c</i>	Controlador de carga
C	capacitor
<i>CEP</i>	comprimento equivalente dos tubos de elevação em paralelo
<i>CF</i>	conversor de frequência
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
CONV. F/V	conversor de frequência para tensão
D	diodo
DE	desnível de elevação
DHT	Distorção harmônica total
DJ	Disjuntor termomagnético
DN	diâmetro nominal
DS	desnível de sucção
DT	desnível total
FP	fator de potência
FS	fator de serviço
FV	fotovoltaico
G	gerador
J	junção
LCD	display de cristal líquido
LEA	Laboratório de Energias Alternativas
<i>NPSH</i>	altura de pressão de vaporização do líquido
<i>NPSH_h</i>	altura de pressão de vaporização do líquido da bomba
<i>NPSH_d</i>	altura de pressão de vaporização do líquido disponível na instalação
P	poço
<i>PA</i>	perda por atrito

PC	computador pessoal
<i>PCS</i>	perda de carga na tubulação de sucção
<i>PCE</i>	perda de carga na tubulação de elevação
PVC	cloreto de polivinila
R	reservatório de água
RD	rede de distribuição de eletricidade
RL	relé
RT	retificador Vac/Vcc
Tr	transformador
TE	tubulação de elevação
TG	tacogerador
TP	trimpot
TR	tubulação de recalque
TS	tubulação de sucção
TUG	tomada de uso geral
TW	turbina eólica
UFC	Universidade Federal do Ceará
VE	válvula de elevação
VP	válvula de pé
VR	válvula de recalque
VS	válvula de sucção
W	senal de velocidade do vento

CAPITULO 1

CONTEXTO ATUAL DA ENERGIA EÓLICA

Uma das atuais preocupações do mundo é a questão relativa à energia, pois esta é fundamental ao ser humano. A energia é utilizada para atender suas necessidades básicas como nutrição, locomoção e conservação da vida. A procura por melhores condições de vida remota à pré-história, e para satisfazer suas necessidades o ser humano dependia diretamente do seu esforço físico. Atualmente, com o advento das máquinas e de variados processos de manipulação da energia, esta relação de dependência foi bastante reduzida, principalmente em países desenvolvidos. À proporção que a população cresce, é necessário ampliar o processo de produção para transformar matéria-prima em produtos finalizados de modo a atender à demanda e para isso é preciso cada vez mais energia [1].

Muitas foram as formas de transformar a energia criadas pelo homem, diversas tecnologias energéticas foram consolidadas para serem utilizadas em benefício do ser humano.

Cada ser humano só percebe a importância da energia na sua vida à medida de sua necessidade. O indivíduo que habita em lugares isolados, normalmente solicita energia para iluminação, alimentar um rádio, uma lanterna e um pequeno motor para processar matéria-prima. Seu modo de viver está associado ao isolamento e sua expectativa em termos de quantidade de energia é pequena, exigindo produção diminuta. Por outro lado, o indivíduo que habita em grandes cidades e que detém elevado poder de aquisição requer grande quantidade de energia, associado a uma grande quantidade de serviços e os mais variados aparelhos destinados a proporcionar conforto. Apesar das necessidades bastante diferentes no que tange a quantidade, ambos são dependentes da energia.

Entre as fontes de energia utilizadas para atender às crescentes demandas de eletricidade a nível mundial, merece destaque o uso da energia eólica. Esta fonte de energia se destaca pelo aspecto da sustentabilidade apresentando, porém, a desvantagem de ser uma fonte intermitente.

O vento é uma fonte de energia limpa, livre e inesgotável e apresenta boa aceitação social. Serviu a humanidade por muitos séculos propulsando navios e acionando cataventos para moer grãos e bombear água. Porém, com o advento da máquina a vapor e dos motores de combustão interna, o interesse em energia eólica foi esquecido. Os altos custos de capital e por ser de modalidade complementar devido à natureza aleatória do vento colocaram a energia eólica em uma desvantagem econômica [2].

A procura pela redução da dependência dos combustíveis fósseis para produção de energia elétrica é cada vez mais intensa no mundo atual, em sintonia com políticas internacionais de meio ambiente a exemplo do MDL- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, no campo do Protocolo de Kyoto. A utilização da força do vento para produção de energia elétrica obteve elevado impulso a partir da década de 1990, por meio de diversos programas implementados em alguns países que incentivaram investimentos e pesquisas tendo como consequência um significativo desenvolvimento tecnológico de processos e equipamentos [3].

O relatório da Conferencia Mundial de Energia Eólica, indicou que a América Latina alcançou uma capacidade instalada total de 1.406 MW em 2009. Tal desenvolvimento, depois de vários anos de estagnação, foi devido principalmente aos dois maiores mercados de energia eólica na América Latina, o Brasil que experimentou aumento de 78,5%, com uma capacidade instalada de 600 MW, e o México, que apesar de crescer 372,9% contribuiu apenas com 402 MW [4]. Esses 600 MW de capacidade instalada no Brasil em 2009 estão implementados com turbinas eólicas de médio e grande porte conectadas às redes elétricas.

A energia eólica pode contribuir para resolver o dilema do uso das águas do rio São Francisco no Nordeste brasileiro (irrigação ou gerar eletricidade). É notória a intensificação cada vez maior do uso da água para irrigação em grandes projetos agronômicos às margens do rio que estão em fase de implementação, inclusive a transposição das águas para outras regiões. Percebe-se que as maiores velocidades de vento no nordeste do Brasil ocorrem justamente quando o fluxo de água do Rio São Francisco é mínimo. Logo, as centrais eólicas instaladas podem gerar energia elétrica reduzindo o volume de água do rio São Francisco para este fim [5]. A figura 1.1 compara o comportamento do fluxo de água no Rio São Francisco e o regime de ventos típicos no interior e litoral no decorrer de um ano para o Nordeste do Brasil.

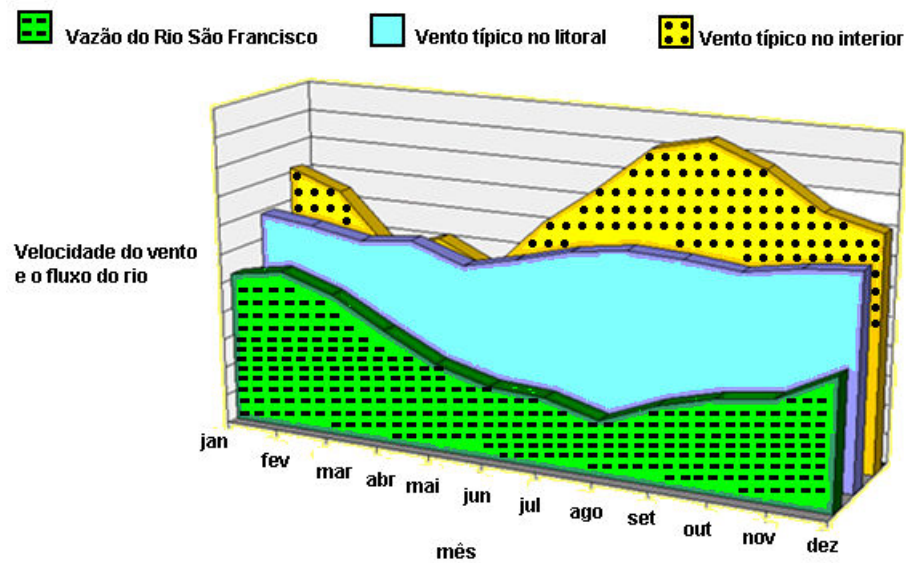


Figura 1.1 Comparação entre o fluxo de água do Rio São Francisco e o regime de vento no Nordeste do Brasil [5].

Do ponto de vista social, as usinas eólicas evitam desapropriações de áreas e remanejamento de população verificada na construção de grandes usinas hidrelétricas, e ainda “há compatibilidade entre produção de eletricidade a partir do vento e o uso da terra para pecuária e agricultura” [3].

Ainda há uma parcela da população localizada na zona rural nos países em desenvolvimento que não é atendida com eletricidade, onde não é viável do ponto de visto financeiro levar rede elétrica. A geração eólio-elétrica é uma forte concorrente a contribuir para a mudança desse cenário, uma vez que é uma energia limpa e renovável, de baixo impacto ambiental internacionalmente madura e com custo decrescente.

Os primeiros anemômetros para medição de potencial eólico no Brasil foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha/Pernambuco apenas no início dos anos 90. Os bons resultados obtidos com aquelas medições favoreceram a determinação precisa do potencial eólico daqueles locais e a instalação de turbinas eólicas.

Vários estados brasileiros seguiram os passos do Ceará e Pernambuco e iniciaram programas de levantamento de dados de vento. As análises dos dados de vento de vários locais no Nordeste confirmaram as características existentes na região: velocidades médias de vento altas, pouca variação nas direções do vento e pouca turbulência durante todo o ano.

Paralelamente ao problema da escassez de água, as regiões semi-áridas, em geral, possuem grandes potenciais energéticos para fontes renováveis de energia, tais como solar e eólica. A extração de água do subsolo é uma alternativa que pode ser viabilizada por meio do uso de bombas alimentadas por eletricidade, que é uma modalidade que pode ser obtida a

partir da energia solar ou eólica. Uma vez que o Nordeste dispõe de um bom potencial eólico e boa quantidade de água subterrânea, tais potenciais incentivam o uso da energia eólica para extração de água do subsolo. Deste modo, os sistemas de bombeamento de água implementados com pequenos aerogeradores para fornecer eletricidade a conjuntos motor-bomba são uma alternativa viável para contribuir para potencializar a extração de água subterrânea.

A tecnologia de bombeamento de água usando a energia eólica não é nova, na realidade, as máquinas acionadas pelo vento são usadas desde a Idade Antiga, e podem ser consideradas como um dos primeiros avanços tecnológicos da humanidade. O primeiro registro histórico do uso da força motriz do vento para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos remota à Pérsia (atual Iraque/Irã), em meados do ano 200 a.C. Máquinas similares têm sido utilizadas na Europa há muitos séculos. Os cata-ventos de múltiplas pás para bombeamento d'água são muito conhecidos e usados há muitas décadas, inclusive no interior do Brasil. Os aerogeradores de pequeno porte para geração de energia elétrica (sistemas isolados) também já vem sendo usados há décadas [6].

O Brasil já dispõe comercialmente da tecnologia de aerogeradores e existem diversas empresas fornecedoras de máquinas de pequeno porte para aplicações em sistemas autônomos isolados. A depender da aplicação, geralmente para empregos em larga escala com máquinas de grande porte, necessita-se de uma velocidade média de vento de no mínimo 6,5 m/s a 7,5 m/s, para que os sistemas sejam economicamente viáveis. Ao passo que em pequenos sistemas isolados, assume-se que uma velocidade média de 3,5 m/s a 4,5 m/s é o mínimo aceitável para que a viabilidade técnica e financeira seja atendida [6].

Avalia-se que a vida útil de aerogeradores seja de 15 anos. Os dispositivos eletrônicos (inversor, controlador de carga) superam 10 anos. No caso de sistemas eólicos isolados com armazenamento de energia em baterias, estas são consideradas o ponto crítico do sistema [6].

No âmbito mundial, a maior parte dos aerogeradores de pequeno porte utiliza armazenadores de energia, para garantir a qualidade e a continuidade do fornecimento da energia elétrica. No entanto, por utilizarem baterias, essas unidades apresentam um custo de operação e manutenção relativamente alto, além de diminuírem a vida útil global do sistema, considerando que os armazenadores se inutilizam em aproximadamente cinco anos. Por outro lado, aerogeradores que não utilizam baterias armazenam energia na forma hidráulica por meio de reservatório elevado. Normalmente, o reservatório é de polietileno, bem mais em conta e de maior durabilidade; deste modo o custo de aquisição, operação e manutenção diminui e a vida útil global aumenta. Para aerogeradores destinados ao bombeamento de água,

é adequado utilizar conjuntos motor-bomba de corrente alternada (ca) por dispensar o uso de acessórios que encarecem ainda mais os custos de operação, manutenção e aquisição.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar do ponto de vista técnico a viabilidade de uma unidade de bombeamento de água acionada por um aerogerador de pequeno porte.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Estudar o acionamento de uma unidade de bombeamento por aerogerador de pequeno porte;
- b) Analisar o funcionamento da unidade instalada em diferentes condições de operação;
- c) Avaliar a eficiência operacional e energética do sistema de bombeamento;
- d) Analisar a produção de água bombeada.

1.2 METODOLOGIA

O estudo em questão contempla um trabalho de interação entre a tecnologia de bombeamento e a tecnologia de aerogeradores, analisando a eficiência do sistema como um todo. O presente estudo envolve conceitos em várias esferas da engenharia, como aspectos técnicos de engenharia elétrica e hidráulica.

Tal pesquisa foi conduzida, primeiramente, mediante investigação do estado da arte mundial sobre tecnologias de bombeamento de água usando a energia eólica. Em seguida, realizou-se em campo uma validação experimental do sistema, instalando-se o sistema de bombeamento com a possibilidade de escolha da configuração em que o sistema de bombeamento pode ser alimentado pelo aerogerador ou pela rede. Finalmente, foram efetuadas coletas de dados através de sensores e sistemas de aquisição, para realização das análises em diversas configurações.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente estudo foi organizado em cinco capítulos. O primeiro deles, a introdução, contextualiza os principais aspectos gerais, motivação e objetivos da dissertação. O segundo capítulo desenvolve uma revisão e o estado da arte das principais tecnologias de bombeamento, bem como das possíveis fontes utilizadas para alimentação, dando destaque ao sistema de bombeamento alimentado por energia eólica. O terceiro capítulo descreve a respeito do sistema de bombeamento desenvolvido e instalado em campo, detalhando cada componente do sistema. O quarto capítulo aborda a validação experimental do estudo, apresentando os resultados obtidos e as respectivas análises. O último capítulo finaliza com a conclusão geral, as principais dificuldades encontradas e superadas na implementação do sistema de bombeamento em campo e as perspectivas de trabalhos futuros.

CAPITULO 2

SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA ACIONADOS POR FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

Caracterizada por períodos de secas recorrentes, a região Nordeste é considerada uma das mais vulneráveis em termos sócio-econômico e ambiental do Brasil. Os relatórios mais atuais do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apontam que as secas e enchentes na região estão propensas a intensificar-se, episódio que vem sendo registrado e tem chamado a atenção de pesquisadores e formuladores de políticas públicas. O governo brasileiro investe na região e conseguiu reduzir os efeitos e impactos da seca por meio da construção de centenas de açudes. Essas ações ampliaram os recursos hídricos disponíveis, porém, o impacto na qualidade de vida das pessoas ficou aquém do esperado e do necessário. A base da economia na região permanece a agropecuária extensiva, distribuída em vastas propriedades de terra, principal causa do desmatamento, e a agricultura de subsistência, repartidas em sistemas produtivos ainda muito ineficientes. O bioma da região, a caatinga, vem sendo reduzido, tornando as conseqüências ambientais das secas ainda mais severas [7].

A concatenação de recursos tecnológicos, humanos, financeiros e de políticas públicas com o propósito de incubar novas práticas de convivência com a seca e adaptação à mudança climática pode ser implementada pelo uso de energias renováveis no que tange respeito ao bombeamento de água aproveitando melhor a infra-estrutura hídrica já disponível em açudes, barreiros e poços. Neste contexto, o uso das energias renováveis pode contribuir como recurso tecnológico para garantir a segurança alimentar e a geração de renda baseada na pequena e média propriedade agrícola, produzindo sem destruir o ecossistema local.

2.1 Tecnologias de Bombeamento

Embora a agricultura esteja em prática há mais de 10.000 anos, os primeiros registros que se tem de irrigação são devidos aos egípcios. Inicialmente transportavam a água em potes, mas cerca de 1.500 a.C. apareceu a primeira máquina de elevação de água, a picota, constituída por duas varas de madeira, um deles na posição vertical. A outra, perpendicular a primeira, possui numa extremidade um peso e no outro um recipiente para a água. Abaixando-se o recipiente ao poço, o peso na outra extremidade da vara ajuda a içar o recipiente com água. Posteriormente apareceu o sarilho usado para elevar um balde, máquina simples em que um cabo é tracionado por seu enrolamento em um cilindro, acionado por uma manivela

de raio maior; em seguida veio a nora, engenho ou aparelho para tirar água de poços ou cisternas que é constituído por uma roda com pequenos reservatórios ou alcatruzes e por fim a roda persa [8]. Todas estas máquinas eram movidas por trabalho humano ou animal. O sarilho é empregado ainda hoje no abastecimento de água. Um dos tipos mais antigos de bomba foi o Parafuso de Arquimedes, empregado por Senaquerib, Rei da Assíria, para a irrigação dos Jardins Suspensos da Babilônia e Nínive, no século VII a.C. e descritas depois em maior detalhe por Arquimedes no século III a.C [9].

As bombas alternativas a pistão ou êmbolo já eram do conhecimento dos gregos e dos romanos. Ctesibius, por volta de 250 a.C., criou uma bomba alternativa movida por uma roda d'água, montada por seu discípulo Hero de Alexandria [8]. As bombas cinéticas, apesar de resultar de idéias muito antigas, passaram a ser construídas para uso real no início do século XIX. O inventor francês Denis Papin construiu uma "bomba de ar" no fim do século XVII, mas precisava de um acionador adequado. O aparelho foi denominado, *fole de Hesse*, uma homenagem ao patrono de Papin, o príncipe de Hesse.

Os sistemas de bombeamento usam vários tipos de bomba e na irrigação são fundamentais para transportar a água da fonte até a plantação. Bomba é uma máquina hidráulica que recebe energia mecânica através da força motriz de um motor, e converte-a em energia hidráulica que por sua vez transmite força ao fluido o qual é transportado de um ponto a outro.

2.1.1 Classificação das Bombas

As bombas possuem complexos mecanismos e são usadas nas mais diversas aplicações e por isso são produzidas em vários modelos e tamanhos. No entanto, o conjunto de todos os modelos é dividido e classificado em duas grandes categorias fundamentais, bombas *volumétricas* e *hidrodinâmicas* [10].

As bombas podem ser classificadas ainda pela sua aplicação ou pelo modo como a energia é fornecida ao fluido. Normalmente, existe uma relação entre o emprego e a característica da bomba que, por sua vez, está fortemente relacionada ao modo como a energia é transferida a ao fluido. A forma pela qual é efetuada a transformação do trabalho em energia hidráulica e o recurso para cedê-la ao líquido ampliando a pressão e/ou a velocidade permitem que elas se classifiquem em bombas de volumétricas e hidrodinâmicas [11]. Dentre as classificações de bombas de deslocamento positivo e de turbo-bombas se pode enumerar

algumas das mais importantes subdivisões destas bombas, como mostra o diagrama de blocos da figura 2.1.

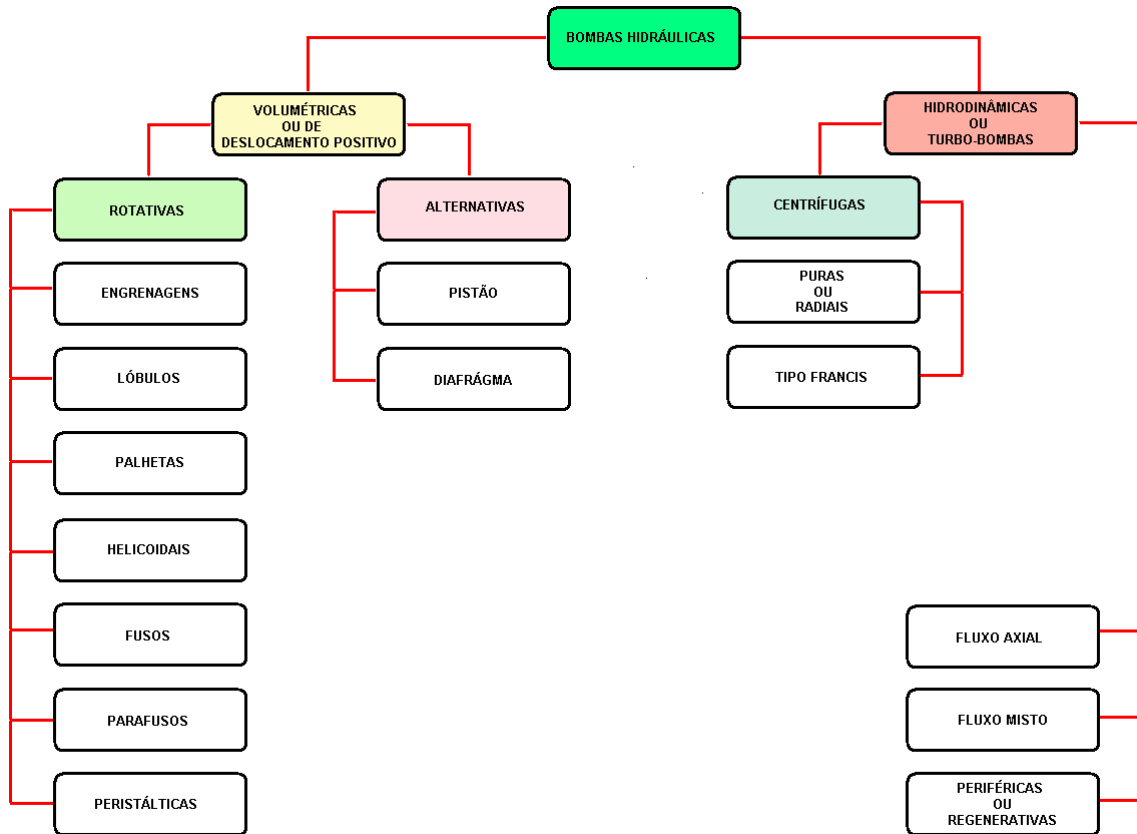


Figura 2.1 Diagrama de blocos dos tipos de bombas hidráulicas

Tanto as bombas *volumétricas* quanto as *hidrodinâmicas* podem implementar diversos sistemas de bombeamento.

Normalmente, um sistema de bombeamento é denominado de acordo com a modalidade de energia que alimenta o motor de acionamento da bomba. As bombas foram acionadas, na antiguidade, por rodas d'água, cata-ventos e pela força muscular, de homens ou de animais. Embora ainda haja muitas bombas acionadas manualmente, a grande maioria das bombas modernas é acionada por motores elétricos. O motor elétrico é máquina destinada a transformar energia elétrica em mecânica, sendo o mais usado de todos os tipos, pois combina as vantagens da energia elétrica de baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando, construção simples, custos de aquisição e manutenção reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos. Na atualidade, a grande maioria das bombas é acionada por motores elétricos em corrente alternada

Em menor quantidade, as bombas são acionadas também por motores de combustão interna e por turbinas a vapor ou a gás e motores hidráulicos.. Seguem-se as bombas acionadas a motores de combustão interna, as bombas acionadas diretamente por ar comprimido e as acionadas a cata-ventos.

Os motores das bombas podem ser acionados por eletricidade advinda do sistema de distribuição ou de sistema fotovoltaico, eólico-elétrico, etc. em localidades remotas.

Sistemas de bombeamento que empregam bombas acionadas eletricamente representam uma das soluções mais eficientes para lugares onde há acesso à eletricidade. O conjunto motor-bomba é simples de operar e eficaz, não necessitando de caixa de velocidades e ainda é silencioso. As bombas acionadas eletricamente apresentam como vantagens, a opção de ser o dispositivo do sistema de bombeamento menos oneroso com relação aos demais tipos, apresentam manutenção reduzida, é o tipo de bombeamento mais comum, fácil de achar peças de reposição, usa motores elétricos já consolidados e de alta eficiência. A principal desvantagem das bombas acionadas eletricamente é que para manter o baixo custo de instalação do sistema de bombeamento, o conjunto motor-bomba deve ser usado em lugares com acesso a rede elétrica, outra desvantagem é a vida útil em torno de 4 a 5 anos.

O conjunto motor-bomba pode ser denominado de acordo com a modalidade energética usada pela unidade motora de acionamento abrangendo as duas grandes categorias de bombas *volumétricas* e *hidrodinâmicas*. Nas seções seguintes serão discutidas a respeito de alguns tipos bombas, que empregam o princípio de funcionamento de uma das duas categorias de bombas mencionadas.

2.2- As Bombas Volumétricas

Também denominadas de hidrostáticas ou de deslocamento positivo são bombas em que o fluido adquire movimento e pressão em seu interior da bomba sem experimentar nenhum aumento significativo da velocidade, já que o fluido é simplesmente aspirado e recalçado. Uma vez que o fluido administrado não depende da pressão, tal fato torna esse tipo de bomba adequada à transmissão de força hidráulica [10]. As bombas volumétricas são classificadas de acordo com o tipo de órgão mecânico que efetua o deslocamento do líquido e se divide em dois grandes grupos: as bombas Alternativas e as bombas Rotativas. As Alternativas são bombas de movimento alternativo que usam como elemento de impulso do diafragma, ou pistão inserido num cilindro, com válvulas de sucção e descarga integradas na bomba. As Rotativas são bombas de denominação genérica por compreender uma variedade de bombas volumétricas, em que o deslocamento do líquido é provocado pela rotação do órgão mecânico, que pode ser: engrenagens, paletas, lóbulos, parafusos, ou tubo flexível.

Bombas vibratórias são exemplos bombas alternativas em que o elemento que fornece a energia ao líquido é uma membrana (diafragma) acionada por uma haste com movimento alternativo. O movimento da membrana, em um sentido, diminui a pressão da câmara fazendo com que seja admitido um volume de líquido. Ao ser invertido o sentido do movimento da haste, esse volume é descarregado na linha de recalque.

As bombas de diafragma como elemento de impulso ainda se subdividem em: vibratórias e cavidade progressiva, esta última bastante usada em sistemas fotovoltaicos.

Um tipo de bomba vibratória muito usada é a submersa, também denominada de bomba sapo pelo fato de funcionarem exclusivamente dentro da água. A figura 2.2 mostra a estrutura interna de uma bomba de diafragma do tipo submersa.

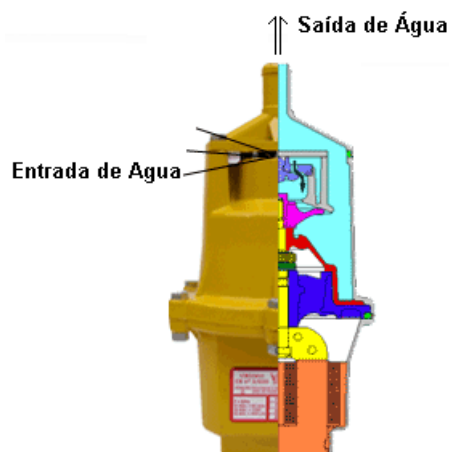


Figura 2.2 Estrutura interna da bomba de diafragma submersa [12]

As bombas alternativas que usam arranjo de diafragma, com válvulas de sucção e descarga integradas na bomba, são uma aplicação moderna de bombas de deslocamento positivo denominadas de bombas de diafragma. Estas bombas podem ser movidas diretamente a ar comprimido, a vapor ou através de um mecanismo biela-manivela, que pode ser acionado por motor elétrico, ou motor de combustão interna, através de polias e correias, engrenagens ou mesmo com acionamento direto.

Estas bombas funcionam pela vibração do diafragma resultante do rápido movimento alternante linear fornecido por um motor eletromagnético não rotativo alimentado em corrente alternada; normalmente, o diafragma é confeccionado em borracha de boa resistência mecânica à pressão.

2.2.1 Sistemas de bombeamento elétrico com bomba de diafragma

De construção simples, quando comparada com os demais tipos em sua faixa de potência, tem boa performance e o mais baixo custo de aquisição.

Esta bomba é empregada no bombeamento de água, livre de sólidos em suspensão. O mercado disponibiliza bombas de diafragma do tipo submersas com potências desde 250 até 450 W. Este é um dos sistemas de bombeamento elétrico mais simples e menos oneroso. É de fácil instalação e requer a aquisição de poucos acessórios para funcionamento. Neste sistema a bomba deve ser localizada no máximo a 20 m de profundidade em termos de submersão com relação ao nível estático. Estas bombas podem operar a uma altura vertical que varia de 5 a 60 m; altura que compreende a distância desde a entrada de água da bomba até o ponto mais alto da tubulação que vai para o reservatório

A instalação da bomba de diafragma do tipo submersa requer apenas mangueira $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{4}$ (depende da medida da saída da bomba) de polegada para condução da água de saída, e esta por sua vez assume também a sustentação da bomba. Para movimentar, colocar ou retirar a bomba do poço deve-se usar a própria mangueira ou uma corda como segurança adicional que pode ser afixada no olhal contíguo à saída da bomba. Esta corda não deve ser condutora de eletricidade, é comum usar uma de nylon de 6 mm. Este tipo de bomba, devido a sua natureza vibratória, para que funcione adequadamente deve ter espaço suficientemente para que possa vibrar livremente. Por isso, devem ser instaladas centralizadas entre às laterais do poço ou cisterna, sendo necessário manter uma distância mínima do fundo do poço que varia de 0,4 a 1 m, a depender da bomba.

Um exemplo de sistema de bombeamento elétrico com bomba de diafragma do tipo submersa tem seu diagrama apresentado na figura 2.3.

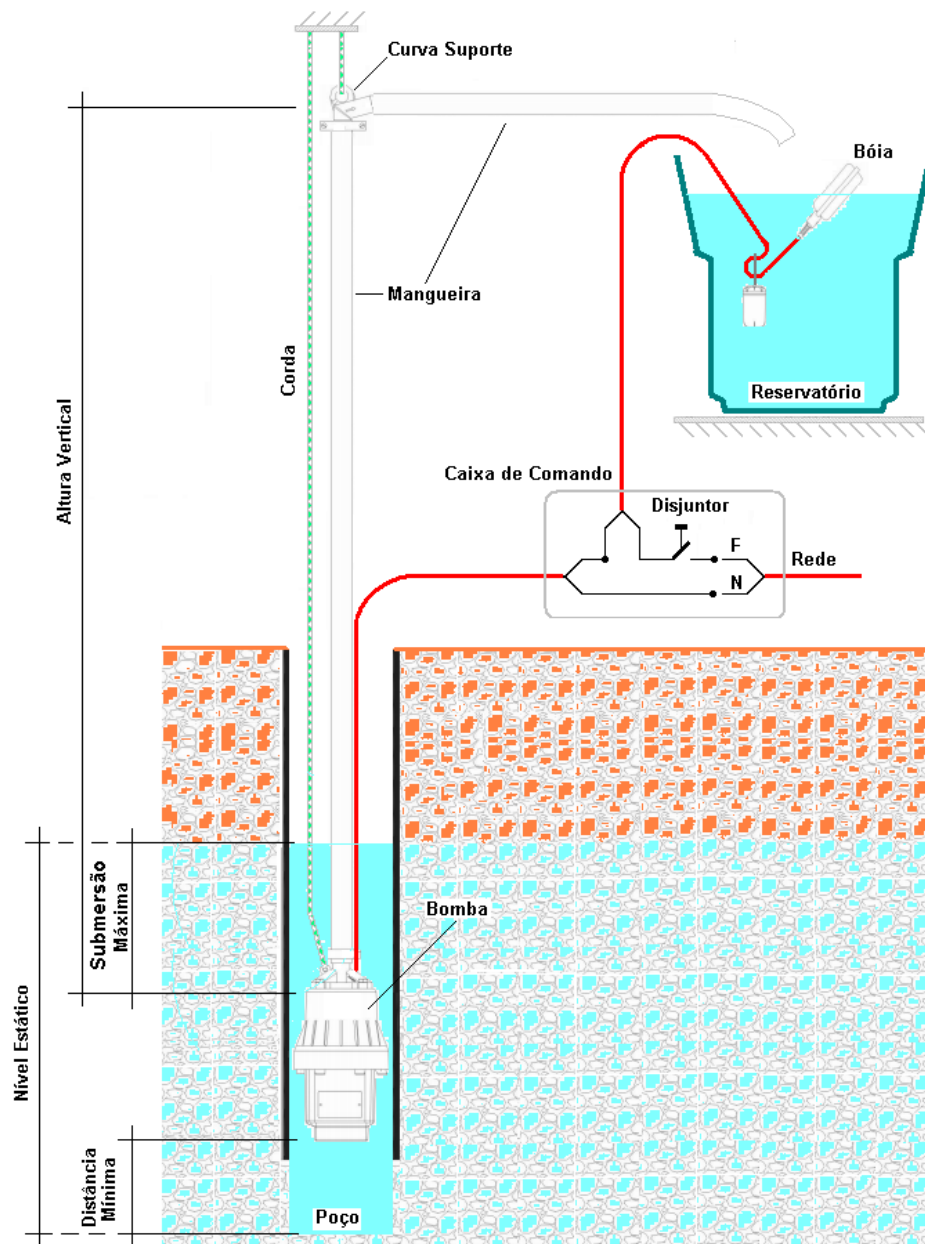


Figura 2.3 Sistema implementado com bomba de diafragma do tipo submersa, adaptado de [12]

Para obter o valor da vazão desta bomba é preciso saber a altura manométrica total da instalação. Assim, deve-se verificar qual a altura vertical e o comprimento total da tubulação, ou seja, comprimento da mangueira, que compreende o percurso da entrada de água da bomba até reservatório. A altura manométrica total depende da altura vertical e do comprimento total da tubulação e pode ser obtida por meio da figura 2.4.

		L = Comprimento total da tubulação (em metro), da bomba até o reservatório.																			
		10	20	40	60	80	100	125	150	175	200	225	250	300	350	400	450	500	600	700	800
h = Altura (em metro) da entrada de água na bomba até o reservatório.	5																				
	10	6	7	8	10	11	13	14	16	18	20	22	24	28	31	35	39	43	50	58	65
	15	11	12	13	15	16	18	19	21	23	25	27	29	33	36	40	44	48	55	63	
	20		17	18	20	21	23	24	26	28	30	32	34	38	41	45	49	53	60		
	25			22	23	25	26	28	29	31	33	35	37	39	43	46	50	54	58	65	
	30				28	30	31	33	34	36	38	40	42	44	48	51	55	59	63		
	35				33	35	36	38	39	41	43	45	47	49	53	56	60	64			
	40				38	40	41	43	44	46	48	50	52	54	58	61	65				
	50				43	45	46	48	49	51	53	55	57	59	63						
	60					55	56	58	59	61	63	65									
					62	63	64	65													

Figura 2.4 Altura manométrica total [12]

Uma vez conhecendo a medida da altura vertical e do comprimento da tubulação, encontra-se o valor da altura manométrica total por meio da tabela mostrada pela figura 2.4. Por exemplo, sendo a altura vertical da instalação 25 m e o comprimento total da tubulação de 200 m, entra-se com estes valores na tabela donde se encontra o valor da altura manométrica total igual a 40 mca. Uma vez dispoendo deste valor de altura é possível obter a vazão de água por meio do gráfico de desempenho hidráulica da bomba, apresentado pela figura 2.5.

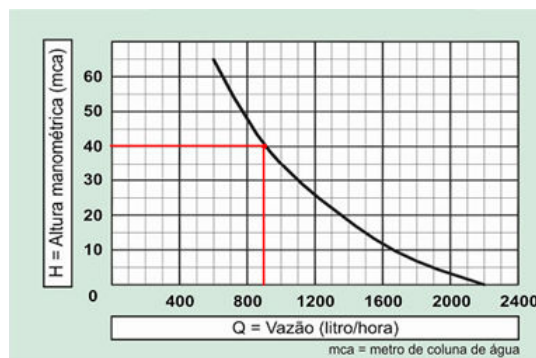


Figura 2.5 Gráfico de desempenho [12]

A bomba citada no exemplo está submetida a uma altura manométrica de 40 mca, com base na curva de desempenho apresentada pela figura 2.5 a vazão é de 900 L/h.

Para proteção da instalação elétrica e interrupção do funcionamento é previsto disjuntor localizado no quadro de comando. Uma bóia providencia o desligamento automático da bomba quando o volume de água no reservatório atinge o nível máximo e religa a bomba quando o nível alcançar o limite mínimo.

2.2.2 Sistema de Bombeamento Fotovoltaico Implementado com Bomba Volumétrica

Bombas fotovoltaicas (FV) utilizam energia solar para bombear água de superfície e de poços. São economicamente competitivas com as bombas a diesel somente para bombas de baixa potência. Apesar de serem mais caras que as bombas convencionais a diesel, são classificadas como bombas mais limpas que contribuem para frear o aquecimento global. Um

sistema de bombeamento FV típico consiste de gerador fotovoltaico, sistema de acondicionamento de potência, conjunto motor-bomba e equipamentos complementares.

O comportamento do módulo FV em diversas condições de radiação e de carga pode ser verificado mediante sua curva característica ($I \times V$) que, também sob efeito da temperatura, influencia a potência de saída do módulo. Seu dimensionamento deve levar em considerações fatores como: características da carga, condições de irradiação local, local de instalação e demanda real da carga. Em seguida, é preciso determinar a potência que cada módulo vai produzir e, assim, definir a quantidade necessária para constituir o painel. Levando em conta tais fatores, intenta-se reduzir o máximo possível a potência do gerador FV, sem comprometer o desempenho ótimo do sistema de bombeamento.

Existem duas formas de instalação da bomba:

- Na *forma direta*, o painel FV fornece energia diretamente à bomba, permitindo o seu funcionamento ininterrupto enquanto haja insolação, figura 2.6 (a). Neste sistema o custo de implantação é menor e simples, pois o painel fornece a energia necessária diretamente à bomba, sem adição de baterias ou controlador de carga, porém a capacidade de bombeamento estará sujeita às variações de insolação [13].

- Na *forma indireta* são adicionadas ao sistema FV baterias e um controlador de carga, para armazenar energia durante o dia e para controlar a necessidade de bombeamento, figura 2.6 (b). No sistema indireto é possível usar a carga das baterias para outros fins energéticos e para bombear água à noite e em dias de chuva [13].

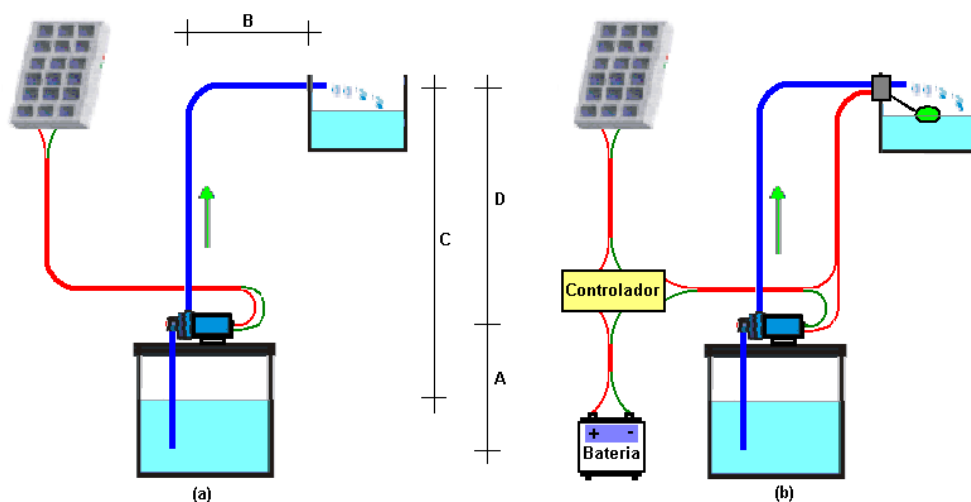


Figura 2.6 Sistemas de bombeamento fotovoltaico, adaptado de [13]

A altura de recalque para bombas de diafragma de superfície e submersível é obtida conforme [14] e é dada pela expressão:

$$h = A + \left(\frac{B}{15}\right) + C + D \quad (1)$$

Sendo:

h = altura manométrica total; em mca;

A = Medida da profundidade do poço, em metros;

B = Medida da distância do poço até a caixa d'água;

C = Medida do desnível entre o poço e o pé da caixa d'água, em metros e

D = Altura do reservatório ou caixa d'água.

Um modo prático para calcular a altura manométrica total de forma simplificada em dois passos é:

- somar o desnível total (em metros) entre a captação de água e o topo da caixa de água.

- depois, deve-se adicionar o comprimento total da tubulação na razão de 01 metro de altura manométrica para cada 10 metros de tubulação [15].

Os sistemas FV também podem ser implementados por dois tipos de bombas: as bombas de superfície, que podem bombear água de um flutuador em suspensão ou diretamente de uma base, sempre que o desnível de sucção entre o nível da água e a entrada da bomba seja de poucos metros ou com as bombas submersas.

Normalmente, sistemas de bombeamento fotovoltaico são implementados através de bomba do tipo cavidade progressiva. A bomba do tipo cavidade progressiva é acionada por meio de motor rotativo que, através, de um sistema mecânico, converte movimento angular do eixo do motor em movimento axial alternativo vibratório o qual é transmitido ao diafragma da bomba na forma de deslocamento positivo. Este tipo de bomba é compacta, leve, podem ser afixadas em paredes ou suporte simples e ainda podem ser içadas por meio de cabo. Podem ser alimentadas eletricamente por meio de painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, ou diretamente por baterias [13].

O modelo 8000 fabricado por [13] é uma bomba de superfície do tipo cavidade progressiva, capaz de bombear 285 L/h de água a uma altura de 42 m com poder de succionar até 3 m de profundidade quando alimentadas em 12 Vcc

O fabricante [13] também produz o modelo 9300, esta é uma bomba submersa do tipo cavidade progressiva capaz de bombear 310 L/h a uma altura de 70 m em 24 Vcc, a figura 2.7 mostra o diagrama de montagem em detalhes do referido modelo.

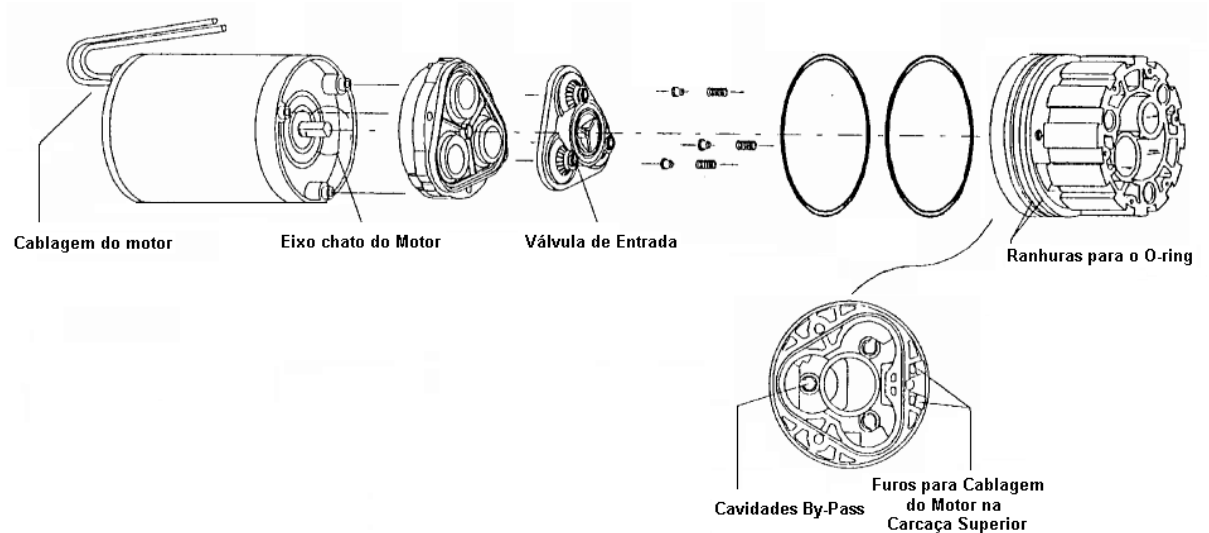


Figura 2.7 Diagrama de montagem de uma bomba de cavidade progressiva submersa [13]

A tabela 2.1 apresenta os dados característicos em relação à altura manométrica e vazão da bomba, além da potência solicitada dos painéis fotovoltaicos.

Tabela 2.1 Características de Bombas Usadas em Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico

Submersa 24 Vcc (Modelo 9300)			Superfície 12 Vcc (Modelo 8000)		
Altura Manométrica (mca)	Vazão (litros/hora)	Potência dos painéis (Wp)	Altura Manométrica (mca)	Vazão (litros/hora)	Potência dos painéis (Wp)
6	445	58	0	410	36
12	430	65	7	380	46
18	415	78	14	350	50
24	400	89	21	340	65
30	390	99	28	320	70
36	380	104	35	305	80
42	375	115	42	285	90
48	370	123	-	-	-
54	350	135	-	-	-
61	345	141	-	-	-
70	310	155	-	-	-

Fonte: [13]

Normalmente, a bomba do tipo cavidade progressiva emprega motor cc de imã permanente para seu acionamento, o qual onera o custo de manutenção devido ao desgaste das escovas e ao elevado custo para reposição de peças. No entanto, por serem alimentadas em

tensão de corrente contínua, podem ser conectadas diretamente aos painéis fotovoltaicos. Isto representa sua maior vantagem em relação às demais bombas, apesar de que em alguns casos é exigida a inserção de um controlador no sistema de bombeamento. A bomba do tipo cavidade progressiva tem muito bom desempenho hidráulico relacionados à altura manométrica, vazão e potência elétrica absorvida quando comparada com as outras na mesma faixa de potência de entrada.

2.2.3 Bomba vibratória como alternativa à bomba de cavidade progressiva

Os sistemas de bombeamento solar normalmente empregam bombas de cavidade progressiva do tipo submersa para extração de água em poços profundos até 70 m. Porém devido ao elevado custo de aquisição deste tipo de bomba, recentemente vem sendo empregada a bomba do tipo vibratória para casos em que a profundidade limite não ultrapasse 40 m de altura. Esta tecnologia surgiu como uma alternativa para baixar o custo de aquisição do sistema de bombeamento de poços.

A nova tecnologia de sistema de bombeamento emprega bomba vibratória movida por energia solar. Este sistema de bombeamento é composto por: bomba, painel e “driver”, sem a necessidade de bateria. A bomba pode operar em sistemas solares a partir de 100 Wp [13].

As bombas vibratórias necessitam de corrente alternada para seu funcionamento. No entanto, os geradores fotovoltaicos e alguns tipos de aerogeradores fornecem em sua saída eletricidade em corrente contínua, que é incompatível com o funcionamento da bomba vibratória convencional. Assim, para viabilizar a operação deste tipo de bomba com alimentação em corrente contínua proveniente de fontes alternativas de energia elétrica foi inserido um pequeno inversor denominado de “driver” entre o gerador e a bomba. O *Driver* é equipamento que controla o fornecimento de energia à bomba por meio de um micro controlador digital. A energia proveniente dos painéis FV é armazenada no Driver por meio de capacitores, e em seguida é convertida em impulsos de energia constantes e espaçados em função do nível de radiação solar [15]. A instalação é similar ao da bomba vibratória convencional e o sistema é denominado de bombeamento de deslocamento positivo por vibração. Disponíveis comercialmente, estes modelos de bomba vibratória são a inovação do sistema de bombeamento por vibração, utilizando como fonte de energia eletricidade em corrente contínua e, apesar de limitadas a operar no máximo a 40 m de altura, permitem atender a uma vasta gama de aplicações.

A potência a ser disponibilizada pelo gerador FV é em função do volume de água bombeado por dia (L/dia) e da altura manométrica (mca). Para calcular a altura manométrica total da bomba submersa do tipo vibratória, o método é similar ao da bomba de cavidade progressiva de superfície e submersível.

Os sistemas de bombeamento FV apresentam como vantagem: ausência do uso de combustível; ao longo de 10 a 15 anos pode ser economicamente viável uma vez que o bombeamento não usa combustível fóssil, tais como diesel ou gasolina; energia limpa que não emite gases causadores do efeito estufa; motor de acionamento resistente; sistema FV garantido por 20 anos; e baixo índice de manutenção.

A tabela 2.2 apresenta as características de dois modelos de bomba vibratória alimentadas em 24 Vcc fabricados no Brasil.

Tabela 2.2 Modelos de bombas vibratórias alimentadas a 24 Vcc

Características Técnicas / Modelo	P100	R100	Driver 100
Aplicação	Poços com Ø maior que 6"	Cisternas Reservatórios	Ambas
Tipo	Submersa, bombeamento por vibração		-
Dimensões (A x Ø) mm.	300 x 143	352 x 220	262x115x161
Classe de Isolação	IP - 58		IP - 65
Proteção contra choque	Classe I		Classe I
Alimentação (Vcc) - (Nominal) [máximo]	(24) - [36]		
Potencia recomendada do sistema (W)	100 a 170		
Diâmetro/ Conexão de Tubulação	3/4"		-
Temperatura máxima do líquido	C35°		-

Fonte: [13]

A figura 2.8 mostra um sistema de bombeamento implementado com bomba vibratória do tipo submersa usada em pequena altura manométrica, interligada ao painel FV mediante um driver, no papel de condicionador de potência.

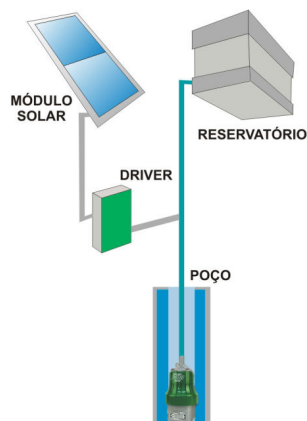


Figura 2.8 Bombeamento FV com bomba submersa do tipo vibratória [15]

Valores de vazão em função da altura e da potência de pico do gerador são mostrados na figura 2.9.

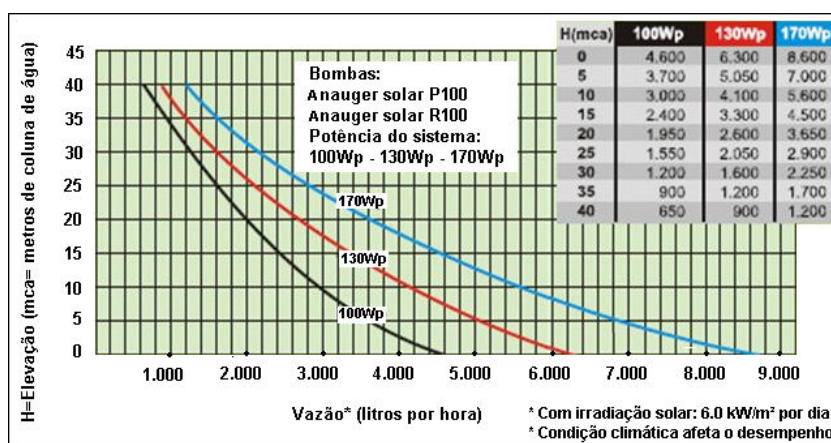


Figura 2.9 Bombas d'água Anauger Solar [15]

Como desvantagens, apresentam custo inicial de aquisição alto, especialmente para os sistemas maiores; bombeamento do volume de água é variável em função da irradiação, embora com dias nublados a necessidade de água para o cultivo seja menor; perigo de roubos das placas FV em áreas não protegidas ou não habitadas; o custo aumenta significativamente com o aumento da altura manométrica total.

2.2.4 Bomba Volumétrica Acionada por Aerogerador

As bombas de cavidade progressiva também podem implementar sistemas eólicos de bombeamento. Estas bombas podem ser acionadas por motores elétricos alimentados por um aerogerador. Neste caso, uma turbina aciona o gerador, que produz a eletricidade usada para alimentar o motor de acionamento da bomba. A figura 2.10 mostra o exemplo de um sistema de bombeamento eólico acionado por aerogerador usado para alimentar o motor elétrico de uma bomba submersa.

No caso de geradores que disponibilizam em sua saída tensões cc, a bomba pode ser a do mesmo tipo usada em sistema de bombeamento FV, uma vez que o aerogerador produz eletricidade similar a dos painéis. As bombas eólicas também podem ter sistema de interligação direta entre o aerogerador e o motor da bomba e o sistema de interligação indireta, efetuado por meio de um controlador que estabelece as melhores condições de operação do sistema de bombeamento. O controlador também cumpre a função de manter uma ou mais baterias em carga para fornecer eletricidade à bomba, quando há exigência de

bombeamento na ausência de vento, além de inibir o funcionamento da bomba uma vez que o reservatório alcance o nível máximo.

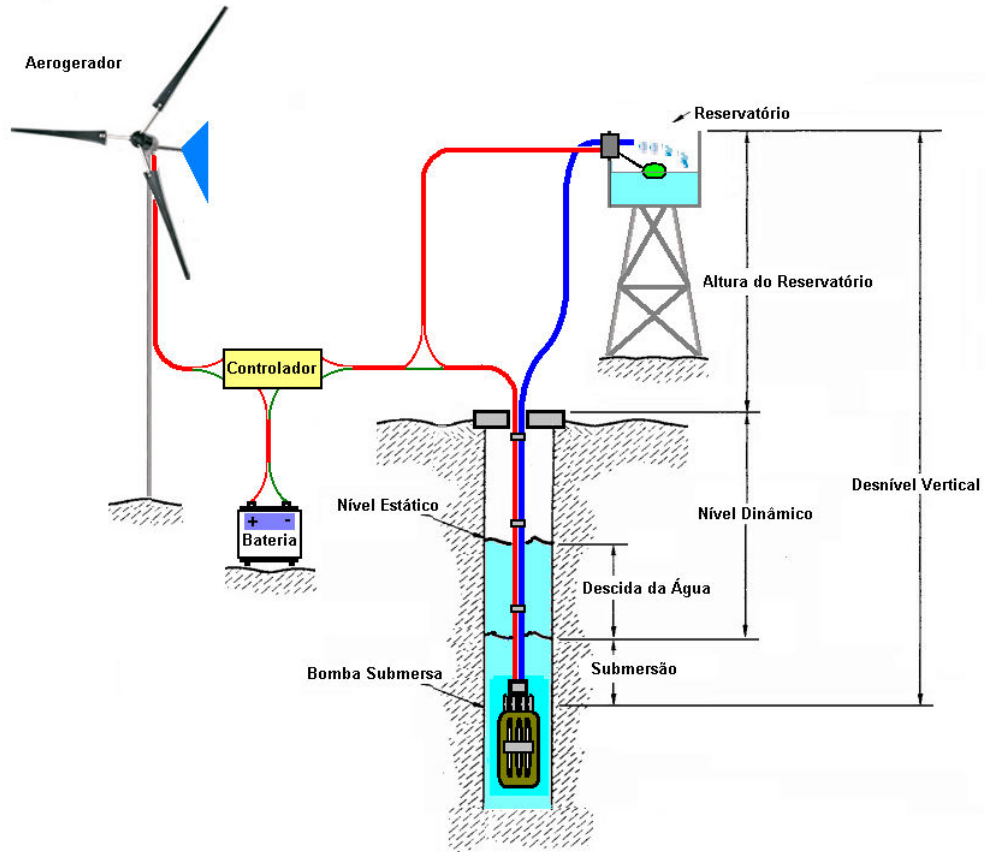


Figura 2.10 Sistema de bombeamento eólico elétrico com bomba submersa

2.3 As Bombas Hidrodinâmicas ou Cinéticas

Também chamadas de *turbo-bombas* são máquinas constituídas de uma carcaça dentro da qual gira um rotor dotado de pás, o qual é também denominado de impulsor. Uma vez recebendo energia mecânica por meio de um eixo, o impulsor gira continuamente e coloca o fluido em movimento. Uma vez que o fluido adquire movimento, o mesmo escoar em alta velocidade em direção as paredes internas da carcaça. Quando o fluido se descarrega na carcaça da bomba sua velocidade sofre uma redução e transforma a energia cinética adquirida com o movimento em energia de pressão. A redução da velocidade do fluido é provocada pelo formato da carcaça, a qual pode ser em voluta ou com difusor. É típica desta categoria de bomba a dependência operacional entre o volume de fluido conferido e a pressão. As bombas cinéticas mais comuns são: bombas centrífugas; bombas de fluxo misto; bombas axiais; bombas regenerativas e bombas de carcaça rotativa ou bombas de tubo pitot.

Um exemplo de bomba cinética é a bomba centrífuga a qual é mostrada em corte por meio das figuras 2.11 (a) e (b).

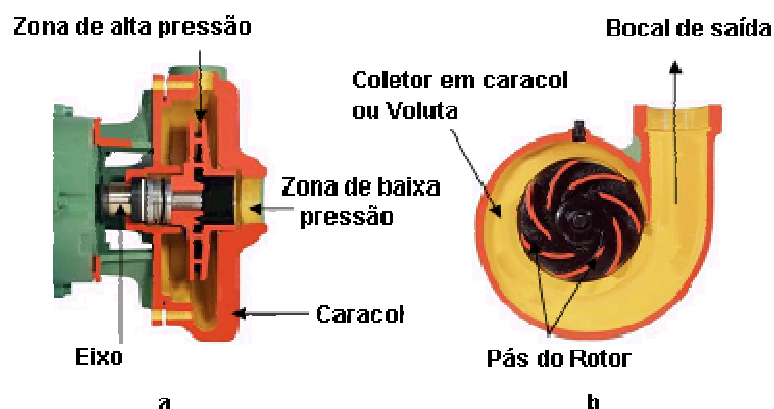


Figura 2.11 Corte de uma bomba centrífuga: (a) vista lateral do caracol e (b) vista frontal do caracol [11]

2.3.1. Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas foram concebidas muito antes de poderem ser concretizadas, pois os construtores careciam de uma fonte de energia cinética de alta velocidade de rotação [16]. Estima-se que a primeira máquina que poderia ser caracterizada como uma bomba centrífuga era uma máquina de elevação de lama citada por volta de 1475 em uma obra escrita pelo engenheiro italiano Francesco di Giorgio Martini [9][17]. Somente no início do século XIX começa-se a manufatura e a utilização de bombas centrífugas, notadamente nos Estados Unidos da América. Em 1851, na Inglaterra, o inventor John Appold introduz a curvatura das

pás do rotor. As bombas centrífugas passaram a ser comuns na Europa e nos Estados Unidos da América no final do século XIX, quando passaram a ser manufaturadas por diversos fabricantes [16].

Sendo uma turbo-máquina, a bomba centrífuga é a máquina hidráulica mais usada para bombear líquidos na irrigação agrícola, nos edifícios residenciais, no saneamento básico e na indústria em geral, recalçando, pressurizando ou transportando líquidos de um lugar para outro. Existe uma grande quantidade de modelos de bomba centrífuga e cada modelo se presta a uma aplicação específica. A partir do conhecimento da aplicação e das condições de serviço requeridas pelo sistema de bombeamento é selecionado o tipo de bomba centrífuga. Dependendo da forma do rotor a bomba centrífuga é classificada em:

- *Escoamento radial*, neste tipo a pressão desenvolvida é devido à ação da força centrífuga. A água adentra axialmente pelo centro e sai radialmente pela periferia do rotor. Normalmente bombas centrífugas de escoamento radial, são de eixo horizontal que podem ter aspiração simples no caso da água entrar por um único lado, ou aspiração dupla se a entrada se faz pelos dois lados e pode ser de estágio simples ou múltiplo.

- bombas de hélice (*escoamento axial*), nestas a origem da pressão é devida principalmente à associação ao efeito de sucção. A água entra axial e sai quase que axialmente;

- helicoidais (*escoamento misto*), para esta bomba a água entra axialmente e sai numa direção entre o radial e o axial e ainda pode ser de simples estágio e múltiplo estágio.

As bombas centrífugas de hélice e helicoidais normalmente são de eixo vertical. As bombas centrífugas podem ainda ser de superfície e submersíveis.

2.3.2 Funcionamento da Bomba Centrífuga

Uma bomba centrífuga trabalha transferindo energia cinética para o fluido e transformando-a em energia potencial, seja esta de posição ou, mais frequentemente, de pressão no bocal de descarga da bomba. Esta ação é realizada empregando os conceitos do Princípio de Bernoulli. Uma bomba centrífuga emprega um rotor que gira e normalmente tem palhetas curvadas para trás, como mostra a figura 2.11 (b).

Acionada mecanicamente por um eixo rotativo, a rotação do rotor da bomba transfere energia para o fluido através das palhetas do rotor. O fluido presente na sucção entra no olho do rotor - uma cavidade de diâmetro menor, interna - a partir de onde escoar em direção ao diâmetro externo pelos canais formados entre as palhetas do rotor.

O fluido deixa o rotor com considerável velocidade absoluta (a parcela de energia cinética) que deve ser convertida em energia potencial de pressão. Isto é realizado nas partes não rotativas. A forma mais frequente de recuperação de energia nas partes não rotativas é uma carcaça com formato encaracolado, dito voluta, que termina em um bocal de recalque.

Uma outra forma usual de dispositivo recuperador de energia é uma série de palhetas estáticas, chamada de difusores. O difusor com palhetas pode ser seguido de um canal de retorno - dirigindo o fluido a outro rotor - ou a um coletor espiral, muito semelhante a uma voluta. A energia transferida pela bomba centrífuga ao fluido é função do diâmetro do rotor, da rotação de acionamento e do projeto do rotor. Se a descarga requer uma energia ainda mais alta que a fornecida pela bomba ao fluido, não há escoamento: o fluido é somente pressurizado [17].

2.3.3 Características Operacionais das Bombas Centrífugas

As características operacionais importantes de uma bomba centrífuga são a vazão Q , a altura h , a potência de entrada P_m , a eficiência η_p , a velocidade rotacional n , e o diâmetro d do rotor ou *impulsor* giratório que realmente move o líquido que está sendo bombeado. As relações entre estas variáveis normalmente são expressas graficamente. Definindo um parâmetro chamado de *velocidade específica* n_s que é o mesmo para todas as bombas geometricamente semelhantes, de modo que a quantidade de possíveis gráficos é reduzida [18], [19]. Conforme [2], a expressão da velocidade específica é dada por:

$$n_s = 51,64 n Q^{0,5} h^{-0,75} \quad (2)$$

Em que a velocidade específica pode ser expressa em qualquer conjunto de unidades coerentes, onde:

- n_s é a velocidade específica [rpm];
- n é a velocidade rotacional em [rpm];
- Q é a vazão em [m³/s];
- h é a altura manométrica total em [m].

A velocidade específica não é planejada para ser um valor preciso, assim é sempre arredondada para não mais do que dois dígitos significantes. É calculada na melhor eficiência ou ponto de máxima da operação da bomba. Isto é, quando é desejado calcular a velocidade específica das curvas de desempenho, são usadas a vazão e valores de altura para o ponto de máxima eficiência. A figura 2.12 mostra a relação entre eficiência e a velocidade específica

para cada valor de vazão para a bomba centrífuga empregada no sistema eólico de bombeamento avaliado nesta dissertação.

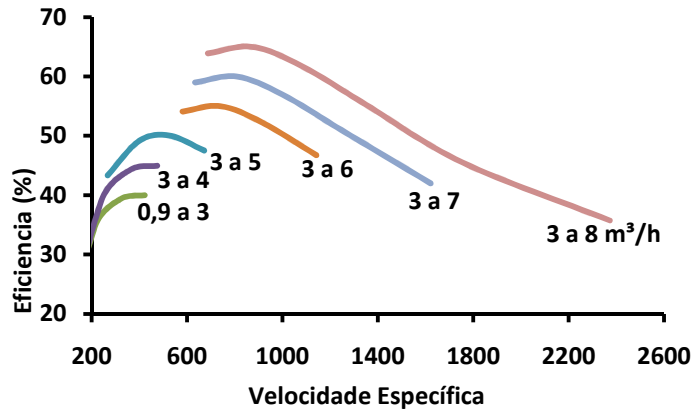


Figura 2.12 Eficiência versus velocidade específica da bomba centrífuga

A eficiência diminuirá com a mudança de condição operacional e das condições ótimas para qual a bomba foi projetada. As bombas de baixa vazão da mesma qualidade de projeto também terão eficiências máximas mais baixas. As características de uma bomba em velocidade constante são normalmente dadas como curvas de altura h , eficiência η , e a potência de entrada P_m versus a vazão Q , como mostra a figura 2.13.

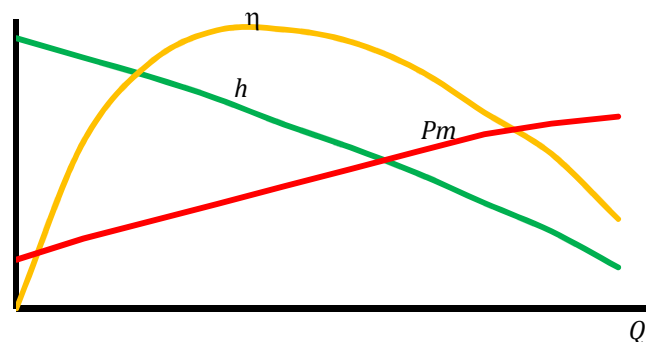


Figura 2.13 Altura, eficiência, e potência motora em função da vazão

Nota-se que a altura possui valor máximo para taxa de vazão a zero. A altura então diminui com vazão crescente até que alcance zero na vazão máxima. O ideal é pensar com relação à altura de como a elevação da coluna d'água deve ser erguida pela ação da bomba para realmente haver vazão. Como esta altura fica maior, a quantia da água que a bomba pode realmente elevar contra esta ação da altura ficará pequena, finalmente alcançando zero na máxima altura. Nesta altura, o rotor da bomba irá impactar contra a água, mas nenhuma água

realmente flui para fora da bomba. Ao invés, a água está fluindo em torno do rotor onde não se ajusta firmemente na carcaça da bomba. A energia produzida e, conseqüentemente, a eficiência são zero neste momento desde que a vazão seja zero. Toda a potência de entrada da bomba está sendo convertida em calor já que nenhum trabalho útil está sendo feito.

O calor pode ferver a água e arruinar a bomba. Uma vez que a altura vista pela bomba vai diminuindo, cada vez mais a água fluirá, até alcançar uma vazão máxima à altura nula. A eficiência, que é proporcional ao produto da altura pela vazão, vai para o máximo e diminuir para zero no ponto de altura nula. A potência de entrada está, agora, sendo usada para superar as perdas do bombeamento, que em última instância, aparece como um aumento de temperatura da água que flui para fora da bomba [2].

A curva real da potência de entrada P_m versus a vazão variará com a velocidade específica da bomba. Em velocidades específicas baixas, P_m aumentará com a vazão. A potência máxima pode continuar a aumentar em torno do ponto da eficiência máxima até que o ponto da máxima vazão seja alcançado, como mostrado na figura 2.12. Em certo valor de velocidade específica, a potência de entrada da bomba se torna quase constante, independente da vazão. Em velocidades específicas maiores, a potência mecânica da bomba pode realmente indicar um decremento com vazão crescente [2].

2.3.4 A Bomba Centrífuga Operando em Velocidade Variável

No caso da bomba operar em alguma outra velocidade, uma nova curva da altura versus vazão deveria ser conseguida. A figura 2.14 mostra as curvas para operação em velocidade variável.

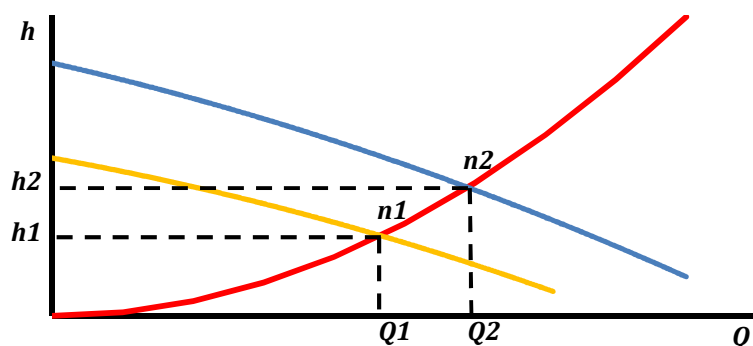


Figura 2.14 Curvas da altura versus vazão para duas velocidades diferentes (n_1 , n_2)

Os pontos equivalentes para as duas curvas são obtidos das relações seguintes, conforme [2]

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{n_2^2}{n_1^2} \quad (4)$$

Se a eficiência permanece a mesma nos pontos equivalentes, a variação da potência mecânica de entrada é dada por:

$$\frac{P_{m2}}{P_{m1}} = \frac{n_2^3}{n_1^3} \quad (5)$$

À medida que aumentam as velocidades rotacionais ou o tamanho da bomba, um efeito dinâmico chamado de cavitação fica evidente e exige que a bomba seja abaixada com relação ao nível da água. Este efeito se refere à formação de cavidades cheias de vapor, e subsequente colapso na água ou outro líquido bombeado. Quando a pressão local em certo ponto no lado de sucção de uma pá do rotor cai abaixo da pressão de vapor, uma bolha de vapor é formada. Como a bolha atravessa o fluxo da bomba, encontrará uma região onde a pressão local é maior que a pressão de vapor, na qual às vezes estourará.

Quando ocorre a cavitação, são ouvidos ruídos e vibrações características e, quanto maior for à bomba, maiores serão estes efeitos. Além de provocar o desgaste progressivo até a deformação irreversível dos rotores e das paredes internas da bomba, simultaneamente esta apresentará uma progressiva queda de rendimento, caso o problema não seja corrigido. Nas bombas a cavitação geralmente ocorre por altura inadequada da sucção (problema geométrico), por velocidades de escoamento excessivas (problema hidráulico) ou por escorvamento incorreto (problema operacional) [20].

Uma maneira de eliminar o efeito da cavitação é baixar mais a bomba com relação ao nível da água, e assim aumentar a pressão no lado de sucção da bomba. Pode ser necessário para uma dada bomba que esta seja montada abaixo do nível da água para prevenir cavitação.

2.3.5 Bomba Centrífuga Acionada Pela Rede Elétrica

Bombas centrífugas, quando devidamente instaladas e submetidas a um programa mínimo de manutenção periódica, operam com o mínimo de supervisão e correspondem com um prolongado período de funcionamento satisfatório. As bombas centrífugas são empregadas para os mais variados tipos de serviço, assim são fabricadas em uma grande variedade de projetos específicos para cada serviço a que se destina. O sistema de bombeamento elétrico implementado com bomba centrífuga exige alguns cuidados na instalação, operação e manutenção.

Normalmente, o projeto do sistema de bombeamento é definido em função dos requisitos do processo e das condições consideradas ideais para determinado emprego, referente aos cuidados necessários à instalação da bomba. Um dos principais cuidados na instalação do conjunto motor-bomba é com relação a sua localização, a qual deve estar o mais próximo do reservatório de sucção, de modo que a tubulação de sucção seja a mais curta e direta, com o mínimo de conexões, para minimizar as perdas de carga. A bomba e motor devem ser protegidos do risco de inundação e, na medida do possível, instalados em lugar seco, arejado, limpo e com boa iluminação.

Um exemplo de sistema típico de bombeamento que emprega bomba centrífuga é mostrado pela figura 2.15.

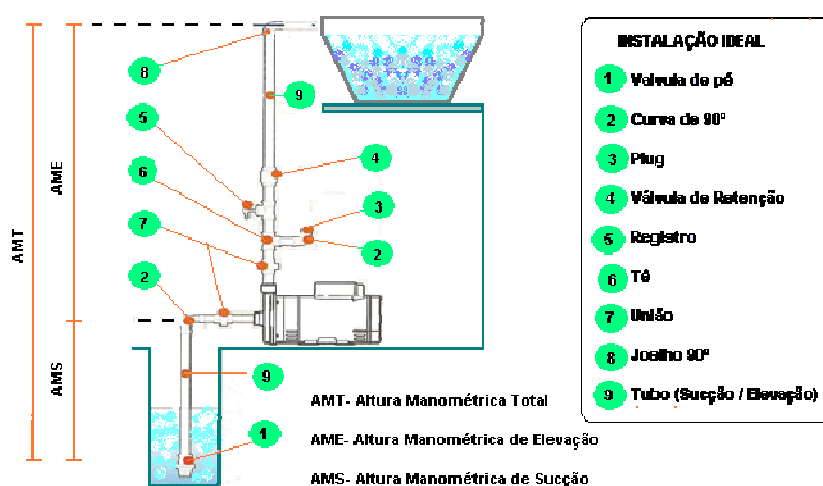


Figura 2.15 Sistema de bombeamento usando uma bomba centrífuga, adaptado de [21]

A instalação é constituída por uma bomba centrífuga e diversos acessórios, necessários ao bom desempenho de funcionamento da bomba e para a performance global do sistema hidráulico de bombeamento.

Para que a operação da bomba ocorra dentro de parâmetros nominais, é preciso satisfazer certas condições tanto da instalação hidráulica quanto das características do líquido a ser bombeado. Tratando-se da instalação, é necessário respeitar limites como altura manométrica mínima e máxima diâmetro dos tubos e conexões; quanto às características do líquido, deve-se verificar a densidade, abrasividade, temperatura e viscosidade. Outro limite que deve ser respeitado é a pressão de vapor do líquido NPSH “Net Positive Suction Head”.

No decorrer do bombeamento da água, qualquer que seja o ponto da tubulação de sucção a pressão jamais deve alcançar o valor da pressão de vapor da água a certa temperatura. Desde que a pressão na entrada do impulsor da bomba apresenta o ponto com menor pressão da tubulação, alguns cuidados devem ser tomados, para evitar que esta pressão seja menor que a pressão de vaporização da água. Ao valor mínimo de pressão a ser garantido na entrada do impulsor da bomba foi denominado de NPSH.

Caso a pressão na entrada do impulsor da bomba alcançar um valor menor que a pressão de vapor da água, ocorre a vaporização desta donde surge um efeito denominado de cavitação. A cavitação por sua vez causa a modificação das curvas características de operação comprometendo o rendimento e desgaste prematuro do impulsor devido à remoção de partículas. O efeito da cavitação é percebido por causa do elevado nível de ruído e vibrações durante o funcionamento da bomba [2].

Afastar-se dos valores estabelecidos para cada modelo conduz a bomba e os tubos ao mau funcionamento, indo desde o elevado consumo até danos eletromecânicos na bomba e redução da vida útil.

2.3.6 Bomba Centrífuga Acionada por Aerogerador

Dos tipos de bombas apresentados, a bomba do tipo centrífuga é uma das mais aplicadas em sistemas de bombeamento, quer sejam grandes ou pequenos. As bombas centrífugas possuem amplo espectro de aplicação e atendem a mais variadas necessidades de bombeamento. Sendo uma turbo-bomba, uma bomba centrífuga pode ser pensada como uma turbina que opera ao contrário. Deste modo a energia de entrada é proporcional ao cubo da velocidade do fluido que atravessa a bomba, que é proporcional à velocidade rotacional da bomba. Portanto, a bomba centrífuga constitui uma boa carga para uma turbina eólica, pelo menos se esta funcionar próximo ao ponto ótimo de operação da bomba [2].

A operação normal de um sistema de bombeamento eólico é operar em velocidade variável para um dado rotor com uma altura fixa, em lugar de uma operação em velocidade

fixa para vários rotores diferentes e em diferentes alturas. Para determinada altura fixa não existirá nenhum fluxo até que o rotor da bomba atinja a velocidade necessária para tal. Com os aumentos de velocidade adicional, o ponto operacional da bomba se desloca devido ao crescimento do valor da altura. A taxa de fluxo alcança valor correspondente para determinada eficiência. Aumentando a rotação, a taxa de fluxo cresce e a eficiência também. No entanto, a eficiência começa a diminuir rapidamente em velocidades muito maiores, ainda que a taxa de fluxo continue a crescer. Isto ocorre devido aos aumentos de energia mecânica de entrada da bomba ao longo da linha de altura constante.

Diante do exposto, percebe-se a importância de um projeto cuidadoso do sistema de bombeamento eólico. Não se deve usar uma bomba com característica específica que não atenda a determinada altura, devido às velocidades rotacionais altas exigidas e também devido às perdas que seriam experimentadas em velocidades de vento abaixo da velocidade de interrupção da vazão. Com relação à velocidade específica, é desejável escolher uma bomba para qualquer aplicação de acionamento eólico que tenha uma velocidade específica grande suficiente para se obter uma boa eficiência.

Também não se deve usar uma bomba em alturas abaixo do especificado pelo fabricante, pois esta operaria em uma região de eficiência mais baixa em tais alturas. Se for bombear um poço que pode entregar apenas um determinado valor máximo de vazão, a certa altura, considerando uma turbina que forneça potência em excesso a bomba seca o poço e arruína a bomba.

Um bom projeto, então, exige informações do local específicas sobre a altura, a taxa de fluxo e capacidade da fonte, curvas características detalhadas de uma família de bombas, e a potência versus curvas de velocidade da turbina eólica. Os resultados satisfatórios serão obtidos apenas quando todos os componentes de sistema estiverem cuidadosamente combinados [2].

Quando um sistema de bombeamento eólico de pequeno porte é implementado com bomba centrífuga, normalmente, esta é acionada por motor elétrico do tipo indução. Assim, o aerogerador que deve ser usado deve fornecer em sua saída uma tensão elétrica em corrente alternada para alimentar o motor de acionamento da bomba. Um exemplo de sistema de bombeamento eólico que emprega uma bomba do tipo centrífuga acionada por motor elétrico alimentado por aerogerador é apresentado na figura 2.16.

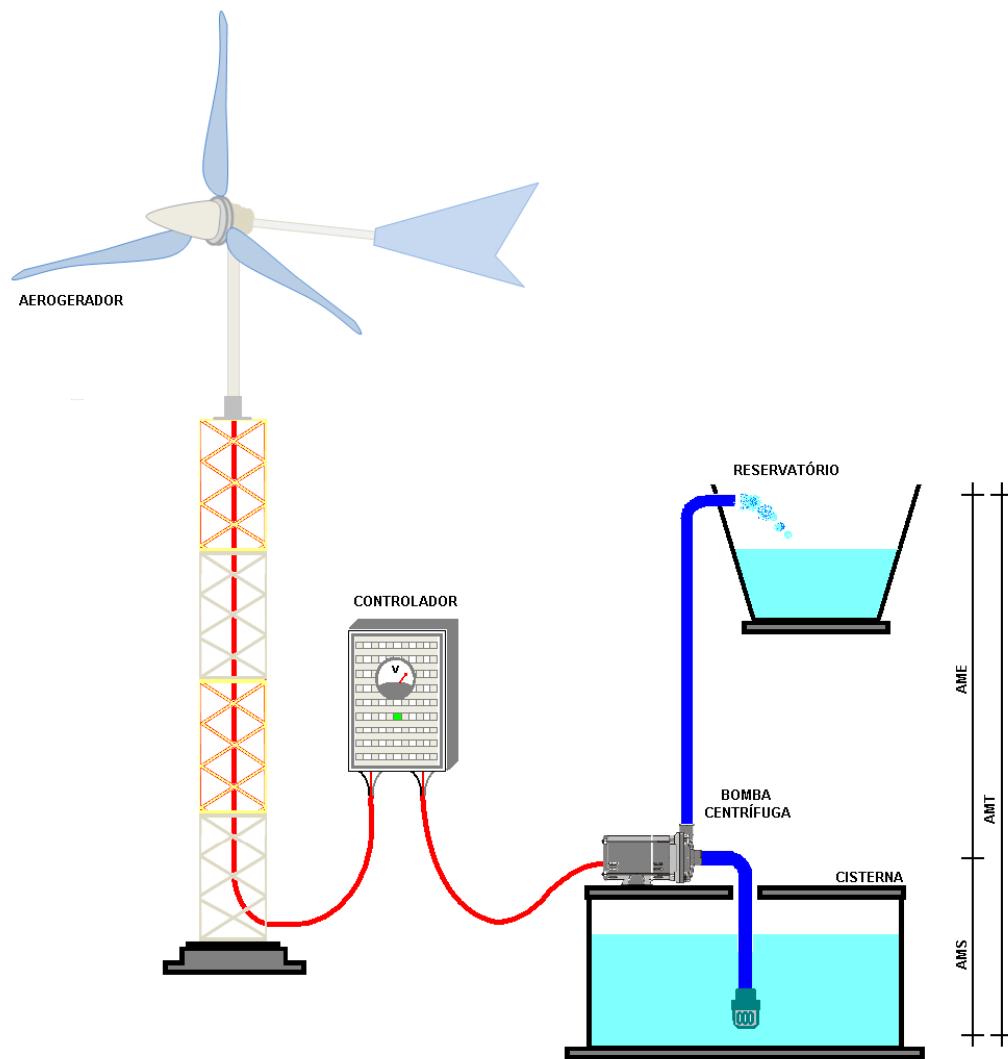


Figura 2.16 Bombeamento eólico implementado com bomba centrífuga de superfície

Neste sistema, a bomba é acionada por motor de indução alimentado por um aerogerador que disponibiliza em sua saída tensão em corrente alternada. A bomba utilizada é do tipo centrífuga e recalca a água contida numa cisterna até um reservatório superior, sempre que a turbina do aerogerador receba vento em velocidade adequada.

A interligação elétrica entre aerogerador e motor de acionamento da bomba pode ser efetuada direta ou indiretamente. Apesar da possibilidade de fazê-la diretamente, é adequado realizá-la por intermédio de um controlador o qual assume a função de estabelecer a melhor condição para acionamento da bomba em termos de velocidade do vento que chega até a turbina do aerogerador. O controlador permite a aceleração da turbina em baixas velocidades de vento, de modo que a tensão de saída do aerogerador seja próxima à tensão nominal do motor de forma que este receba potência suficiente para acionar a bomba. Isto melhora

bastante o rendimento global do sistema de bombeamento, uma vez que a vazão de uma bomba centrífuga é bastante sensível à rotação do impulsor.

O emprego da energia eólica por meio de aerogeradores de eletricidade usados para alimentar motores acionadores de bombas comporta numerosas vantagens face às energias tradicionais e mesmo em comparação com outros tipos de energias renováveis, uma vez que já se encontra em avançado estágio de desenvolvimento. O uso da energia eólica apresenta as seguintes vantagens:

- É inesgotável, não precisa de combustível;
- Não emite gases poluentes nem gera resíduo, é baseada no uso de energia limpa;
- Os bombeamentos eólicos são compatíveis com outros usos e utilizações do terreno como a agricultura e a criação de gado.

No entanto o sistema de bombeamento eólico apresenta algumas desvantagens:

- O volume de água bombeado é muito variável em função da intermitência do vento;
- Em torno dos sistemas eólicos de bombeamento é detectada poluição sonora, devido ao ruído promovido pela turbina;
- Provoca a alteração da paisagem, do ponto de vista estético;
- Custo inicial um pouco alto, especialmente para os sistemas maiores;

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DA PLANTA DO SISTEMA EÓLICO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

No desenvolvimento do Capítulo 2, discutiu-se a respeito de vários tipos de bombas e sistemas de bombeamento. No entanto, é objeto desta dissertação apresentar resultados da avaliação realizada no sistema de bombeamento proposto. Tal sistema é implementado com bomba centrífuga acionada por motor elétrico e alimentado com eletricidade advinda a partir da energia eólica. O motivo para escolha deste sistema de bombeamento eólico implementado a bomba centrífuga é devido a possibilidade de adaptação desta tecnologia de bombeamento eólico às características do semi-árido brasileiro, o qual dispõe de inúmeros poços e apresenta um elevado potencial eólico, uma vez que ocorrem velocidades de vento que alcançam mais de 8,5 m/s desde o interior e se estendendo por boa parte do litoral. Outro fator é o critério de viabilidade técnica e econômica do sistema eólico de bombeamento, já que se trata de um sistema de pequeno porte e isolado, assume-se que velocidade média de 3,5m/s a 4,5m/s é aceitável para atender tais critérios.

3.1 Descrição Geral da Planta

O projeto do sistema eólico de bombeamento de água foi desenvolvido no Laboratório de Energias Alternativas (LEA), situado no Campus do Pici. A planta do sistema foi instalada na Estação de Engenharia de Pesca. A Estação de Engenharia de Pesca está situada a Av. Andrade Furtado, 412-584 – Pici na Universidade Federal do Ceará em Fortaleza-CE / Brasil, em espaço cedido pelo Departamento de Engenharia de Pesca do Centro de Ciências Agrárias da UFC. A planta do sistema está localizada a jusante do Açude da Escola de Agronomia e geograficamente a $-3,739863^{\circ}$ SUL de latitude e $-38,5741^{\circ}$ OESTE de longitude

O projeto foi executado em laboratório de campo, com o objetivo de avaliar o funcionamento e verificar o rendimento do sistema eólico de bombeamento de água proposto. Os equipamentos que implementam a planta foram adquiridos com recurso financeiro do CNPq.

3.1.2 Descrição Resumida da Planta

A planta da unidade de bombeamento eólico é constituída por três principais sistemas, a saber: sistema elétrico, sistema hidráulico e o sistema de aquisição de dados. O esquema

geral da planta é apresentado por meio da figura 3.1, que tem por objetivo apresentar resumidamente cada um dos sistemas que compõem a planta.

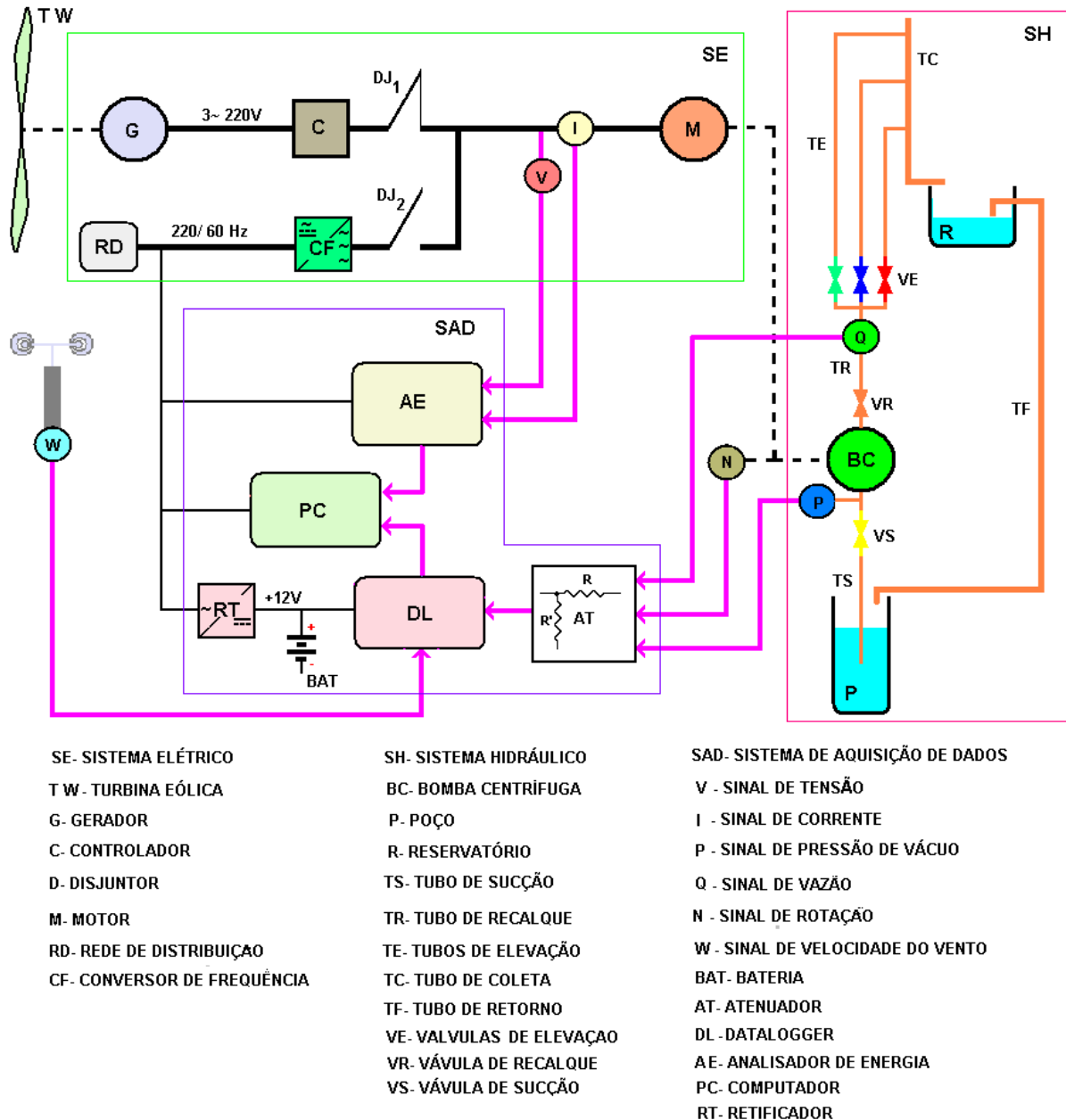


Figura 3.1 Esquema geral da planta do sistema de bombeamento eólico

O sistema elétrico (SE) tem a função de fornecer energia elétrica para planta. O sistema elétrico é formado pela rede monofásica de distribuição e pelo gerador trifásico de eletricidade acionado pela turbina eólica. Cabe à rede de distribuição alimentar o sistema de aquisição de dados em regime permanente, sendo que é possível eventualmente alimentar o motor de acionamento da bomba mediante o conversor de frequência. Ao aerogerador, cabe a energização do motor da bomba centrífuga através do controlador, quando em presença de

vento com velocidade adequada sobre a turbina de acionamento do mesmo. A configuração elétrica da planta é estipulada por meio dos disjuntores, os quais mediante manobra estabelecem a alimentação do motor via aerogerador ou rede de distribuição.

O sistema hidráulico (SH) de bombeamento de água é constituído pelo poço, uma bomba centrífuga, tubulação e o reservatório, elevado. A tubulação é formada por tubos de sucção, recalque, elevação e retorno. Os tubos de elevação dispõem de válvulas que promovem o controle de vazão e a alteração da altura manométrica do sistema hidráulico. O poço é o componente do sistema hidráulico fornecedor de água, a bomba por sua vez suga a água do poço e recalca através da tubulação até o reservatório superior. Assim a energia eólica captada pelo sistema de aerogeração de eletricidade é armazenada no reservatório elevado na forma de energia hidráulica potencial, de modo que se pode dispensar o uso de baterias.

Como referido e salientado no esquema geral, há ainda o sistema de aquisição de dados (SAD) que é constituído por sensores, *datalogger*, analisador de energia e computador. O *datalogger* é o elemento responsável pela coleta e registro de variáveis não-elétricas do sistema, tais como velocidade do vento, rotação do impulsor da bomba, pressão de vácuo na entrada da bomba e vazão do sistema de bombeamento. O analisador de energia tem por objetivo coletar e registrar as variáveis elétricas relacionadas ao sistema elétrico tais como tensão, corrente, potência, etc. As variáveis que participam do desdobramento do processo de conversão da energia eólica em energia hidráulica são detectadas mediante vários sensores instalados em pontos estratégicos da planta como mostrado no esquema geral. Os sensores são necessários ao estudo do comportamento da planta, pois eles detectam as variáveis e transmitem seus dados por meio de sinais para o *datalogger* e o analisador de energia. Os sinais são armazenados na forma de dados digitais. Os dados digitalizados relativos às variáveis são transferidos para o computador através de programas específicos, para serem armazenados, tratados e analisados.

Os elementos que constituem os sistemas da planta foram distribuídos em pontos estratégicos da mesma, de modo a facilitar a interligação entre estes.

Externamente a planta é constituída pelo aerogerador, a torre, reservatório elevado, o cubículo e o poço.

O aerogerador é formado por um captor eólico de três pás, um alternador (gerador de ímãs permanentes), um leme direcionador e cabeça rotativa. O aerogerador dispõe ainda de dois acessórios, o tubo e uma base de secção triangular. O tubo interliga a cabeça rotativa solidária ao corpo do aerogerador com a base, a qual é aparafusada no topo da torre.

A torre é de tipo estaiada com mastro formado por módulos de dois metros de comprimento, subdivididos em seção triangular equilátera, que são compostas por barras (perfis estruturais) com ligações parafusadas. A estabilidade da torre é garantida por estais constituídos por cordoalhas de aço fixados ao longo da extensão do mastro da estrutura em dois níveis, à altura de 6 e 10 metros e à três fundações laterais de ancoragem, distantes espacialmente de 120 graus angular. A função da torre é suportar o aerogerador e o anemômetro, os quais estão instalados no vão livre, no topo da mesma. Aproveitou-se também o interior da torre, no vão livre entre as cordoalhas, para fixar parte da tubulação do sistema hidráulico.

O reservatório elevado faz parte do sistema hidráulico e tem por função armazenar a água do poço que foi aspirada e recalçada pela bomba. A água chega até o reservatório por meio do tubo de coleta advindo da torre, que por sua vez recebeu dos tubos de elevação. O reservatório elevado é confeccionado em fibra de vidro, possui formato de tronco de cone, tem capacidade para armazenar 1000 litros e encontra-se instalado na parte superior do cubículo.

A figura 3.2 mostra a vista panorâmica da planta da unidade experimental.



Figura 3.2 Vista panorâmica da planta do sistema de bombeamento eólico

O cubículo é construído em alvenaria, possui dimensões 2,19 metros de comprimento por 1,66 metros de largura com pé direito de 2,20 metros. Tem por fim acomodar e proteger das intempéries do tempo os equipamentos dos sistemas elétrico, hidráulico e de aquisição de dados. O cubículo possui duas janelas de 0,7 por 0,6 metros, destinadas ao arejamento interno do mesmo. Dispõe ainda de duas bases: uma elevada a 0,4 metros do nível do piso em formato “L” para acomodação da bomba, e outra constituída por uma laje pré-moldada a 3,20 metros do nível do piso para assentamento do reservatório elevado. Do cubículo ainda saem cabos elétricos e tubos de PVC em direção a torre. Estes cabos e tubos estão suspensos mecanicamente por meio de uma estrutura denominada de suspensão, que tem por finalidade manter erguida parte da tubulação hidráulica e servir de bandeja para os cabos elétrico do aerogerador e de sinal do anemômetro. A suspensão é formada por: uma cordoalha de aço, fita metálica perfurada e barras espaçadas confeccionadas em madeira, conforme modelo apresentado ao lado esquerdo da figura 3.3.



Figura 3.3 Suspensão dos tubos e cabos

A cordoalha possui uma das extremidades fixada a 3 metros de altura, em relação ao nível do piso da parede anterior do cubículo e a outra, presa a uma barra horizontal da torre. As fitas metálicas estão apoiadas em pontos distintos sobre cordoalha e alçam as barras de madeira dispostas perpendicularmente aos tubos.

O poço possui formato cilíndrico e situa-se na parte posterior do cubículo, ele é a fonte de água de abastecimento da planta. O poço é revestido por paredes confeccionadas em anéis de concreto pré-formados, conforme mostrado na figura 3.4 (a), (b) e (c).

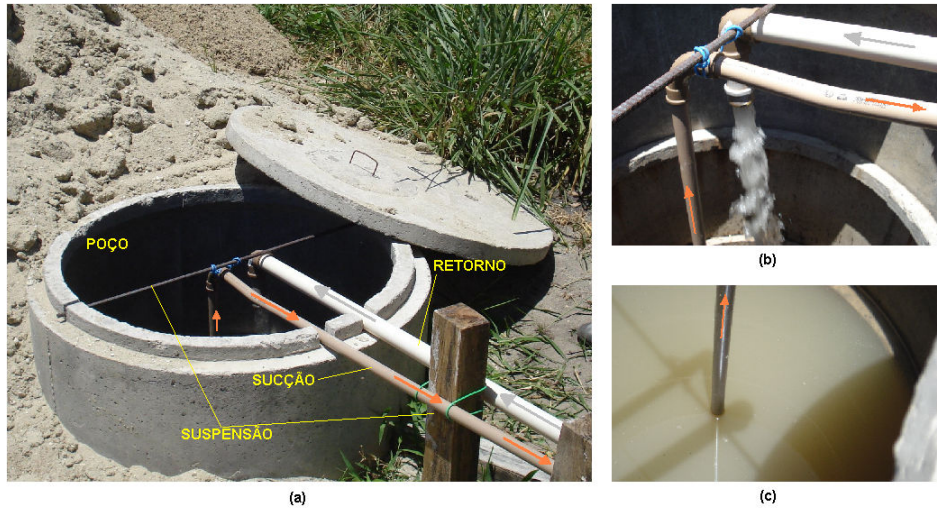


Figura 3.4 Poço alimentador de água da planta

No interior do cubículo estão alojados os painéis que acomodam os equipamentos e dispositivos que constituem o sistema elétrico, o sistema de aquisição de dados além da bomba e tubulação. A figura 3.5 apresenta parte da instalação elétrica e painéis fixados na parede posterior do cubículo.

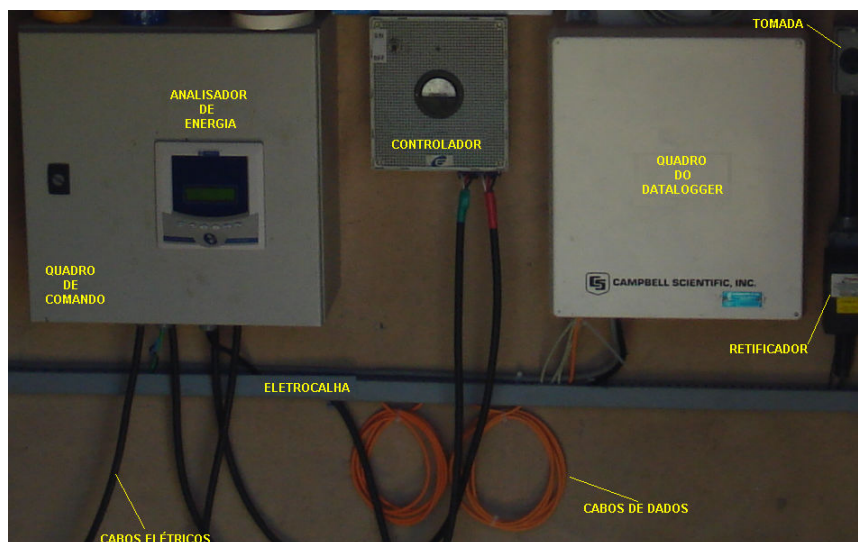


Figura 3.5 Painéis da planta e fiação elétrica

Como se pode verificar na figura 3.5, à esquerda no canto superior é mostrado o painel de comando, no interior do mesmo estão alojados os disjuntores, o conversor de frequência e em sua porta encontra-se fixado o analisador de energia. No canto superior à direita é mostrado o painel no qual estão alojados no seu interior os dispositivos do sistema de aquisição de dados das variáveis não-elétricas, tais como: *datalogger*, bateria e atenuador de

sinais de tensão. Também no canto superior à direita são mostradas as tomadas de força com saída em 220 Volts, utilizadas para alimentação do computador e do retificador, para alimentar o *datalogger* e manter a bateria em flutuação. Entre os dois painéis citados encontra-se o controlador de acoplamento entre gerador e motor de acionamento da bomba. Este dispõe de um voltímetro que indica o valor da tensão de saída do gerador. Logo abaixo dos painéis, é possível ver a calha que porta a fiação elétrica da planta e os cabos de interligação entre os painéis do controlador e de comando que fazem a ligação entre gerador ou conversor de frequência com o motor de acionamento da bomba.

Ainda no cubículo, é mostrada por meio das figuras 3.6 (a), (b) e (c), parte interna da tubulação do sistema hidráulico. A figura 3.6 (a) apresenta a bomba conectada aos tubos de sucção e recalque. O tubo de sucção está conectado à entrada da bomba e é dotado de uma tomada para acoplamento do transmissor de pressão de vácuo, ao passo que o tubo de recalque está ligado na saída da bomba.

Ao tubo de recalque estão associados outros dispositivos tais como: tubo de escorva, válvula de recalque, medidor de vazão e o nó de distribuição da saída dos tubos de elevação os quais são mostrados através da figura 3.6 (a) e (c). O nó de distribuição é o ponto de encontro entre o extremo do tubo de recalque advindo do medidor de vazão e as válvulas de cada tubo de elevação.

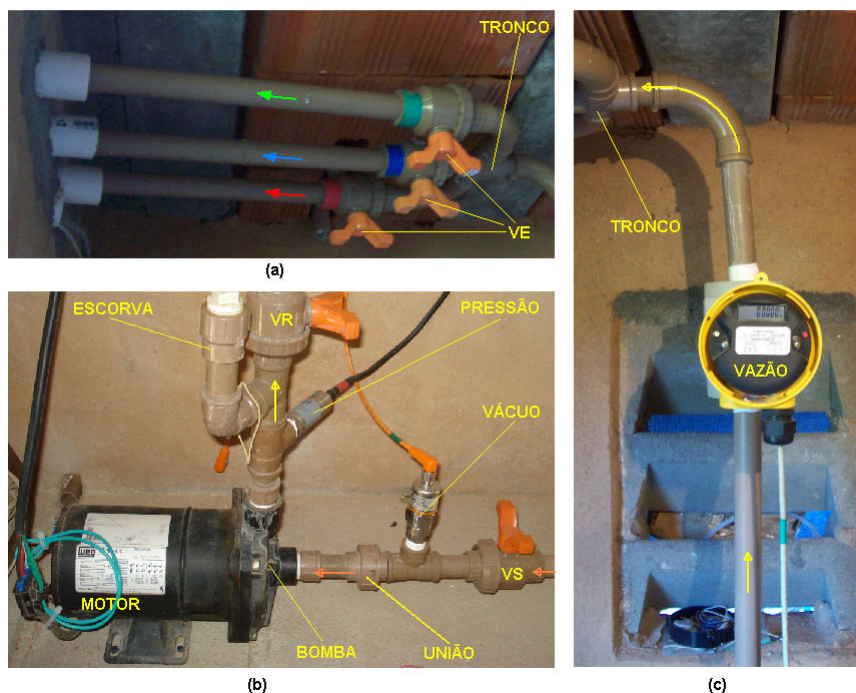


Figura 3.6 Detalhes da tubulação residente no interior do cubículo

3.1.3 Princípio de Funcionamento do Sistema Eólico de Bombeamento de Água

O sistema de bombeamento proposto pelo fabricante [22] é denominado de GRB246 e é baseado no aerogerador GRW 246. Este sistema experimental de bombeamento eólico de água é implementado a bomba centrífuga, a qual é acionada pelo aerogerador. A topologia eólio-elétrica e hidráulica do sistema é representada da figura 3.7.

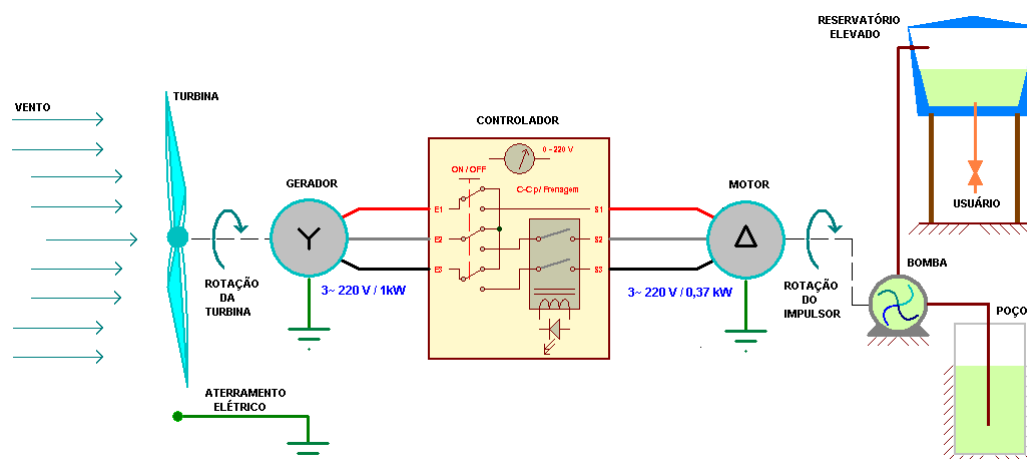


Figura 3.7 Sistema de aerogeração para bombeamento de água

Por ocasião da ocorrência de vento hipoteticamente sem turbulência, em velocidade adequada entre 3,5 e 12 m/s e que se desloque linearmente, e atue sobre a turbina do aerogerador, esta coleta a energia eólica. A turbina por sua vez, através de suas pás transforma energia eólica recebida na forma de deslocamento linear do vento, em energia mecânica na forma de movimento giratório. As pás estão presas a uma das extremidades do eixo da turbina e na outra extremidade do eixo da turbina está acoplada ao gerador. Uma vez que a turbina adquira movimento giratório, tal movimento é transmitido ao gerador. No entanto, o gerador recebe a energia mecânica da turbina na forma de movimento giratório e converte-a em energia elétrica.

A eletricidade produzida pelo aerogerador, a partir do vento que chega até a turbina eólica, é em corrente alternada do tipo trifásica e pode alcançar até 220 Volts a uma frequência de 60 Hz. Operando desta forma, o aerogerador produzirá eletricidade similar a da rede de distribuição, que poderá ser usada para alimentar motores elétricos de indução trifásicos. A rotação do motor dependerá da rotação do gerador e da carga acoplada a seu eixo. Os motores de indução podem ser empregados para acionar cargas que não solicitam velocidade constante, caso das bombas hidráulicas.

Como discutido no capítulo 2, a bomba hidráulica do tipo centrífuga é sensível a variação de rotação e responde melhor em termos de vazão para rotações próximas a nominal. Assim quando o gerador estiver fornecendo tensão com frequência próxima a nominal 220 V e 60 Hz, o rendimento da bomba é melhor, uma vez que em baixa rotação as bombas centrífugas são prejudicadas tanto em altura manométrica, quanto em vazão. Apesar da desvantagem técnica apresentada pelas bombas centrífugas, o emprego deste tipo de bomba é justificado pelo baixo preço de aquisição e manutenção, além do fato de que na sua maioria são bombas de tecnologia dominada há muitos anos e fáceis de encontrar no mercado.

Conforme mostrado na topologia apresentada pela figura 3.7, o sistema dispõe de um controlador que intercala o aerogerador com o motor de indução de acionamento da bomba. O controlador é usado para gerenciar a transferência de energia elétrica produzida pelo aerogerador ao conjunto motor-bomba, de modo que o acoplamento entre gerador e o motor ocorra numa condição adequada de operação. O controlador mede a frequência da tensão de saída do gerador, a qual guarda dependência direta com a rotação da turbina que por sua vez depende da velocidade do vento. Deste modo, o controlador estabelece uma faixa de frequências em que deve ocorrer o acoplamento elétrico entre gerador e motor.

Estabelecido o acoplamento elétrico entre gerador e motor, dá-se início ao acionamento da bomba, que é o elemento de propulsão da água. A bomba opera fornecendo energia cinética à água de modo que esta é sugada do poço e em seguida recalçada na saída através do circuito hidráulico até o reservatório elevado. A quantidade de energia que a bomba fornece à água depende da rotação do seu impulsor, que é diretamente proporcional à velocidade de rotação da turbina eólica. Assim quanto maior a velocidade do vento, maior será a vazão da bomba para uma determinada altura manométrica e melhor será o rendimento do sistema de bombeamento.

Vale salientar que sendo a planta de caráter laboratorial, busca-se estudar o desempenho do sistema eólico de bombeamento para alturas manométricas e velocidades de vento distintas. Assim todas as variáveis envolvidas no processo são medidas, coletadas e armazenadas no sistema de aquisição de dados. É importante lembrar que o sistema de aquisição de dados, com todos os sensores, não é necessário a operação em uma planta comercial, mas é essencial para o estudo em laboratório e para conclusão das análises dos resultados obtidos, discutidos no Capítulo 4. Nas seções seguintes, são descritos detalhadamente os três sistemas com seus respectivos dispositivos, os quais compõem a planta da unidade eólica de bombeamento de água.

3.2 Descrição do Sistema Elétrico da Planta

O sistema de fornecimento de energia elétrica como um todo é formado por dois subsistemas: O subsistema de aerogeração de eletricidade e o subsistema de eletricidade auxiliar, o qual é alimentado pela rede de distribuição pública. A figura 3.8 mostra o esquema simplificado do sistema elétrico como um todo.

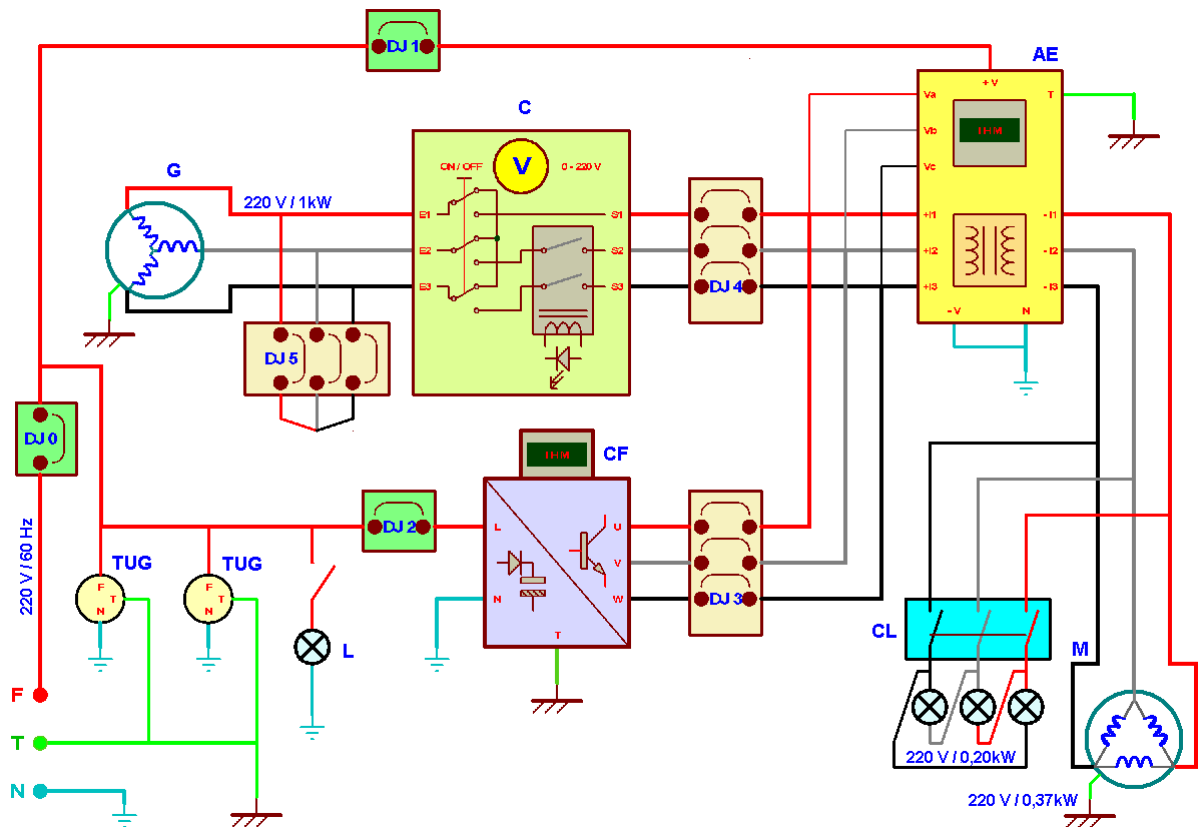


Figura 3.8 Diagrama multifilar do sistema elétrico da planta da unidade eólica de bombeamento de água

O sistema elétrico pode operar em duas configurações distintas, pois este é dotado de elementos de manobra que estabelecem a configuração na qual o sistema irá operar, seja fornecendo energia ao motor de acionamento da bomba e carga de lâmpadas através do sistema de aerogeração ou por meio do subsistema de energia elétrica auxiliar.

O subsistema de aerogeração de eletricidade é constituído por uma máquina síncrona operando como alternador trifásico, configurado em estrela e um controlador que opera como um discriminador de janela. O controlador é ajustado para interligar o alternador ao motor quando a frequência da tensão gerada ultrapassar 37 Hz, aproximadamente 136 V e interromper a ligação para frequência, abaixo de 25 Hz, em torno de 92 V.

O subsistema eólico de geração de eletricidade para bombeamento de água proposto não faz uso de sistema de armazenagem de energia na modalidade elétrica, sendo necessário providenciar a implantação de um sistema auxiliar para fornecimento de energia elétrica que coopere em conjunto com o sistema elétrico do aerogerador.

O subsistema auxiliar de energia elétrica é composto de uma rede monofásica do tipo aérea em tensão nominal de 220 V/ 60 Hz e pode disponibilizar potência até 1069 W, implementada através de um cabo multipolar composto por dois condutores de 2,5 mm² em um vão de 30 m, distância entre o ponto de entrega e o cubículo que acomoda parte da instalação do da planta do sistema. Assim, essa rede é utilizada para alimentar a iluminação do cubículo, os aparelhos que compõem o sistema de aquisição de dados e o quadro de comando.

A instalação elétrica do sistema também é dotada de proteção contra curto-circuito e aterramento dos componentes contra choque elétrico e prevenção de interferência eletromagnética (EMI).

A principal finalidade do subsistema de aerogeração de eletricidade é alimentar uma máquina de indução funcionando como motor, ao passo que o subsistema de energia elétrica auxiliar tem por fim alimentar o conversor de frequência, o analisador de energia, além dos ramais de iluminação e tomadas de força do cubículo.

Uma vez que o alternador venha a ser acionado pela turbina, a depender da rotação desta, ele gera tensões e frequências trifásicas, semelhante a da rede de distribuição. Tais tensões são proporcionais à rotação da turbina, as quais variam de 0 a 220 V e com frequência variando de 0 a 60 Hz. Estas são, então, utilizadas para alimentar o motor de indução de acionamento da bomba, mediante a faixa de frequência pré-estabelecida no controlador.

Por ocasião da falta de vento com velocidade o suficiente para impulsionar a turbina ou havendo a necessidade de acionar o motor, é possível acioná-lo por meio do conversor de frequência, utilizando o subsistema de energia elétrica auxiliar mediante a manobra dos disjuntores.

Uma vantagem apresentada pelo conversor de frequência, quando do seu uso, é o fato de que o mesmo dispõe da capacidade de variar a rotação do motor da bomba de forma controlada. Uma vez dispendo do controle de rotação do motor, é possível efetuar testes de funcionamento, para as mais variadas condições de operação da bomba, mesmo com alimentação fornecida pelo barramento monofásico.

Apesar do motor de acionamento da bomba ser a carga principal, co-existe com ela outra carga, constituída por lâmpadas.

Independente de qual o subsistema de eletricidade que venha alimentar o motor de acionamento da bomba e carga de lâmpadas, ambos o fazem por meio das entradas e saídas de corrente do analisador de energia.

O gerador está eletricamente configurado em estrela ao passo que o motor esta em triangulo. Ambos são acoplados eletricamente por meio da cabeça rotativa do cabo de transmissão de corrente e do controlador. Tratando-se do aspecto da transmissão de energia de saída do gerador até a entrada do motor, o fluxo de corrente deve atravessar a cabeça rotativa, o controlador e por fim entrar no motor por meio dos cabos de transmissão. A figura 3.9 refere-se ao esquema de ligação elétrica do sistema eólico de bombeamento comercial, em que estão interligados apenas o aerogerador o controlador, o motor e cabo de transmissão de corrente, que interliga aerogerador/ controlador e controlador/ motor.

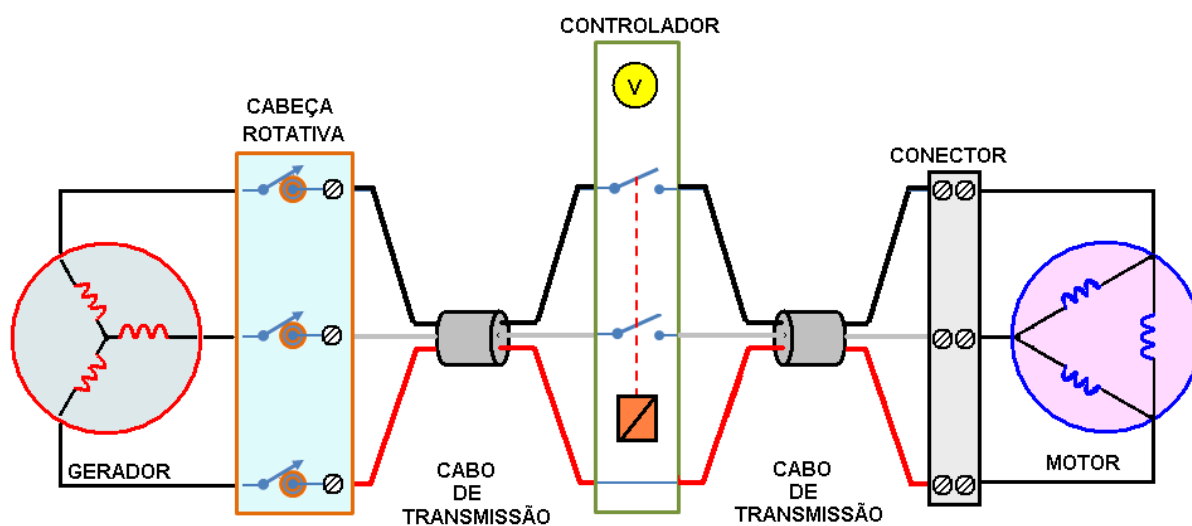


Figura 3.9 Transmissão de energia elétrica entre gerador e motor

Nesta configuração elétrica, assumi-se que o controle, a medição e proteção estão a cargo do controlador. As perdas de natureza elétricas na transmissão de corrente podem ser introduzidas somente pelo mau funcionamento de componentes como: cabeça rotativa, controlador e mau dimensionamento dos cabos.

Nos itens que se seguem, serão apresentados os elementos do sistema elétrico, sendo divididos do seguinte modo:

- Aerogerador: item 3.2.1;
- Controlador: item 3.2.2;
- Motor de Indução de Acionamento da Bomba: item 3.2.3;
- Conversor de Frequência: item 3.2.4;

- Analisador de Energia: item 3.2.5;
- Dispositivos elétricos de uso geral 3.2.6.

Verifica-se que o item 3.2.3, trata do motor de acionamento da bomba. No entanto o motor e bomba encontram-se num mesmo bloco os quais estão interligados mecanicamente por um eixo que é compartilhado por ambos. Assim o conjunto motor-bomba é tratado tanto na parte do sistema de fornecimento de energia, observando o lado do motor elétrico, quanto na parte do sistema hidráulico, olhando o lado da bomba acoplada a esse motor. Já o item 3.2.5, que trata do analisador de energia inclui-se tanto na parte do sistema de fornecimento de energia do ponto de vista das interligações elétricas, quanto da parte do sistema de aquisição de dados, quando se trata da comunicação com o computador.

3.2.1 Aerogerador

O aerogerador usado na planta experimental da unidade eólica de bombeamento de água é formado basicamente por: uma turbina, um gerador a imã permanente e um sistema de orientação, conforme a figura 3.2.

O aerogerador algumas vezes é denominado de turbina eólica. No entanto, a turbina é o elemento do sistema eólico responsável pelo aproveitamento da energia cinética dos ventos. Como mencionado anteriormente, uma turbina eólica transforma a energia do vento originalmente de movimento linear em energia mecânica de rotação para depois, por meio do gerador de eletricidade, convertê-la em energia elétrica necessária à alimentação de diversas cargas, ou mesmo para injeção de potência na rede elétrica. No entanto é preferível usar o termo aerogerador, pois a turbina eólica é somente uma das partes da máquina completa. Para operar satisfatoriamente, o aerogerador é constituído por diversos componentes e subsistemas, com características particulares que dependem do emprego [1]. Os principais componentes do aerogerador GRW 246 são tratados nos sub-itens a seguir:

3.2.1.1 Turbina Eólica

Esta tem por função extrair a energia cinética do vento e seu aproveitamento é realizado pela conversão da potência do vento em potência mecânica por meio do movimento angular que aciona o gerador síncrono. A turbina utilizada no aerogerador é do tipo sustentação, que usa aerofólios feitos de fibra de vidro como pás, que constituem a hélice de 2,46 m de diâmetro, de formato torcido desde a raiz até a ponta, vislumbrando a partida em baixas velocidades de vento, e obter desempenho elevado em altas velocidades e nível de

ruído reduzido. Esta possui um sistema de controle da potência e velocidade que consiste em controle de *estol ativo* que reage à velocidade do vento por estol de maneira tal que a sustentação das pás será diminuída. Para proteção contra altas velocidades, acima de 20 m/s, recorre-se ao controle de passo sincronizado promovido por uma mola central comprimida sobre as bases das pás da hélice de modo a garantir que estas atuem de acordo com a regulagem definida. As vantagens apresentadas por este sistema de controle de estol ativo são as seguintes:

- requerem diminutas mudanças no ângulo de passo para controlar a potência;
- em caso de ventos de baixa velocidade, é possível o controle sob condição de potência parcial;
- construção menos complexa do que as turbinas com controle de passo.

3.2.1.2 Sistema de Orientação

Este é formado pelo leme direcionador e a cabeça rotativa. O leme direcionador é constituído de fibras e é acoplado ao corpo da cabeça rotativa, ele tem por função alinhar a turbina eólica no sentido da direção do vento de modo que a turbina responda as mínimas mudanças na direção do vento e deste modo capture a maior quantidade de energia eólica possível. A cabeça rotativa cumpre uma série de funções no aerogerador GRW 246 tais como:

- Efetuar a fixação do tubo padrão que acopla o aerogerador ao topo da torre e fixar a haste do leme;
- Facilitar o alinhamento do aerogerador com a direção do vento, isto é, conseguido por meio de rolamentos internos que a cabeça rotativa dispõe que permitem o giro completo do aerogerador;
- Realizar a fixação do cabo de transmissão que efetua a ligação elétrica entre gerador e controlador, pois no interior da cabeça rotativa é o local onde se encontra o conector;
- Impedir a torção do cabo de transmissão de corrente elétrica durante a mudança de direção do aerogerador o qual descreve movimento circular para acompanhar a direção do vento, isto é, conseguido por meio de um conjunto porta-escovas.

3.2.1.3 Gerador

O gerador utilizado no projeto possui três fases e pode desenvolver potência nominal de 1 kW a 600 rpm. É de construção simples, baixo custo e possui elevado rendimento. A energia cinética proveniente do vento coletado pela turbina é transformada em energia

mecânica na forma de torque girante, a qual é aplicada ao gerador que a converte em energia elétrica através da conversão eletromagnética. O gerador deste sistema é do tipo síncrono de ímã permanente (PMSG) que consiste em um estator trifásico e um rotor com ímãs permanentes. O sistema magnético desta máquina é do tipo fluxo axial.

Este gerador é de baixa potência e opera no modo autônomo seu acoplamento entre turbina e gerador é direto, evitando o uso de um sistema de transmissão via caixa de engrenagem. O gerador produz uma tensão de saída de 220 V a 60 Hz, a qual por meio de escovas, é entregue ao controlador de carga via cabo condutor tripolar e, por fim, ao motor que aciona a bomba. Este nível de tensão pode ser traduzido como vantagem, tanto do aspecto da bitola dos condutores de transmissão, mais finos, quanto à potência que o GRW 246 disponibiliza aproximadamente 1100 W, a uma velocidade de 12 m/s [22].

Esta máquina tem como principais características reduzidas dimensões físicas e uma alta capacidade de gerar energia em baixas velocidades. A disponibilidade de um alto campo magnético produzido por ímãs permanentes e a presença de ímãs nos dois lados do estator possibilita uma topologia sem a presença de ranhuras e com enrolamentos fixos localizados no entreferro.

Uma vez integrando as principais partes constituintes do aerogerador é possível ter idéia do modo de operação do conjunto turbina, gerador e sistema de orientação. A figura 3.10 mostra os elementos que de modo integrado formam o aerogerador em estudo.

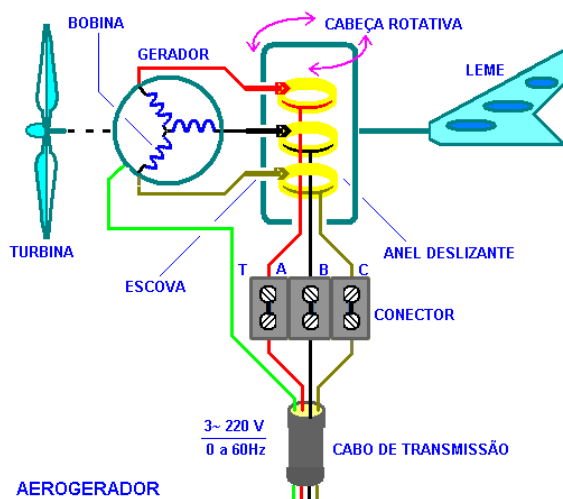


Figura 3.10 Turbina, gerador e sistema de direcionamento, integrados

As características elétricas e mecânicas do aerogerador são fornecidas na tabela 3.1.

Este aerogerador compõe o sistema de aerogeração para bombeamento de água proposto pelo fabricante [22]

Tabela 3.1 Características Técnicas do Aerogerador GERAR 246.

Características Mecânicas (Turbina)	
Diâmetro	2,46 m
Velocidade de partida	3 m/s
Rotação Nominal	650 rpm a 12 m/s
Nº de Pás	3
Mat. das Pás	Fibra de Vidro
Controle de velocidade	Estol ativo
Proteção Contra Alta Velocidade	Controle de Passo (20 m/s)
Características Eletromagnéticas (Gerador)	
Potência a 12 m/s (Watt)	1100 W
Sistema Elétrico	Trifásico
Tensão de Saída	220 volts
Topologia	Fluxo Axial
Sistema Magnético	Neodímio

Fonte: [22]

3.2.2 Controlador

A energia elétrica produzida pelo gerador síncrono varia em nível de tensão e frequência, devido à natureza aleatória do vento, não sendo apropriada para cargas que exigem rotação próxima ao ponto nominal de operação. Assim, é necessário intercalar um dispositivo de controle entre o gerador e a carga de modo a permitir o acoplamento entre gerador e carga, somente quando o nível de tensão e frequência do gerador alcançar valor próximo à nominal de operação da carga. Como o sistema de bombeamento faz uso de uma bomba que é acionada por motor de indução trifásico de 220 V/ 60 Hz, a finalidade do controlador é realizar o acoplamento elétrico do gerador ao motor, quando a frequência da tensão gerada for próxima de 37 Hz. Uma vez acoplado, o motor iniciará a rotação com velocidade múltipla da rotação do gerador, e acionará a bomba. No entanto, como as bombas são sensíveis à variação de rotação, é preciso que o motor alcance rotação suficientemente elevada para que a bomba imponha pressão o bastante para vencer a altura manométrica a que o sistema está submetido. Vencida a altura manométrica, é então iniciado o bombeamento que terá vazão em função da rotação da bomba e da coluna manométrica [22].

O controlador tem seu princípio de operação baseado no diagrama mostrado na figura 3.11.

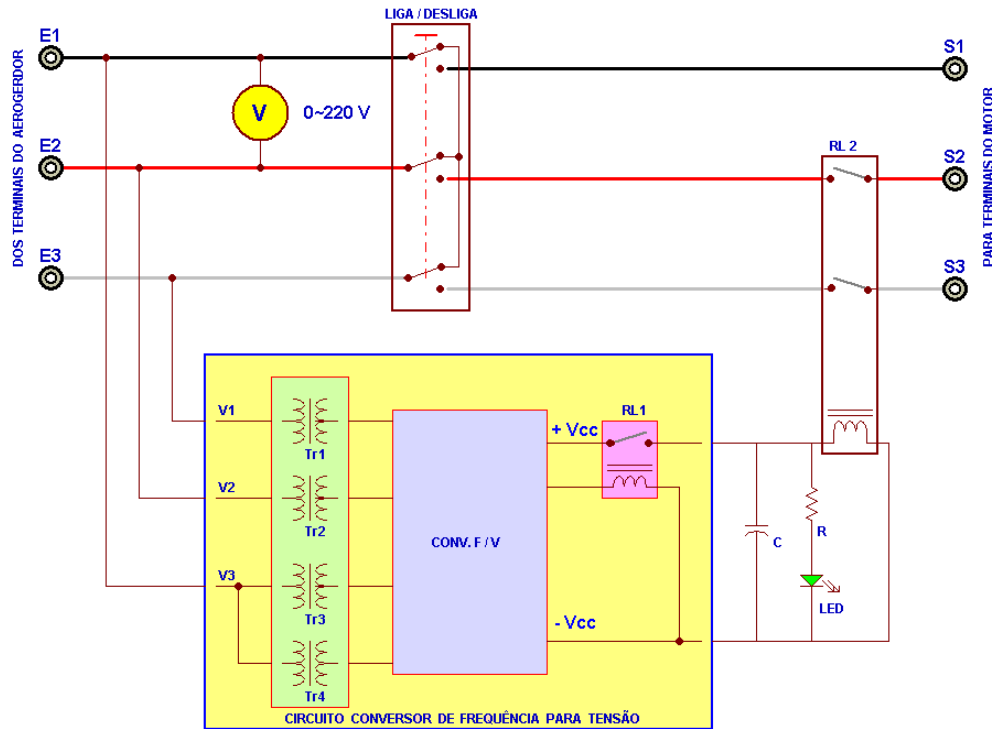


Figura 3.11. Diagrama elétrico do controlador de carga

O acoplamento entre gerador e motor é mantido enquanto a frequência de saída do gerador não chegar a um valor inferior a 25 Hz. Desta forma, o controlador age como um detector de janela e efetua o acoplamento para frequência acima de 37 Hz e faz o desacoplamento quando abaixo de 25 Hz.

O circuito elétrico do controlador é composto por uma chave on/off, um voltímetro V e um relé bipolar RL2 que é comandado por um circuito conversor de frequência para tensão do tipo eletrônico, composto por dois blocos: o primeiro bloco é constituído pelos transformadores Tr1, Tr2, Tr3 e Tr4, que assume a isolação elétrica e a atenuação das tensões de entrada V1, V2 e V3; o segundo bloco é o conversor de frequência para tensão o qual é denominado de CONV. F/ V, ele é responsável pelo tratamento dos sinais advindos dos transformadores e estabelece o acionamento do relé RL1 que é o acionador de RL2.

O bloco CONV. F/ V opera de forma que quando a frequência no valor de 37 Hz estiver disponível a entrada do controlador, este acionará o relé RL1, o qual irá acionar o relé RL2, que efetuará o acoplamento entre gerador e motor. Caso o valor da frequência na entrada do controlador estiver abaixo de 25 Hz, o bloco CONV. F/ V desabilitará RL1 o qual desligará o relé RL 2 que abrirá seus contatos resultando no desacoplamento entre gerador e motor. Deste modo, o bloco CONV. F/ V promove ao controlador a capacidade discriminar certa faixa de frequências em que o mesmo deve atuar, de forma a atender a demanda de

controle do sistema. Vale lembrar que o nível de tensão de saída do gerador está intimamente relacionado com a frequência, a qual depende da rotação da turbina e, portanto, da velocidade do vento.

Ainda com relação ao circuito elétrico do controlador, a rede em série formada pelo resistor e o diodo emissor de luz (LED), quanto o capacitor C estão em paralelo com a bobina de RL2. O LED quando aceso indica o acoplamento entre o gerador e motor, já o capacitor em paralelo com a bobina do relé RL2 protege os contatos de RL1, amortecendo a tensão induzida na bobina de RL2, devido à contração das linhas de força do campo magnético durante o transitório de abertura dos contatos RL1. Enquanto o voltímetro interligado às entradas E1 e E2, serve como indicação local do nível de tensão na saída do gerador, ao mesmo tempo em que indica a tensão aplicada ao motor por ocasião do fechamento dos contatos de RL2.

A chave on /off, quando configurada na posição off, além da função de desacoplar o gerador do motor, esta coloca em curto-circuito os terminais de saída do gerador. Estando o gerador com sua saída em curto-circuito, a corrente que atravessa seus condutores está em fase com as tensões induzidas. Estes condutores, percorridos por correntes criam um campo magnético induzido. Este campo magnético induzido mantém-se fixo em relação ao campo magnético indutor o qual atua sobre o campo indutor do rotor de imã permanente, promovendo alterações no fluxo magnético do gerador. No caso de curto-circuito dos terminais do gerador, este produz um conjugado resistente que se manifesta sob a forma de ação mecânica, efeito freante. Este efeito é denominado de frenagem dinâmica por jamais bloquear o rotor mecanicamente [23].

3.2.3 Motor de Indução de Acionamento da Bomba

O motor é componente que tem por objetivo acionar a bomba d'água, que é o principal componente do sistema hidráulico. O motor de indução é o tipo de motor em corrente alternada mais comum, devido à sua construção simples e resistente, bem como suas boas características de operação. O motor usado na unidade experimental do sistema eólico de bombeamento é do tipo assíncrono, o qual disponibiliza em sua saída uma potência mecânica de 1/2 cv, quando alimentado por uma tensão trifásica de 220/380 V a uma frequência de 60 Hz. Este é formado por duas partes: o estator e o rotor. É por meio do estator que o motor é ligado à fonte de alimentação, enquanto que para o rotor não há ligação elétrica alguma com a alimentação.

O motor assíncrono apresenta como vantagem, além da simplicidade e robustez, um custo relativamente pequeno para mesma potência quando comparado, seu custo com os motores de corrente contínua ou máquina síncrona. Este fato leva a crer que isto contribui para baixar o custo global de implantação e manutenção de uma unidade eólica de bombeamento de água. Sendo o rotor do motor, do tipo gaiola de esquilo, ainda apresenta como vantagem ausência de comutador, o qual diminui muito o índice de manutenção, por não ocorrer desgaste de escovas, além de evitar a emissão de interferência eletromagnética, visto que esta pode eventualmente perturbar o sistema de aquisição de dados e causar degradação nos dados durante a armazenagem.

Este tipo de motor, conforme a figura 3.6, tem a velocidade de rotação do campo girante em função do número de pólos, da frequência e do escorregamento. Desta forma, seu torque e rotação dependem diretamente da frequência e do nível de tensão disponibilizadas na saída do gerador que equipa o aerogerador; que também depende da velocidade dos ventos que alcançam sua turbina e das condições meteorológicas do lugar.

Uma vez que o conjunto motor-bomba já se encontra instalado, vários componentes que não fazem parte diretamente do sistema elétrico são visualizados, apesar de fazerem parte dos sistemas, hidráulico e de aquisição de dados, que também compõe a unidade eólica de bombeamento. Assim, o transmissor de pressão de vácuo e o tacogerador são elementos do sistema de aquisição de dados ao mesmo tempo em que os cabos e o conector fazem parte da fiação elétrica da instalação. A bomba tem a entrada e saída de água da carcaça indicadas por meio das setas conforme a figura 3.6 (b), ao passo que o motor possui na lateral esquerda de sua parte posterior a entrada de energia elétrica mediante cabo de alimentação e conector. Também na parte posterior do motor está conectado, mecanicamente na ponta do seu eixo, o tacogerador mediante um acoplamento elástico.

As características elétricas e mecânicas do motor que aciona a bomba utilizada na unidade eólica de bombeamento são fornecidas na tabela 3.2, conforme fabricante [24].

Tabela 3.2 Características Eletromecânicas do Motor

Tipo	Trifásico		Fabricante	WEG		Modelo	W48J		
Características Mecânicas			Características Elétricas						
Eixo	N (rpm)	Temp (°C)	<i>P_m</i> (cv)	<i>V_{ca}</i> (V)	I (A)	FP	<i>f</i> (Hz)	POLOS	FS
∅ 5/8"	3.450	70	1/2	220/320	1,7/1,4	0,8	60	2	1,1

Fonte: [24]

3.2.4 Conversor de Frequência

Uma vez que iniciou o estudo da máquina de indução através do circuito elétrico equivalente, as técnicas e possibilidades de acionamento e controle foram largamente conhecidas. Com o grande impulso tomado pela eletrônica de potência do estado sólido devido o advento dos tiristores e transistores de potência, as possibilidades de acionamento e controle se tornaram ainda maiores. Observando a operação de uma máquina de indução de forma holística é possível compreender diversas condições impostas pelas máquinas de indução, que devem ser atendidas para que se efetue seu acionamento e controle.

A velocidade angular do campo magnético girante de uma máquina está relacionada à frequência da tensão aplicada ao enrolamento de sua armadura, ao número de pólos desse enrolamento e ao deslizamento do rotor em relação ao campo girante. Uma vez que se possa agir de forma a alterar o escorregamento, o número de pólos ou a frequência, a velocidade do campo girante poderá ser modificada e, conseqüentemente, velocidade do rotor da máquina.

Dentre as várias técnicas de controle e acionamento de motores de indução existentes, a técnica utilizada para controlar a velocidade do motor de acionamento da bomba durante os ensaios foi aquela em que o conjugado da máquina é mantido constante. O conjugado é mantido constante por meio da atuação simultânea sobre a tensão e frequência aplicada na máquina, de modo que a relação entre estas permaneça constante.

Tal técnica foi viabilizada mediante o uso de um conversor estático de frequência, empregado para acionar o motor de acionamento da bomba, o qual tem estrutura basicamente formada pelos estágios: retificador (ca/cc), alisador (filtro) e inversor (cc/ca). A estrutura de um conversor de frequência para acionamento de um motor de indução trifásico é apresentada pela figura 3.12

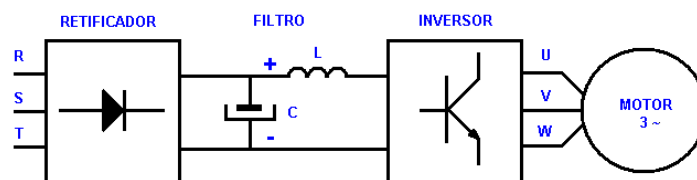


Figura 3.12 Circuito de força de um conversor de frequência

A adoção do conversor como elemento do sistema trouxe duas vantagens: no aspecto financeiro evitou a aquisição e instalação de um cabo tripolar de 2,5 mm² para levar energia da rede até o cubículo, em um trecho com distância de 30 m. Quando comparado o custo de aquisição do conversor em relação ao do cabo, o do conversor tornou-se menor, além das

vantagens técnicas disponibilizadas pelo mesmo. Do ponto de vista técnico, o conversor dota o sistema da capacidade de controlar as variáveis elétricas aplicadas ao motor, principalmente, o controle de rotação e, deste modo, possibilita o levantamento de curvas das grandezas elétricas, tais como tensão, corrente, potência e frequência para diversas condições de operação. O conversor utilizado no sistema eólico de bombeamento disponibiliza dois tipos de controle, escalar ou vetorial, e pode ser alimentado pela rede monofásica 220/60 Hz.

As principais características do conversor são:

- Série: CFW- 08;
- Modelo: 2,6 A / 200- 240 V
- Frequência de saída: 0 a 300 Hz, ajuste de fábrica 3 a 66 Hz, respectivamente 180 e 3960 rpm.
- Potência entrada: 1 kVA p/ 220 Vca
- Potência de saída: 370 W p/ motor de 4 pólos 220/ 380 Vca
- Potência dissipada: 30 W
- Corrente máxima de entrada: 5,7 A para monofásico e 3,1 A para trifásico.

A figura 3.13 mostra o conversor de frequência usado no sistema elétrico da unidade eólica de bombeamento.



Figura 3.13 Conversor de Frequência CFW 08 [25]

3.2.5 Analisador de Energia

Apesar de fazer parte do sistema de aquisição de dados de grandezas elétricas, o analisador de energia está instalado na porta do quadro de comando de motor. As ligações elétricas do analisador com os demais elementos do sistema elétrico e com o computador são efetuadas por meio de conectores situados no seu painel traseiro. A figura 3.14 apresenta o painel traseiro do analisador de energia, modelo RE 6010 com seus respectivos conectores.

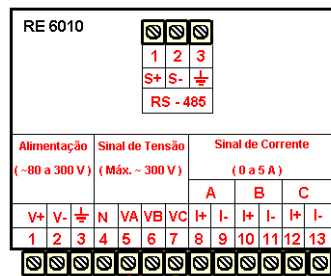


Figura 3.14 Painel traseiro do Analisador de Energia RE 6010 [26]

As funções de cada conector são descritas a seguir:

- Porta serial RS – 485, usada para estabelecer a comunicação com o computador;
- Alimentação, recebe tensões entre 80 e 300 V nos terminais 1 e 2 ao mesmo tempo em que o terminal 3 é usado para proteção;
- Sinal de tensão, aceita as tensões do neutro e das fases pelos terminais 4, 5, 6 e 7, respectivamente, e
- O sinal de corrente, recebe as correntes das fases A, B e C.

O gerador não dispõe de terminal de neutro, como mostra o esquema da figura 3.15.

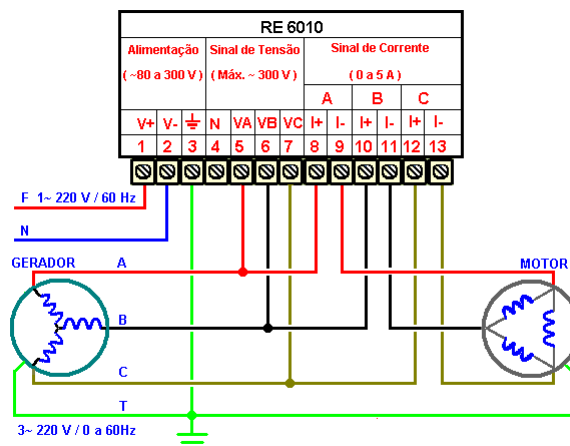


Figura 3.15 Ligação elétrica do analisador de energia para entrada em estrela

Deste modo, o analisador de energia, utiliza o esquema de ligação elétrica em estrela, onde as fases A, B e C são conectadas aos conectores de tensão e corrente. O neutro deveria ser conectado ao comum e servir de referência para as três fases.

3.2.6 Dispositivos Elétricos de Uso Geral

Neste item são citados alguns dispositivos de uso geral, necessários a operação da unidade de eólica de bombeamento desenvolvida, os quais são abordados nos sub-itens a seguir.

3.2.6.1 Disjuntores

Quanto aos disjuntores do sistema elétrico, estes estão localizados no interior do quadro de comando do motor. Os disjuntores são elementos de manobra e permitem que se faça a alteração na configuração do circuito do sistema elétrico. Existem dois tipos de disjuntores no sistema: unipolares representados por DJ 0, DJ 1 e DJ 2, e os tripolares retratados por DJ 3, DJ 4 e DJ 5. Cada um destes disjuntores cumpre funções bem definidas onde:

- DJ 0 protege o barramento monofásico 220 V / 60 Hz, DJ 1 e DJ 2 ligam e desligam o analisador de energia e conversor de frequência, respectivamente;

- DJ 3 e DJ 4 estabelecem qual dos subsistemas será usado para alimentar o motor devendo estes operarem alternadamente. Quando um disjuntor liga o outro deve necessariamente desligar para evitar o risco de curto-circuito, entre a saída do conversor de frequência e a do gerador, pois não há sincronização entre eles que os permitam operar em paralelo, nem existe o intento de usar o conversor de frequência para acelerar o aerogerador e

- DJ 5 é utilizado para colocar a saída do aerogerador em curto-circuito durante a realização de manutenção do sistema elétrico.

3.2.6.2 Quadro de Comando do Motor

O quadro de comando de motor tem objetivo de propiciar condições de manobra para estabelecer em qual configuração o sistema irá operar se fornecendo energia ao motor de acionamento da bomba através da rede ou por meio do aerogerador. Estas manobras são úteis visto que há necessidade de se efetuar o levantamento das curvas das variáveis elétricas e hidráulicas que fazem parte do processo eólico de bombeamento. Isto propicia melhores

condições de conhecer o comportamento físico dos componentes e do próprio sistema para cada condição e modo de operação.

Como se pode verificar nos diagramas mostrados nas figuras 3.5 e 3.6, a instalação elétrica permite o sistema operar por alimentação elétrica fornecida pela rede ou pelo aerogerador mediante a mudança de configuração do circuito elétrico por meio dos disjuntores. Existe a possibilidade de tal processo poder ser realizado automaticamente por meio da inserção de elementos de comando remoto ao circuito do sistema, porém não é objeto deste trabalho automatizar o sistema. Outro objetivo do quadro de comando é alojar o analisador de energia, o conversor de frequência, disjuntores e régua de terminais, conforme mostra a figura 3.16.

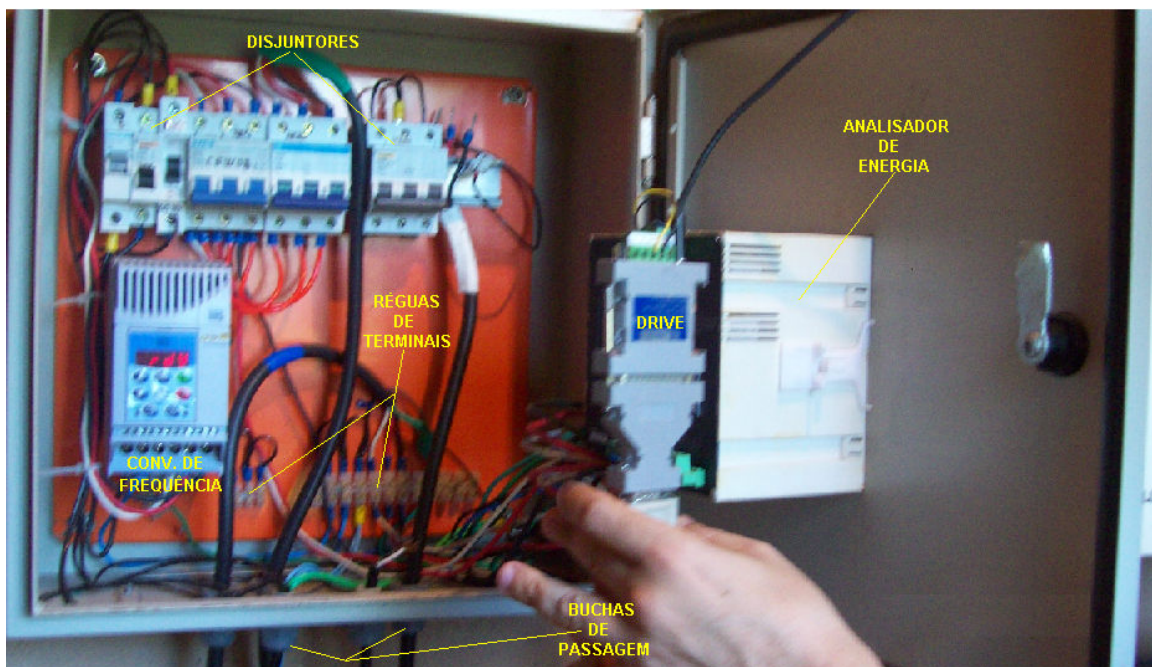


Figura 3.16 Interior do quadro de comando do motor

Os componentes são montados no chassi do quadro de comando do motor. Os disjuntores estão fixados por meio de um trilho DIN, o conversor de frequência e as réguas de terminais parafusados no próprio chassi, apenas o analisador de energia é montado na porta do quadro e afixado por meio de presilhas plásticas.

Os cabos condutores que interligam o quadro de comando com os demais equipamentos do sistema elétrico passam por meio de buchas isolantes localizadas na parte inferior do quadro de comando. Apesar da figura 3.16 mostrar o drive usado para implementar

protocolo de comunicação, ele faz parte do sistema de aquisição de dados e também do analisador de energia.

3.2.6.3 Tomadas de Força e Lâmpadas

Com relação às tomadas de uso geral TUG, estas são utilizadas para fornecer alimentação ao computador, ao retificador do *datalogger* e ferramentas elétricas usadas no decorrer dos serviços de execução da planta da unidade.

Uma lâmpada acionada por um interruptor simples é utilizada para iluminação do cubículo, as demais são usadas para implementar a carga extra. Esta carga é composta por três lâmpadas ligadas em triângulo, foi usada em paralelo com o motor para complementar a carga do aerogerador durante ensaios de verificação da potência de saída do mesmo em regime de ventos de elevada velocidade.

3.2.6.4 Cabos Elétricos

Os cabos elétricos têm por fim transmitir a eletricidade advinda do aerogerador ou da rede de distribuição até o motor de acionamento da bomba e demais dispositivos que equipam a planta. O outro fim dos cabos é estabelecer a comunicação entre os dispositivos do sistema de aquisição dados por meio da transmissão de sinais elétricos através de cabos coaxiais.

3.3 Descrição do Sistema Hidráulico da Planta

O sistema hidráulico tem por objetivo transportar a água contida num poço até um reservatório elevado mediante a pressurização da mesma por uma bomba centrífuga, a qual é conduzida em tubos. A palavra hidráulica tem origem na raiz grega “*hidros*”, que significa água, em tubos. Hidráulica é parte da ciência que estuda os líquidos em escoação ou sobre pressão; no caso do sistema proposto o fluido utilizado é a água a qual poderá estar sob pressão ou em movimento.

Quando se trata da hidrostática a pressão é definida como sendo a força atuante do fluido por unidade de área nas paredes do recipiente que o contém, tendo por unidade o metro coluna de água (mca); já em termos de hidrodinâmica, a pressão em uma tubulação, depende da energia cinética e do potencial do fluido, a taxa de massa, perda de carga e o trabalho de sucção efetuado pela bomba.

Conforme mencionado no item 3.1.2, o sistema hidráulico de bombeamento de água é constituído por um poço, uma bomba centrífuga, tubulação e o reservatório elevado.

O sistema hidráulico possui como principal componente a bomba centrífuga, a qual está interligada ao poço e ao reservatório elevado mediante tubos que tem por fim conduzir a água captada do poço, até o reservatório elevado. Associados aos tubos estão outros dispositivos, tais como as válvulas e os medidores de vácuo e vazão e um tacogerador está interligado mecanicamente ao eixo da bomba.

As válvulas são elementos de manobra e servem para controlar o fluxo de água, bem como estabelecer a configuração do circuito hidráulico de elevação, de modo que se possa conseguir aplicar diversas cargas manométricas a bomba. Quanto aos medidores e o tacogerador são elementos sensores das variáveis: pressão de vácuo, vazão e velocidade angular de rotação do impulsor da bomba, respectivamente. Tais variáveis são transmitidas por meio de sinais elétricos para o *datalogger* que faz parte do sistema de aquisição de dados.

O sistema hidráulico de bombeamento de água é composto por vários componentes os quais serão descritos nos itens que se seguem, da seguinte forma:

- Tubulação no item: 3.3.1;
- Poço no: item 3.3.2;
- Reservatório Elevado no: item 3.3.3
- Bomba centrífuga no: item 3.3.4;

3.3.1 Tubulação

A tubulação é um conjunto de tubos, unidos de modo a garantir o fluxo da água na instalação hidráulica. A tubulação da instalação da planta é subdividida em tubulações parciais denominadas de: sucção, recalque, elevação, coleta e retorno. Essas tubulações têm associadas a elas dispositivos de medição e controle, de maneira que todas as tubulações são descritas isoladamente.

Merecem destaque as tubulações de elevação e retorno, uma vez que a planta tem o caráter experimental e as mesmas têm uma participação preponderante com relação aos testes a serem efetuados no sistema hidráulico. A planta da unidade proposta dispõe de uma instalação hidráulica que permite ao circuito do sistema hidráulico impor à bomba valores diversos de carga, a qual é implementada pelos tubos de elevação. Ocorre que o poço fornecedor de água para o sistema hidráulico, é limitado no que tange a capacidade de reposição de água, para manter o nível dinâmico do poço a uma altura que evite a entrada de ar no tubo de sucção e evite a interrupção do fluxo de água. O artifício utilizado para contornar tal limitação foi instalar um tubo de retorno.

A figura 3.17 mostra o diagrama da tubulação da instalação hidráulica.

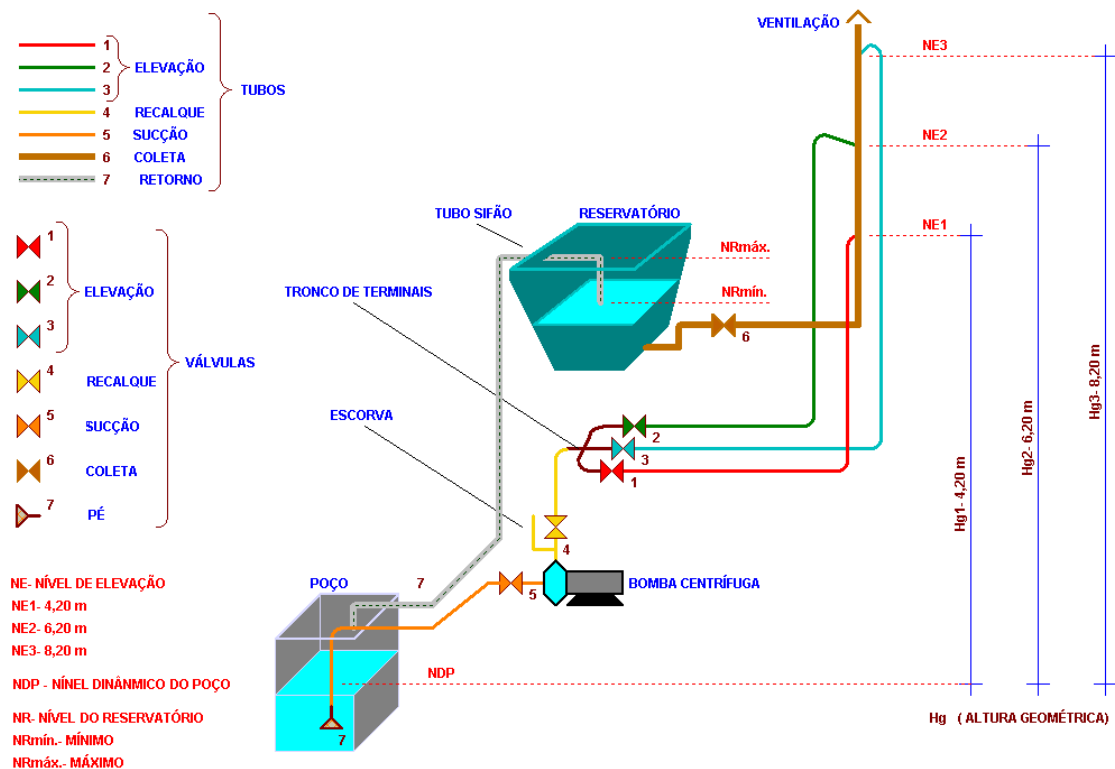


Figura 3.17 Diagrama do sistema de tubulação.

• **A tubulação de elevação** é constituída por tubos de comprimentos diferentes, dispostos em paralelo de modo que suas saídas de água ocorrem em níveis com alturas distintas. A tubulação de elevação compreende todos os tubos que estão interligados desde o tronco de terminais contíguo ao tubo de recalque, até aos terminais de entrada do tubo de coleta. Os tubos de elevação estão conectados, mediante válvulas às saídas de três ramais, oriundos do tronco terminal que se encontra ligado ao tubo de recalque. Cada tubo possui uma válvula que defini a intensidade do fluxo de água e determina à coluna manométrica a que será submetida à saída da bomba. Desta forma a bomba poderá operar sob cargas distintas que se traduzirão em força a ser exercida pelo o motor de acionamento da bomba.

• **A tubulação de retorno**, como mencionado anteriormente, surgiu como solução para contornar a baixa capacidade de reposição de água do poço, face à elevada vazão da bomba. A água é retirada do poço pela bomba mediante o tubo de sucção, o qual é dotado de uma válvula de pé, que tem a função de evitar que a água escoe de volta ao poço e esvazie a tubulação do sistema.

Sendo o poço de baixa vazão, em pouco tempo de operação da bomba o nível da água do poço baixa. Uma vez que o nível da água do poço baixe além do nível em que se encontra a válvula de pé ocorre entrada de ar na tubulação através da válvula de pé causando o estancamento do fluxo de água. A instalação hidráulica possui uma entrada para escorva (*extração de ar*), contígua a saída da bomba. Assim para evitar a realização por diversas vezes da escorva, devido à entrada de ar na tubulação, foi inserido no sistema hidráulico um circuito de realimentação implementado por meio de um tubo de retorno que recebe a água na saída do reservatório e a conduz até o poço.

O tubo de retorno instalado na saída do reservatório possui um sifão que estabelece o nível máximo e mínimo em que a água no reservatório deve iniciar ou cessar o escoamento. Uma vez que a água no reservatório alcance o nível máximo, o sifão permite que a água escoe de volta ao poço, de modo que o nível dinâmico do poço permaneça acima do nível da válvula de pé e evite a entrada de ar no sistema de tubulação. Outra aplicação do sifão é evitar o total escoamento da água do reservatório de maneira a garantir o nível mínimo de água no mesmo. Tal procedimento tem por objetivo manter em torno de 700 litros de água no reservatório de maneira a impedi-lo de ser levado por vendaval, devido à baixa densidade do mesmo.

O tubo de retorno hidráulico também deve cumprir a função operacional de prover ao sistema hidráulico a versatilidade de escolha da altura do nível dinâmico da água do poço em relação à altura dos pontos de saída da água da tubulação de elevação. Uma vez que se pode escolher a altura do nível dinâmico do poço em relação a um ponto de saída da água, é

possível definir a altura geométrica da tubulação de modo a se efetuar testes no sistema hidráulico para diversas condições estáveis de operação.

- **A tubulação de sucção** tem por objetivo conduzir a água do poço até a entrada da bomba. Estão associados ao tubo de sucção os seguintes elementos: o transdutor de pressão de vácuo, a válvula de pé e a de sucção.

- **A tubulação de recalque** tem por fim transportar a água da saída da bomba até o tronco de terminais onde estão conectados os tubos de elevação. Encontram-se contíguos ao tubo de recalque os seguintes elementos: tubo de escorva, válvula de recalque, medidor de vazão e o tronco de terminais.

- **A tubulação de coleta** é destinada a receber a água que sai de cada um dos tubos de elevação e conduzi-la até a entrada do reservatório. O tubo de coleta possui a extremidade superior ventilada para evitar a formação de vácuo no seu interior, e é conectada ao reservatório por meio de uma válvula.

A tubulação que implementa o sistema hidráulico da planta ocorre internamente e externamente ao cubículo. Assim os detalhes da tubulação, relacionados a cada uma das partes interna e externa, serão descritos separadamente.

- **A tubulação interna** compreende parte dos tubos de sucção e elevação, além do tubo de recalque, pois eles estão associados às válvulas, aos instrumentos de medição e a bomba, de modo que encontram-se todos abrigados no interior do cubículo. Detalhes da tubulação interna são mostrados conforme as figuras 3.6 (a), (b) e (c).

Em (a) é mostrada a parte interna da tubulação de elevação, a qual está apoiada sobre a tubulação de recalque e ancorada no teto. Nela encontram-se os tubos de elevação nos quais estão conectadas as válvulas de elevação VE em que os sentidos dos fluxos são representados por setas. A altura geométrica é estabelecida de acordo com o comprimento de cada tubo de elevação, com as seguintes medidas: 9,80 m, 7,80 m e 5,80 m.

Em (b) são mostradas as tubulações de recalque e sucção que estão conectadas a saída e entrada da bomba, respectivamente. A tubulação de recalque esta apoiada sobre a bomba e compreende o tubo que sai da bomba e chega até o tronco de terminais dos tubos em que estão ligadas as válvulas de elevação VE. Estão interligados ao tubo de recalque: o transdutor de pressão (Desativado) e tomada para escorva, válvula de recalque VR e medidor de vazão. A tubulação de sucção compreende o tubo que sai do poço e alcança a entrada da bomba. Estão conectados ao tubo de sucção: a válvula de pé (dentro do poço), a válvula de sucção VS e o transdutor de vácuo, de modo que o tubo de sucção é conectado a bomba mediante a

união. Quanto ao sentido dos fluxos são indicados por setas na cor: amarelo para o recalque e laranja para sucção.

Em (c) são exibidos o tronco de derivação dos tubos de elevação e o medidor de vazão conectado ao tubo de recalque.

• **A tubulação externa** compreende todos os tubos que se encontram em suspensão. Detalhes da tubulação suspensa são apresentados na figura 3.18 (a), (b), (c), (d) e (e).



Figura 3.18 Detalhes da tubulação exterior ao cubículo

A figura 3.18 (a) trata-se da parte externa da tubulação de elevação oriunda do cubículo que, por meio da suspensão mostrada na figura 3.18 (b), chega até a torre do aerogerador.

As figuras 3.18 (c) e (e) mostram a tubulação de elevação e coleta afixada internamente ao longo da extensão do mastro da torre. Na figura 3.18 (c) é mostrado o ponto mais alto da tubulação como indica a seta, e a figura 3.18 (e) exhibe o modo como os tubos de elevação estão alojados nas cantoneiras do mastro da torre.

Na figura 3.18 (d), são expostos os tubos de retorno e de sucção entre o poço e o cubículo, os quais estão em parte suspensos por estacas de madeira. O sentido do fluxo da água no tubo de retorno é representado pelas setas, indicando como a água segue em direção

ao poço. Já as setas no tubo de sucção indicam o sentido do fluxo da água, em que água oriunda do poço segue em direção ao cubículo.

• **Conexões e Válvulas** são dispositivos hidráulicos de interligação e controle respectivamente, as quais compõem a tubulação. As conexões são utilizadas para efetuar o acoplamento entre tubos, ao passo que as válvulas são usadas para permitir ou não a passagem do fluido, além da possibilidade de regulagem da intensidade do mesmo. Diversos tipos e medidas de conexões, bem como válvulas, foram utilizados na implementação da tubulação. A tabela 3.3 apresenta a quantidade de dispositivos para cada medida, o local onde se encontra na tubulação, medida de tubos, válvulas e conexões.

Tabela 3.3 Tubos e conexões hidráulicas usados na implementação da tubulação

DISPOSITIVO HIDRÁULICO	MEDIDA				TUBULAÇÃO LOCAL	QUANTIDADE			
	DIÂMETRO NOMINAL (DN)					25	32	40	50
VÁLVULA DE PÊ	*25	32	-	-	S	01	01	-	-
VÁLVULA ESFERA	25	-	-	50	S/ F/ E/ C	05	-	-	01
CURVA 90° LONGA	25	-	40	-	S/ F/ E/ T	10	-	02	-
JOELHO 90°	25	40	-	50	EV/ C/ F	01	-	01	03
JOELHO 45°	-	-	40	-	S/ F	-	-	02	-
CRUZETA	25	-	-	-	T	01	-	-	-
TÊ	25	-	-	50	S/ EV/ C	03	-	-	03
UNIÃO	25	-	-	-	S	01	-	-	-
FLANGE	25	40	-	50	C/ F	01	-	01	01
BUCHA L REDUÇÃO	-	32/25	-	50/25	S/ C	-	01	-	03
LUVA L/R	25	-	-	-	EV	01	-	-	-
TAMPÃO	25	-	-	-	EV	01	-	-	-
TUBOS	MEDIDA				TUBULAÇÃO	COMPRIMENTO (m)			
ÁGUA	25	-	-	-	S/ R/E/EV	22 m	-	-	-
ÁGUA	-	32	-	-	S	-	01 m	-	-
ESGOTO	-	-	40	-	F	-	-	06 m	-
ÁGUA	-	-	-	50	C	-	-	-	12 m

S- SUCÇÃO R- RECALQUE E- ELEVAÇÃO C- COLETA F- RETORNO EV- ESCORVA T- TRONCO

Material: * metal, os demais dispositivos em PVC

3.3.2 Poço (Fonte de Água)

A maior parte dos sistemas de bombeamento eólicos instalados no País capta água de recursos hídricos subterrâneos, sendo que o uso destes recursos superficiais (rios, açudes,

cacimbas etc.) é dedicado a irrigação e para dessedentar animais domésticos. As exceções ocorrem nos casos em que a qualidade da água subterrânea é inadequada para o consumo humano, ou quando há algum impedimento para a perfuração de poços. Quando da utilização de água superficial, o controle de sua qualidade e tratamento deve ter cuidados aumentados, já que esse tipo de manancial normalmente se afasta dos parâmetros sanitários estipulados para o consumo humano [27].

O poço é o componente fornecedor de água para o sistema hidráulico. No entanto, não se dispõe de um utilizador para a água bombeada e toda a quantidade que excede a capacidade do reservatório elevado é devolvida ao poço, conforme as figuras 3.4 (a), (b) e (c).

A figura 3.4 (a) mostra dois tubos: o tubo de sucção que conduz a água do poço até a entrada da bomba e o tubo de retorno que permite que a água excedente volte ao poço, cada vez que ultrapassar o nível máximo no reservatório elevado. Ambos os tubos estão sustentados à entrada do poço pelo vergalhão. No vão que compreende a orla do poço até parede posterior do cubículo os tubos estão suspensos por estacas de madeira conforme apresentada na figura 3.18 (d). Na figura 3.4 (b) é mostrada em detalhe, a água escoando do tubo de retorno em direção ao fundo do poço, por ocasião desta ter ultrapassado o nível máximo no reservatório elevado ao passo que na figura 3.4 (c) é mostrado o nível da água do poço.

A planta está instalada em um local onde o terreno é visivelmente arenoso de modo que foi necessário revestir o poço para evitar o desmoronamento das paredes devido à precipitação de material desagregado e o iminente entupimento do mesmo. O revestimento do poço foi confeccionado com tubos de concreto armado que deram o formato cilíndrico ao mesmo que também dispõe de uma tampa de concreto armado, como segurança para evitar a queda de animais e folhas das arvores arrastadas pelo vento.

• **Captação de Água**, conhecer os parâmetros da fonte de captação de água (subterrânea ou superficial) para o bombeamento é primordial não apenas para a concepção e o dimensionamento do sistema, mas também para sua manutenção. A prova de capacidade ou teste de caracterização do poço proporciona parâmetros importantes, tais como os níveis, estático (H_E) e dinâmico (H_D) do lençol freático, e a capacidade de reposição (Q_R) do poço. O diagrama esquemático da figura 3.19 mostra tais parâmetros.

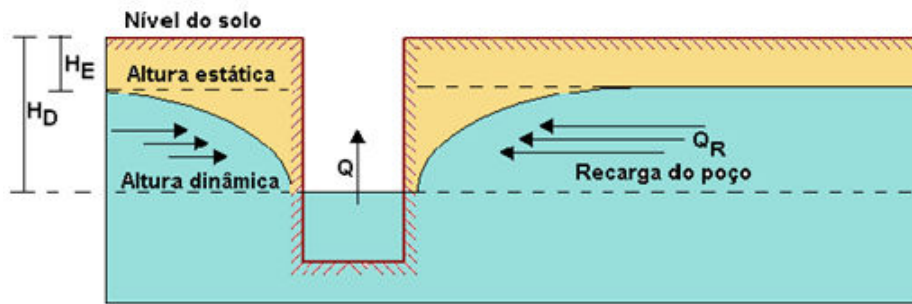


Figura 3.19 Parâmetros característicos conseguidos com a máxima vazão Q_M

Não determinar tais parâmetros ou sua incorreção pode resultar na sub ou sobre utilização do recurso e, está propenso a causar danos ao mecanismo de bombeamento. Às vezes ocorre que empresas perfuradoras não realizam os testes geológicos de caracterização dos poços de forma correta ou padronizada. Assim se a vazão de extração (Q) for muito superior à de recarga do poço (Q_R), o nível dinâmico pode rebaixar excessivamente a ponto do mecanismo funcionar “a seco”, podendo danificá-lo. Além disso, vazão de extração muito superior à vazão de reposição pode comprometer a estrutura geológica do poço. Quanto maior a extração e menor a permeabilidade do terreno, maior o risco de que ocorra dano a estrutura geológica do poço.

Com relação à capacidade do poço e a vazão de extração, pressupõe que se $Q < Q_R$, não deverá surgir problemas. Por causa disto, o processo de dimensionamento exige a comprovação desta relação, com o alcance do valor de Q_R . O fato é que costuma ocorrer muitas incertezas na obtenção deste parâmetro. Assim, é importante incluir sistemas de proteção contra o funcionamento do motor-bomba em seco. A perfuração e realização do teste de capacidade do poço não são suficientes, sendo necessário levar em consideração outras questões para que haja um proveitoso uso do sistema [27].

3.3.3 Reservatório

O reservatório elevado tem por fim armazenar a água bombeada, para posterior utilização. Conforme manual do fabricante [28], o reservatório utilizado é fabricado à base de resina, fibra de vidro e gelcoat, garantindo resistência e durabilidade e deixando o produto final imune à proliferação de fungos e tem capacidade para armazenar 1000 litros. A figura 3.20 mostra o reservatório elevado juntamente com a tubulação da instalação.



Figura 3.20 Reservatório e parte da tubulação externa

O reservatório está instalado sobre uma laje que serve de base plana. A laje encontra-se montada a cima do cubículo. Ao reservatório estão associados tubos de entrada e saída de água. A água chega até o reservatório mediante o tubo de coleta, que por sua vez recebe água dos tubos de elevação. O reservatório possui duas saídas de água, viabilizadas pelo tubo de retorno e mangueira. O tubo de retorno conduz a água para o poço como mencionado no item 3.3.2 ao passo que a mangueira (tubo flexível) dispõe na sua extremidade de uma válvula para o controle da saída de água do reservatório. Tal conjunto mangueira/válvula permite utilizar a água para fins de manutenção do sistema de bombeamento e realizar de modo mais fácil a escorva da bomba. O sentido dos fluxos de água de entrada e saída do reservatório é indicado por setas.

3.3.4 Bomba Centrífuga

Como mencionado no item 2.2.4, a bomba centrífuga é uma turbomáquina sendo a máquina hidráulica mais usada para bombear líquidos na irrigação agrícola, nos edifícios residenciais, no saneamento básico, na indústria em geral, recalando, pressurizando ou transportando líquidos de um lugar para outro. As bombas centrífugas podem ser de superfície ou submersíveis de modo que sua aplicação requer adequação entre a bomba instalada, o sistema de tubulações empregado e do manancial fornecedor do fluido bombeado.

A bomba centrífuga que compõe o sistema hidráulico da unidade eólica de bombeamento é o modelo CP-4R. A bomba possui proporção reduzida e é projetada para transferir líquidos que não contenham sólidos em suspensão e que não seja quimicamente abrasivo. Segundo o fabricante [21] a bomba tem altura manométrica de sucção inicial de 6 m (AMS), e uma vez iniciada a operação pode alcançar uma altura máxima de 8 m (AMS)

quando instalada ao nível do mar. No que tange afuração do flange do motor/carcaça é possível dispor de quatro opções de montagem, em que muda a cada 90°, de modo que se pode conseguir o melhor posicionamento do bocal de recalque, para atender a necessidade da tubulação.

Conforme apresentado na figura 3.6, a bomba centrífuga modelo CP-4R de múltiplas aplicações, confeccionada em termoplástico de engenharia, montada em monobloco e empregada na planta é constituída pelas seguintes partes principais:

- **A intermediária interna e carcaça** são em ABS, em que todos os termoplásticos são reforçados em fibra de vidro que não contaminam o líquido bombeado e ainda é resistente a certos produtos químicos.

- **O rotor** é do tipo fechado, injetado em termoplástico de engenharia (Noryl) e reforçado com fibra de vidro. É construída internamente com maior passagem e bico hidrodinâmico promove ao fluxo do líquido maior intensidade e melhor distribuição de modo a reduzir o atrito e assim diminuir a perda de carga.

- **O eixo** é em aço carbono de 5/8”, sendo vedado por selo mecânico do tipo “16”. O selo é construído em borracha nitrílica, mola de aço inox e suas faces de vedação são em grafite e cerâmica, de maneira que a bomba pode operar com líquidos até 70°.

- **O motor de acionamento** da bomba centrífuga é do tipo de indução 220/380 V trifásico, 2 polos, 3450 rpm a 60 Hz e 0,5 cv de potência [21].

Para obter o valor da vazão desta bomba é preciso saber a altura manométrica total da instalação. Assim deve-se verificar qual o desnível de elevação e de sucção, as conexões e o comprimento total da tubulação, que compreende o percurso entre a válvula de pé sucção até reservatório superior. A tabela 3.4 informa os valores de vazão em função da altura manométrica para o conjunto motor-bomba usada na unidade eólica de bombeamento.

Tabela 3.4 Dados do conjunto motor-bomba

Modelo	P (cv)	Tubulação Sucção/ Elevação (bsp)	AMT máx. (mca)	Altura Manométrica Total (metros de coluna de água)									
				4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Trifásico 220/ 380 V				Vazão (m³/h)									
CP-4R	1/2		23	9,0	8,3	7,6	6,9	6,1	5,2	4,3	3,3	2,0	0,8

Fonte: [21]

As curvas de performance que informam o rendimento hidráulico, as condições de operação e a potência requerida para cada valor de vazão em função da altura manométrica são apresentadas pela figura 3.21.

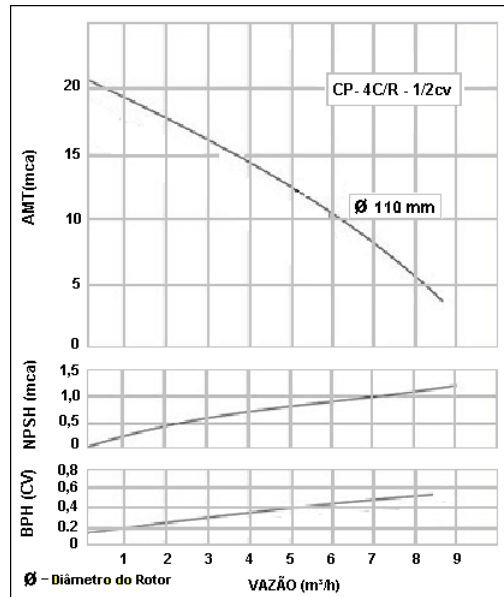


Figura 3.21 Curvas de performance hidráulica da bomba centrífuga modelo CP-4R [21]

Para o caso da bomba centrífuga modelo CP-4R empregado na planta, suas condições operacionais são apresentadas por meio da figura 3.17 a qual mostra o esquema de instalação em que estabelece a altura máxima e mínima quando da utilização de tubo de 25 DN.

Não se deve permitir que a bomba opere com uma AMT menor que 6 mca, sob pena de sobrecarregar o motor de acionamento da bomba, uma vez que a carga hidráulica se elevará acima do suportado pelo motor elétrico, elevando o consumo, diminuindo a vida útil, levando-o a queima dos enrolamentos.

3.4 Descrição do Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados tem o objetivo de medir e registrar as variáveis de processo que fazem parte do sistema eólico de bombeamento de água. O sistema de aquisição de dados é dividido em dois blocos distintos: o bloco de dados das variáveis elétricas e o bloco das variáveis não-elétricas. O bloco de dados das variáveis elétricas está encarregado de coletar informações de natureza elétrica, como corrente, tensão e potência advindas do sistema elétrico, ao passo que o bloco de variáveis não-elétricas tem por objeto coletar informações originadas do sistema hidráulico, da velocidade de rotação da bomba e velocidade do vento.

O sistema de aquisição de dados é constituído pelos seguintes dispositivos: um computador, um *datalogger* e um analisador de energia que recebem informações das variáveis de processo mediante sinais enviados pelos sensores. O *datalogger* é encarregado de medir e registrar as variáveis não elétricas, ao passo que o analisador de energia assume a medição e registro das variáveis elétricas. Ao computador cabe a função de permitir o acesso aos dados armazenados mediante os *softwares* de instrução através de interface de comunicação. Os componentes do sistema de aquisição de dados, e suas interligações elétricas são mostrados na figura 3.22.

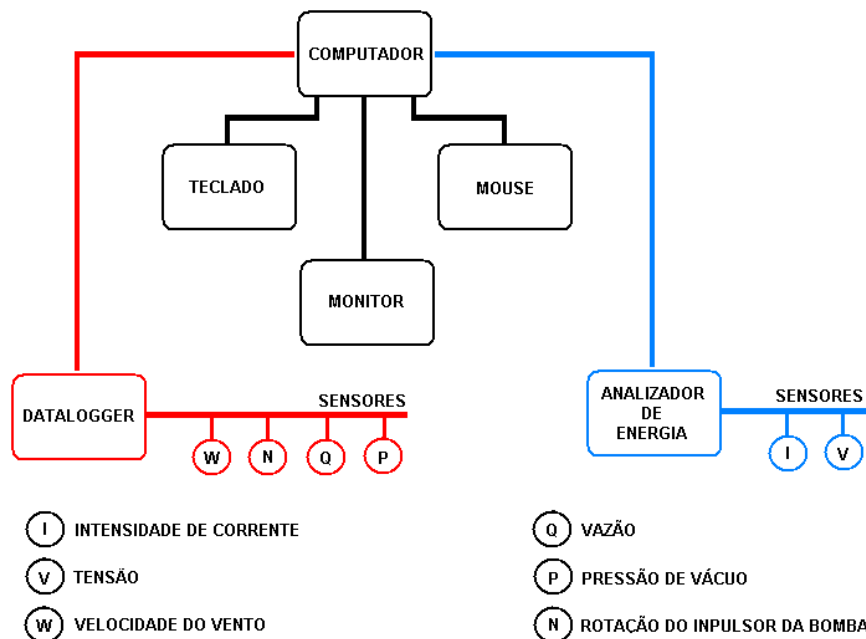


Figura 3.22 Esquema de interligação dos dispositivos do sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados foi conseguida de duas formas: o registro em tabelas dos valores das variáveis obtidas de forma instantânea na *display* dos equipamentos quanto em gráficos e

guias de leitura *online* que permitem a visualização da medição em tempo real na tela do monitor do PC. A outra forma a armazenagem dos dados das variáveis medidas na memória dos equipamentos, no caso o *datalogger* e o analisador de energia, os quais são periodicamente coletados na forma de arquivo digital. Uma vez coletados estes arquivos digitais são convertidos em arquivo do Excel para visualização em planilha, análise e tratamento dos dados.

Nos itens que se seguem, serão apresentados os elementos do sistema de aquisição de dados, sendo divididos da seguinte maneira:

- Computador: item 3.4.1;
- Analisador de Energia: item 3.4.2;
- *Datalogger*: item 3.4.3;
- Sensores: item 3.4.4;

Nota-se que o item 3.4.2, que trata do analisador de energia inclui-se tanto na parte do subsistema de fornecimento de energia do ponto de vista das interligações elétricas, tanto quanto da parte do sistema de aquisição de dados quando se trata da comunicação com o computador.

3.4.1 Computador

O computador é o elemento do sistema de aquisição de dados que tem a tarefa de armazenar e manipular os dados oriundos de dispositivos de registro, como o analisador de energia e o *datalogger*. O computador usado no sistema de aquisição de dados é da classe dos microcomputadores, ou seja, *personal computer*– PC, como são mais conhecidos, os quais são mais utilizados para resolução de problemas de baixa complexidade.

O computador é caracterizado pela capacidade de memória, tamanho da palavra e velocidade de processamento, de modo que o microcomputador é classificado com base no tipo de microprocessador que utiliza e deve ser considerado como um conjunto de duas partes interdependentes: *software* e *hardware*, em que uma depende da outra para justificar sua própria existência [29].

Além do software do sistema operacional do próprio PC, foi necessário instalar dois *softwares* de aplicação, o ANL 6000 e PC 208 do analisador de energia e do *datalogger* respectivamente, usados para parametrização bem como para coleta dos dados registrados pelo sistema de aquisição da planta da unidade eólica de bombeamento.

3.4.2 Analisador de Energia

Apesar de instalado no quadro de comando de motores o analisador de energia, faz parte do sistema de aquisição de dados e é empregado para registrar os sinais das variáveis físicas relacionados apenas com grandezas de natureza elétrica tais como: tensão, corrente, potência, frequência e DHT de tensão e corrente. Dispondo de tais dados, é possível verificar o comportamento elétrico do gerador e do motor da bomba para várias condições de operação.

O modelo utilizado no sistema de aquisição é o RE6010 fabricado por [26], o qual faz o processamento dos sinais em DSP (*Digital Signal Processor*) e conversores AD (Analogico/Digital) de alta resolução, de modo a se obter uma boa performance de cálculos em tempo real, estes sinais podem ser integrados num intervalo entre um segundo e uma hora. Os sinais medidos são armazenados em uma memória flash de 8 MB.

A comunicação do analisador de energia com o computador é efetuada através da porta serial RS485. A parametrização do analisador de energia pode ser estabelecida *in loco*, através de teclas dispostas no painel frontal ou por meio do computador. A interface com a porta RS485 localizada no painel traseiro é efetuada mediante o driver conversor de RS 485 para RS 232 que serve para implementar o protocolo de comunicação. O RE6010 é dotado de um *display* de cristal líquido LCD alfanumérico que indica a grandeza medida *in loco* e permite a leitura nas telas de visualização de parâmetros, o acesso é por meio das teclas no painel frontal. O painel frontal e o *driver* (conversor RS 485/ RS 232) para comunicação do analisador de energia com o computador são apresentados pelas figuras 3.23 (a) e (b) respectivamente.

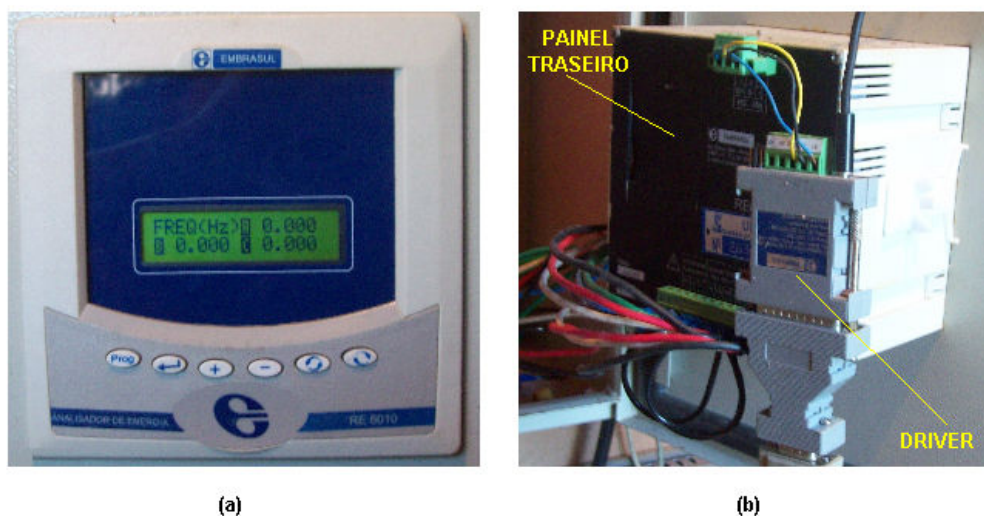


Figura 3.23 Painel frontal em (a) e *driver* RS 485/ RS 232 em (b) [26]

O analisador RE6010 instalado no sistema usa o esquema de ligação trifásica na configuração estrela, a qual foi efetuada no painel traseiro nos conectores de interligação com o sistema elétrico, conforme mostra a figura 3.21. Para medição de corrente e potência não foi necessário o emprego de transformadores de corrente, devido à baixa intensidade das correntes de fase, e nem transformador de potencial visto que os níveis de tensão de pico não ultrapassam 400 V.

Os dados de energia elétrica coletados são analisados através do programa ANL6000, que é uma ferramenta de análise de sistemas de potência que permite a leitura e o tratamento dos dados armazenados na memória de registro do RE6010. Este software tem como característica principal a operação em plataforma Windows. E é capaz de simular a inserção de capacitores além de permitir a geração de gráficos e relatórios. O ANL6000 dispõe ainda do recurso de leitura *online* o qual abre uma janela na tela do PC que permite a visualização da medição em tempo real das variáveis de natureza elétrica envolvidas no processo do sistema eólico de bombeamento. Um exemplo de guia de leitura *online* disponibilizada pelo software de análise ANL 6000 é mostrado na figura 3.24.

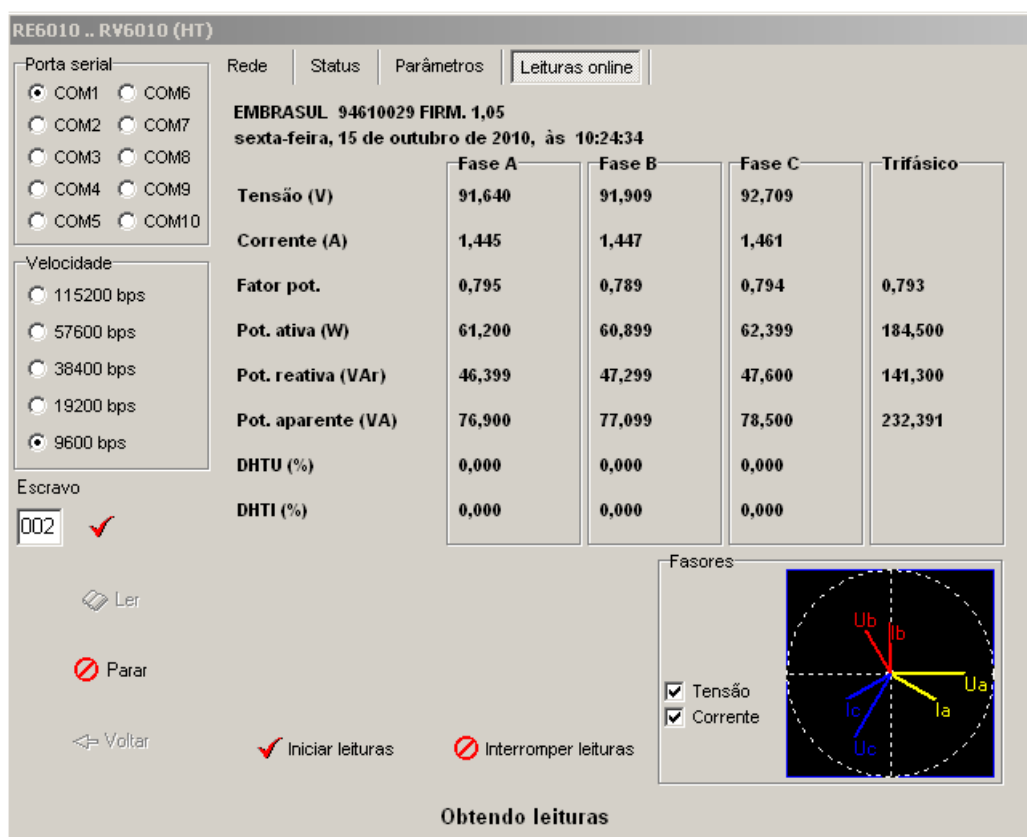


Figura 3.24 Janela aberta na tela do PC com uma guia de leitura *online* [26]

3.4.3 Datalogger

O *datalogger* é modelo CR10X do fabricante [30]. Tem por finalidade medir e armazenar as grandezas físicas de natureza não elétrica que estão envolvidas com o sistema eólico de bombeamento. Os sinais elétricos advindos dos transdutores localizados em pontos estratégicos da instalação do sistema são aplicados às entradas do *datalogger*.

O CR10X dispõe de um painel com conectores que estabelecem a interligação entre ele e os seus periféricos. Um conector do tipo DB 9 é usado pela porta Serial RS 232 I/O (Entrada / Saída) empregada na comunicação entre o *datalogger* e computador. Tal porta é usada tanto para carregar (*up load*) o programa no *datalogger* quanto para coletar os dados, ou seja, descarregar (*download*) do *datalogger*. Os demais conectores são utilizados para interligar eletricamente os sensores por meio do atenuador de tensão CVD 20 ao *datalogger* ou diretamente o sensor de velocidade do vento na entrada de pulsos do *datalogger*.

O *datalogger* e seus periféricos encontram-se alojados no interior do quadro mostrado pela figura 3.5. A figura 3.25 apresenta o interior deste quadro.

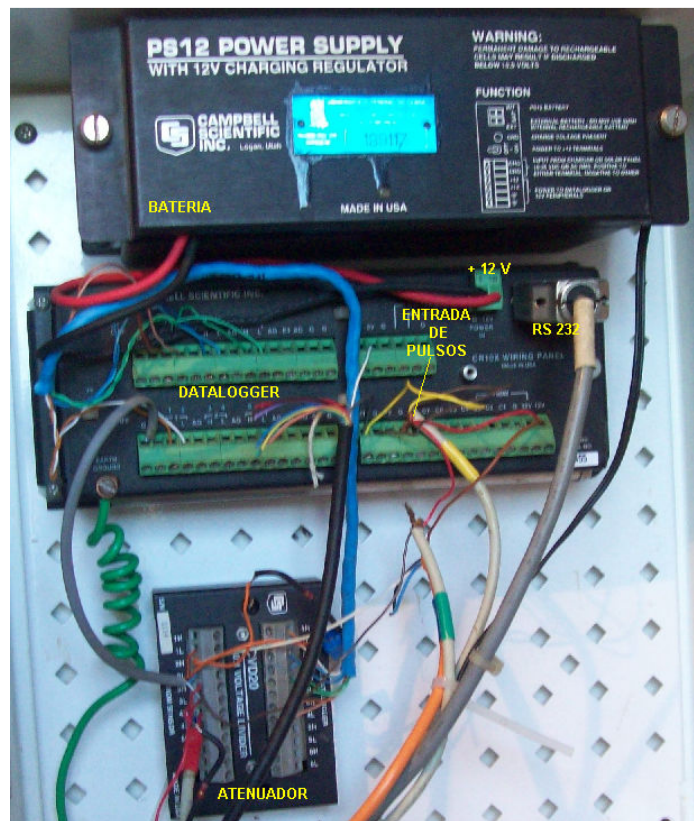


Figura 3.25 Quadro com o *datalogger*, atenuador e bateria de back up

O sistema de aquisição de dados é suprido pela rede auxiliar de energia elétrica em 220 Vac. Porém, o *datalogger* e os sensores funcionam em corrente contínua, assim, uma

fonte retificadora que fornece em sua saída 12 Vcc foi empregada para alimentação do *datalogger*, dos sensores e manter a carga da bateria em 12 Vcc. A bateria deverá suprir o *datalogger* e os sensores em eventuais faltas da rede de distribuição de eletricidade, evitando a perda e garantindo a integridade dos dados registrados.

A figura 3.26 mostra o diagrama de interligação elétrica entre o *datalogger* e seus periféricos, além dos demais dispositivos como sensores, computador e retificador que se encontram externamente ao quadro representado pelo retângulo.

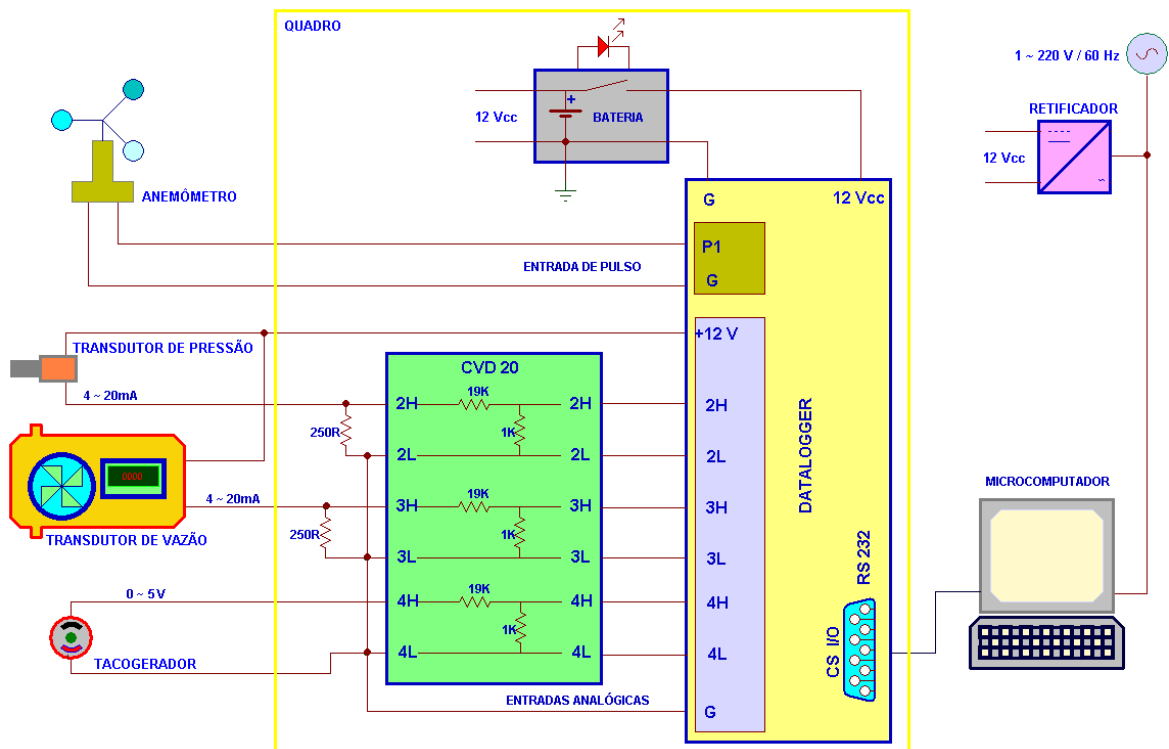


Figura 3.26 Diagrama de interligação entre *datalogger* e sensores

A integração do *datalogger*, dos periféricos e sensores forma o bloco do sistema de aquisição de dados responsável pelo registro das variáveis físicas de natureza não-elétrica.

No diagrama da figura 3.26, o *datalogger* recebe sinais elétricos de quatro sensores. Os transdutores de pressão de vácuo e vazão requerem uma tensão de 12 Vcc para seu adequado funcionamento uma vez que fornecem um dado de saída de natureza elétrica a partir de uma informação não-elétrica de forma proporcional. A principal variável de interesse para o sistema eólico é velocidade do vento, que indicará o quanto o local é adequado para o sistema de aerogeração instalado. A velocidade do vento é medida pelo anemômetro, que por sua vez converte a informação de velocidade do vento em pulsos, os quais são entregues a entrada de pulso P1 do *datalogger*.

Outras variáveis não menos importantes são as pertinentes ao sistema hidráulico: pressão de vácuo, e vazão da bomba. Estas variáveis são entregues em sinal de corrente, de 4 a 20 mA, as quais são convertidas em sinal de tensão de 1 a 5 Vcc pelos resistores de 250 ohms; e então aplicadas ao atenuador CVD 20 que cuidará de convertê-las em sinais de tensão na faixa de 500 mV a 2500 mV através de uma rede resistiva de forma a condicionar o sinal ao nível apropriado às entradas do *datalogger*. O atenuador CVD 20 também recebe o sinal de tensão na faixa de 0 a 5 V, oriundo do tacogerador usado para medir a velocidade angular do rotor da bomba.

A medição das variáveis é realizada a cada 1 segundo e integrada a cada 10 minutos e armazenada na memória do *datalogger* CR10X estas podem ser lidas ou coletadas via porta de comunicação diretamente pelo computador através do programa PC208. Este também serve para estabelecer os parâmetros do *datalogger* e abrir janelas na tela do monitor do PC para a visualização das medições em tempo real por meio da geração de gráficos. A figura 3.27 apresenta o gráfico gerado pelo PC208 que mostra as curvas de variáveis de processo, como vácuo, vazão, velocidade angular do rotor da bomba e velocidade do vento as quais fazem parte do sistema de eólico bombeamento.

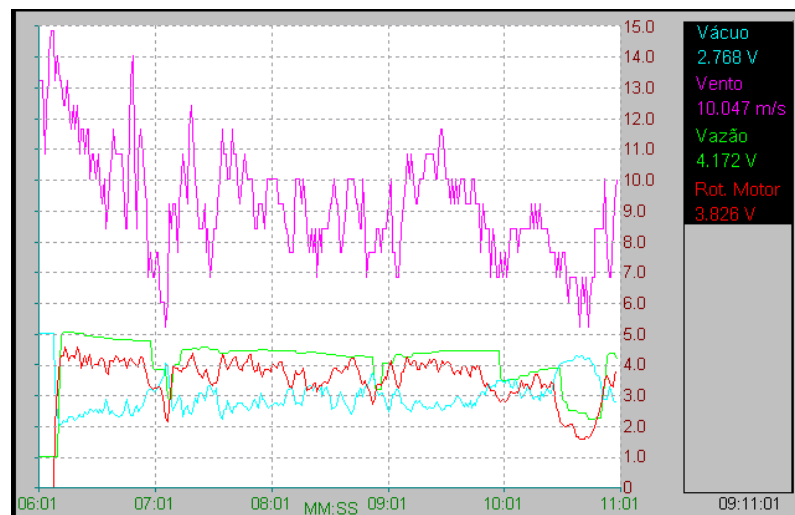


Figura 3.27 Gráfico gerado pelo PC208 das variáveis de processo [31]

Quando coletados os dados das variáveis armazenadas na memória do *datalogger* é gerado um arquivo com extensão DAT o qual uma vez transferido para o computador é posteriormente convertido em arquivo compatível com o Excel para visualização em planilha, análise e tratamento dos dados.

3.4.4 Sensores

Os sensores utilizados no sistema de aquisição de dados da planta da unidade eólica de bombeamento são sensores do tipo transdutor elétrico, pois convertem as grandezas físicas, como pressão, vazão e velocidade angular em grandeza elétrica em sua saída, a qual pode ser medida e registrada pelo *datalogger*. Deste modo, os transdutores são dispositivos sensores das variáveis físicas de natureza não-elétrica que participam do processo de transformação da energia eólica em energia hidráulica, os quais são provedores de informação para o sistema de aquisição de dados.

O *datalogger* recebe informação de quatro grandezas por meio de transdutores instalados em locais adequados de maneira que será feito um breve relato a respeito das características e função de cada sensor que compõe o sistema de aquisição de dados nos sub-ítem a seguir.

3.4.4.1 Anemômetro

O anemômetro tem por objeto medir a velocidade do vento no local onde se encontra a planta da unidade experimental eólica de bombeamento, e está instalado numa haste afixada na extremidade superior da torre do aerogerador e encontra-se afastado lateralmente da torre a uma distância de 3 m, como mostra a figura 3.28.

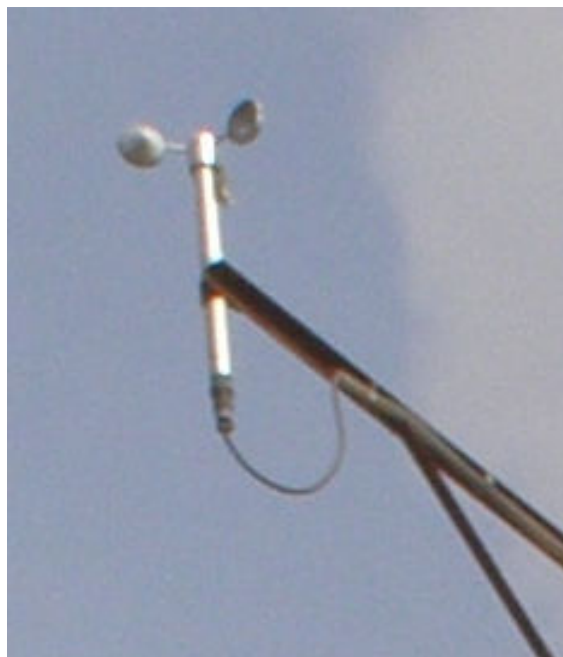


Figura 3.28 Anemômetro de conchas modelo Met-One 014 [32]

O anemômetro usado neste sistema é o tipo rotacional de contato a relé do tipo reed (*palheta*). O modelo utilizado é o Met-One 014A, fabricado pela Campbell Scientific, Inc. Este é implementado por três conchas. Seu sensor de velocidade é constituído por um contato enclausurado do tipo *reed* relé que é ativado magneticamente, cuja frequência de comutação do seu contato produz um sinal de saída em pulsos proporcional à velocidade do vento. O Met-One 014A, é especificado para medir velocidades do vento numa faixa de 0-45 m/s. Os pulsos disponibilizados na saída do anemômetro são entregues sem intermédio à entrada específica do *datalogger* para pulsos.

3.4.4.2 Tacogerador

Tem por finalidade coletar a informação de velocidade angular do eixo da bomba para as diversas condições de funcionamento da mesma e desta maneira permitir a verificação da relação que a variável rotação guarda com as demais variáveis do sistema. O tacômetro converte velocidade de movimento angular N em sinal de tensão E_g , proporcional à rotação.

O tacogerador foi implementado a partir de um micro-motor cc aproveitado de sucata, o qual teve seu eixo ligado mecanicamente ao eixo do motor da bomba. As figuras 3.29 (a) e (b) mostram a adequação necessária à implementação eletrônica do tacogerador, bem como do acoplamento na parte posterior do conjunto motor-bomba.



Figura 3.29 Em (a) micro-motor, e componentes eletrônicos em (b) componentes do acoplamento

Na figura 3.29 (a) são mostrados os componentes que formam o circuito eletrônico que condiciona o sinal de tensão gerado na saída do micro-motor, que operara como gerador.

Os resultados alcançados com o ensaio mostram um comportamento quase que linear, mostrando ser adequado o uso do micro-motor como tacogerador em termos de linearidade para certa faixa de rotações. O sinal de tensão produzido pelo tacogerador dispensa tratamento complexo, sendo necessário apenas à atenuação do nível de tensão E_g e a inclusão de um filtro adequado para eliminação da componente alternada e a atenuação dos sinais espúrios.

Na figura 3.29 (b) são exibidos elementos desenvolvidos com material alternativo, necessários à implementação do acoplamento entre o motor da bomba e o tacogerador. A suspensão do tacogerador foi desenvolvida a partir da fita metálica perfurada usada na suspensão dos tubos de PVC do sistema hidráulico. O tubo é automotivo, elaborado em borracha e dá ao acoplamento elasticidade necessária de modo a compensar o desalinhamento entre eixos do motor da bomba e do tacogerador. O adaptador foi usinado em ferro e tem um lado ligado a uma das extremidades do tubo, e a outro penetrado na fenda do eixo do motor da bomba. E, deste modo foi confeccionado o acoplamento entre tacogerador e o motor da bomba.

A figura 3.30 mostra o circuito elétrico concebido para o tacogerador.

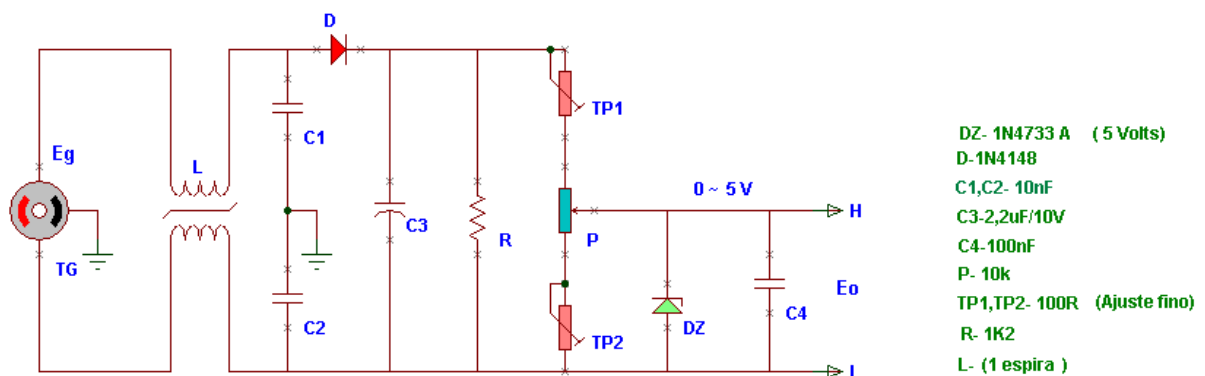


Figura 3.30 Circuito elétrico do tacogerador

O circuito elétrico do tacogerador tem como principal componente o micro-motor que entrega a tensão gerada E_g ao filtro de sinais espúrios que é elaborado em torno da indutância L e dos capacitores C_1 , C_2 e C_3 que mantém a flutuação da tensão E_g proporcional à rotação e ainda eliminando a componente alternada. O diodo D evita a inversão de polaridade na saída, a resistência R garante a descarga de C_3 . Quanto à adequação do nível de tensão gerada E_g é função da rede resistiva formada por TP_1 , TP_2 e P que constituem o atenuador. O diodo do tipo Zener, DZ ceifa em 5 V o sinal da tensão de saída E_o e C_4 constitui o filtro de saída.

3.4.4.3 Transdutor de pressão de vácuo

A pressão é a relação entre a força e a área sobre a qual a mesma atua. É normal medir a pressão em relação à pressão atmosférica que há no local, denominada de pressão efetiva, pressão relativa ou manométrica que pode assumir valor positivo ou negativo. Caso a pressão seja de valor menor que a pressão atmosférica é chamada de vácuo.

O sensor de pressão tem seu princípio de funcionamento baseado na deformação sofrida por um diafragma que se encontra diretamente em contato com o meio medido. À medida que a pressão altera seu valor, o diafragma deforma proporcionalmente, alterando o equilíbrio de uma ponte resistiva, mudando o valor da resistência de um dos braços da mesma. A variação do valor da resistência elétrica é proporcional à variação de pressão sobre o diafragma. Assim, o sensor de pressão de vácuo é do tipo Piezo-resistivo, o qual utiliza diafragma como elemento sensor.

O sensor de pressão utilizado pelo sistema de aquisição, conforme mostrado na figura 3.31, é um transmissor de vácuo, localizado na tubulação de sucção e tem por fim medir a pressão de sucção na entrada da bomba. Segundo manual do fabricante [35], o transmissor de vácuo modelo PA3029 faz medições na faixa de -1 a 0 bar, podendo operar com tensões de 9,6 a 32 Vcc e fornece um sinal analógico de saída em corrente de 4 a 20 mA ou 0 a 10 V, que varia proporcionalmente à pressão de vácuo, podendo funcionar a uma temperatura de -20° a $+90^{\circ}$.



Figura 3.31 Transdutor de pressão de vácuo [33]

3.4.4.5 Transdutor de vazão

A medida de vazão é tão importante quanto a do consumo de energia elétrica, para fins de contabilidade e para verificação da eficácia do processo. Vazão é a quantidade volumétrica de fluido em relação ao tempo. A medição da variável vazão é a única que necessita que o fluido esteja em movimento para que possa ser realizada, enquanto que as demais variáveis podem ser efetuadas com o fluido parado.

O sensor do medidor de vazão utilizado no sistema é o modelo 2537 do tipo turbina, a qual é constituída por uma roda com pás. A vazão da água agindo sobre a turbina impõe a ela um movimento angular de modo que este experimenta uma velocidade angular proporcional à vazão. A velocidade angular da turbina é convertida em sinal elétrico de corrente proporcional a vazão.

Conforme o manual do fabricante [34], o medidor de vazão pode ser parametrizado diretamente no local instalado através do uso da interface disponibilizada no próprio instrumento. A interface é constituída por duas teclas e um pequeno *display*, que permitem a parametrização do medidor de vazão sem qualquer equipamento externo conforme mostra a figura 3.32.



Figura 3.32 Medidor de vazão 2537 [34]

O medidor de vazão cobre uma ampla faixa de valores de vazão podendo ser parametrizado para estabelecer uma faixa de vazão entre 00000 L/h e 99999 L/h de forma tal que o sinal analógico em corrente de saída do transmissor seja respectivamente 4 mA e 20 mA, para uma faixa de tensão de operação de 12 a 32 Vcc e uma temperatura entre 0° e 65°.

3.5 Procedimentos para Escolha da Bomba

O dimensionamento de uma unidade eólica de bombeamento é imprescindível para se construir plantas eficientes, considerando-se a qualidade da água, a capacidade do poço e a necessidade de água potável da comunidade local, além de características regionais da velocidade do vento. No caso de dispositivos armazenadores de energia (bancos de baterias), a existência ou a ausência desses dispositivos influi essencialmente no projeto das unidades.

No entanto, o intento do projeto é avaliar o sistema eólico de bombeamento proposto pelo fabricante [22], denominado de GRB 246. Tal sistema utiliza o aerogerador GRW 246 de 1 kW, produzido pelo fabricante [22], o qual já se encontra em fase comercial, e um conjunto motor-bomba modelo CP-4R fabricado por [21]. Segundo o manual do fabricante [22] o aerogerador GRW 246 teve seus enrolamentos modificados para alcançar 220 V a 60 Hz, de maneira que este tem condições de alimentar um motor de indução trifásico 220 V para acionar bomba de 1/2 cv e em locais de ventos médios ou com rajadas, é possível o emprego de uma bomba de 1/3 cv [22].

Conforme [2], o projeto de um sistema eólico de bombeamento exige informações específicas sobre o local onde será instalado o sistema, tais como a altura, vazão e capacidade da fonte (*poço*), curvas características detalhadas de uma família de bombas, e curvas da potência versus velocidade da turbina eólica. Os resultados satisfatórios serão obtidos apenas quando todos os componentes de sistema estiverem cuidadosamente combinados, ou seja, devidamente casados.

3.5.1 Escolha da bomba em Função das Características do Vento Local

Um procedimento de projeto possível é primeiro selecionar uma velocidade de vento v_m em que ambas a turbina eólica e a bomba possam operar em suas eficiências máximas. Esta velocidade de vento v_m estaria em algum lugar entre a velocidade de vento de partida e da velocidade de vento nominal da turbina. Assim, a bomba pode operar em torno do seu ponto de máxima eficiência para uma boa faixa de velocidades de vento. A velocidade de vento de interesse é a velocidade v_{me} a qual contribui para máxima energia durante o período. Segundo [2] se $f(v)$ é a função de densidade de probabilidade das velocidades de vento, então $v^3 f(v)$ é máxima para $v = v_{me}$. Quando $f(v)$ é dada pela função de Weibull.

$$v = c \left(\frac{2 + k}{k} \right)^{1/k} \quad \text{m/s} \quad (6)$$

Sendo:

- k é o parâmetro de forma;
- c é o parâmetro de escala.
- v_{me} é a velocidade de vento que produz a máxima energia, e é usada para determinar potência da turbina eólica [2].

Do conhecimento da altura de bombeamento de um dado local, acha-se a vazão Q que usa a potência da turbina. A potência de entrada P_m da bomba é dada por

$$P_m = \frac{\gamma Q h}{\eta_h} \quad W \quad (7)$$

onde:

- γ é o peso específico do líquido [kgf/m^3],
- Q é a vazão da bomba expressa em m^3/s ,
- h é a altura manométrica total em mca, e
- η_h é a eficiência da bomba.

A quantidade $\gamma Q h$ é a potência de saída P_h segundo [2]:

$$P_h = \gamma Q h \quad W \quad (8)$$

P_h é a potência exigida pela bomba para recalcar uma dada quantidade de água a certa altura. A eficiência mecânica está normalmente entre 0,9 e 0,95, mas pode baixar a 0,48. O uso de P_o assume que a bomba possui uma eficiência apropriada para igualar a esta potência. Este passo pode precisar ser repetido se a eficiência de uma bomba proposta diferir significativamente deste valor assumido.

Pode-se escolher a velocidade real ou a velocidade específica da bomba e resolver para a outra velocidade pela Eq. 2. Deseja-se uma velocidade específica suficientemente alta para conseguir boa eficiência da bomba, como apresentado na figura 2.12, mas também se quer que a velocidade real seja tão baixa quanto possível para eliminar a necessidade de caixa de engrenagens ou estágios extras de aumento de velocidade, no caso do uso de caixa de engrenagens. Deve-se, consultar as folhas de dados de fabricantes para verificar se existe uma bomba que disponibilize os requisitos para encontrar a velocidade específica, altura, e capacidade para uma boa eficiência. Provavelmente seja necessário examinar unidades adjacentes em uma família de bombas para verificar se o ponto de projeto é bom. Em geral,

bombas de alta velocidade rotacional permitem uma dada capacidade com uma bomba pequena e menos cara, o que seria exigida mais do que para uma bomba com a mesma capacidade em velocidades mais baixas. Custo comercial entre um equipamento de relação mais elevada com caixa de engrenagens é mais caro e, bomba de velocidade mais alta é menos cara e deve ser considerada no projeto [2].

A relação de velocidade de ponta da turbina no ponto de projeto é:

$$\lambda = \frac{r_m \omega_m}{v_{me}} \quad (9)$$

Sendo:

- r é o raio da turbina em [m];
- ω_m é a velocidade angular em [rad./s];
- λ velocidade de ponta [adimensional].

A velocidade rotacional da turbina em rpm é então:

$$N_{tur} = \frac{30}{\pi} \omega_m \quad (10)$$

A relação de velocidade rotacional da bomba N_p está acima da velocidade rotacional da turbina e está um degrau acima na relação da caixa de engrenagens, N_p/N_{tur} .

Conforme [2] a potência mecânica de saída da turbina em uma atmosfera padrão é

$$P_m = 0,647 C_p A v^3 \quad \text{W} \quad (11)$$

Sendo:

- C_p é o coeficiente de desempenho [adimensional];
- A é a área varrida pela turbina em [m²];
- v é a velocidade do vento em [m/s];
- 0,647 equivale aproximadamente a $\rho/2$ neste caso $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

A velocidade de vento de projeto é selecionada usando a Eq. 5, mas é preciso avaliar a velocidade do vento de partida para achar o fator de capacidade. A velocidade do vento de

partida pode ser determinada extrapolando a constante das curvas de potência de entrada da bomba, voltando à zero no eixo das vazões e estimando a potência de entrada da bomba para especificar a altura. Esta potência é usada para achar velocidade de partida v_c na Eq. 10 [2].

A taxa de velocidade de vento é achada de maneira semelhante. Foi movido à direita, na figura 2.14, ao longo da linha de altura constante até alcançar o primeiro limite do sistema. Isto pode ser uma limitação da vazão da fonte de líquido, do torque ou limitação de velocidade da turbina, ou uma vazão que cause a *NPSH* (altura positiva do líquido de Sucção) disponível a ser excedido. A potência da turbina neste ponto é usada para achar v_r na Eq. 10 ao passo que o fator de capacidade CF é dado por

$$CF = \frac{\exp[-(v_u/c)^k] - \exp[-(v_R/c)^k]}{(v_R/c)^k - (v_u/c)^k} \quad (12)$$

onde

- v_c é a velocidade de partida da turbina [m/s] e

- v_R é a velocidade nominal da turbina [m/s];

A potência média de saída da turbina ou de entrada da bomba e a potência média de saída da bomba são dadas por:

$$P_{m,ave} = (CF)P_{mR} \quad (13)$$

$$P_{h,ave} = \eta_{h,ave}P_{m,ave} \quad (14)$$

Sendo:

- $\eta_{h,ave}$ é a eficiência média da bomba para a combinação, altura e características de vento.

Esta pode ser estimada pela fração do tempo operacional gasto entre velocidade de vento de partida v_c e a nominal v_R , para achar a potência correspondente. Lendo o conjunto de curvas, encontrar a eficiência da bomba em cada potência e tomar à média. Se isto for difícil demais, pode-se arbitrariamente assumir a eficiência média da bomba próxima à 80% ou 90% da eficiência máxima [2].

3.5.2 Escolha da bomba em Função das Características do Poço

O dimensionamento de um sistema de abastecimento de água consiste na determinação do “tamanho” do sistema que satisfará às necessidades do usuário, buscando otimizar os equipamentos para as condições locais. Devido à natureza aleatória da velocidade do vento e do comportamento dinâmico, tanto da fonte de água quanto do consumo, alguns cuidados devem ser tomados com o fim de otimizar holisticamente o sistema de abastecimento.

O diagrama esquemático, mostrado na figura 3.33 ilustra de forma didática a dinâmica de um sistema eólico de abastecimento de água.

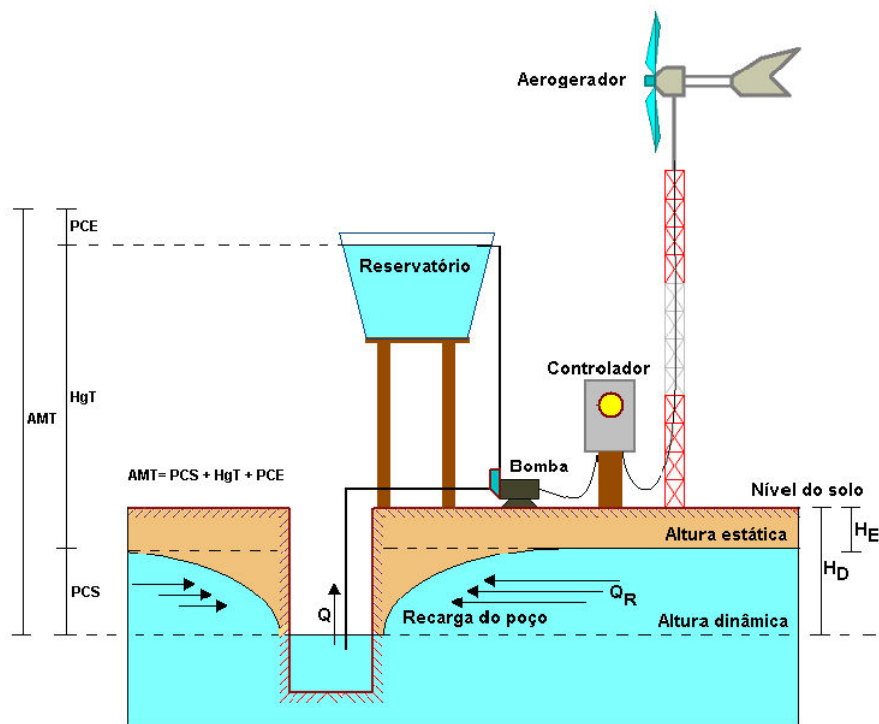


Figura 3.33 Sistema eólico-elétrico de bombeamento da água de um poço

Os principais elementos envolvidos em um sistema eólico de abastecimento de água são: o recurso eólico como fonte de energia, o poço como fonte de água, o sistema de bombeamento formado por aerogerador, condicionamento de potência (controlador), conjunto motobomba e o reservatório de água para atender a determinada demanda. A partir de determinada velocidade vento (m/s) e das características da fonte de água (vazão de recarga, Q_R , e altura manométrica total, AMT), dimensiona-se um sistema tal que permita o abastecimento da demanda (vazão diária, Q_d) para determinado número de dias de autonomia (capacidade do reservatório).

A figura 3.33 ilustra os principais parâmetros de um poço, no decorrer de um turno de bombeamento, utilizados no cálculo do dimensionamento de um sistema de bombeamento de modo que este é válido apenas para mananciais não confinados e não artesianos:

- Q é a vazão a ser extraída do poço [m^3/s];
- Q_R é a vazão de recarga do poço pelo aquífero [m^3/s];
- H_E é a distância entre nível estático, altura constante do lençol freático e a superfície do solo [m];
- H_D é distância entre o nível dinâmico, altura máxima variável do lençol freático quando extraída uma vazão máxima Q_M a superfície do solo [m];
- H_{gT} é a distância entre o nível estático do poço e o nível do reservatório e é denominada altura geométrica total [m];
- PCS é a perda de carga na tubulação de sucção [m];
- PCE é a perda de carga na tubulação de elevação [m];
- AMT é a altura manométrica total [mca].

Como mencionado em [35] e citado em [27], deve-se atentar para que

$$Q \leq Q_R \text{ e } (PCS + PCE) < 0,05. AMT \quad (15)$$

Em princípio, o dimensionamento de um sistema eólico-elétrico de abastecimento de água é de simples execução e consiste em um balanço energético, isto é, a energia demandada deve ser igual à gerada, para a realização de determinado trabalho, considerando as eficiências de cada elemento. Porém, em função da variabilidade dos parâmetros a serem usados e de sua determinação, isso pode não ser um simples trabalho.

Independentemente da ferramenta utilizada, para poder dimensionar um sistema eólico-elétrico de abastecimento de água é preciso definir, pelo menos, os seguintes parâmetros, ainda que por estimativas: demanda de água, parâmetros do manancial, recurso eólico, características do recurso hídrico, dias de autonomia ou probabilidade de déficit, cujas variações ocorrem em função da estação do ano, da sazonalidade do ciclo hidrológico, e do regime de bombeamento de reposição do manancial.

O projetista deve determinar as características de todos os componentes do sistema, para certa probabilidade de déficit (ou dias de autonomia) por ele determinada, o que implica que, para uma menor probabilidade de déficit, maior será o porte do sistema como um todo e, consequentemente, maiores os custos envolvidos. É importante atentar para o fato de que

tanto o superdimensionamento quanto o subdimensionamento podem ser prejudiciais. O primeiro, além de resultar em elevado custo de investimento, se não houver outro elemento restritivo (conscientização da importância do uso eficiente do recurso, algum controle no consumo, ou cobrança pelo uso da água), por envolver o risco do valor dado antes à água, ser reduzido a ponto de haver seu esbanjamento. O segundo por implicar em deficiência no serviço [35].

Os resultados oriundos dos ensaios realizados nas instalações da planta do sistema eólico de bombeamento de água descrita no Capítulo 3 estão apresentados no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA UNIDADE DESENVOLVIDA

No presente capítulo é apresentada a legitimação da teoria descrita nos capítulos anteriores, através da demonstração dos resultados alcançados experimentalmente com a planta eólica de bombeamento de água desenvolvida no LEA.

Como mencionado, para a mesma planta foram realizados diversos testes. Os testes foram elaborados por meio da alteração da configuração da tubulação de elevação, da medida da válvula de pé e da velocidade de rotação da bomba. Tais alterações foram efetuadas através da seleção das válvulas de elevação, por meio da troca da válvula de sucção de 25 DN por outra de 32 DN e pela alteração da frequência da tensão de alimentação do motor de acionamento da bomba. Para averiguação de resultados, foram adotados os planos de operação descritos na tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Planos de operação adotados para averiguação de dados.

Plano	Válvula de Pé (DN) Medida Usada	Válvula de elevação (DN) Selecionada*	Velocidade de Rotação do Impulsor (rpm)
1	25	VE 1	0 a 3.744 (0 a 65 Hz)
2		VE 2	
3		VE 3	
4		VE1, VE 2 e VE 3	
5	32	VE 1	
6		VE 2	
7		VE 3	
8		VE1, VE 2 e VE 3	

*Válvulas de elevação são de 25 DN; a válvula de elevação selecionada é mantida aberta e as demais fechadas

Cada um dos planos de operação estabelece uma condição hidráulica, a qual é imposta a bomba que por sua vez fornece como resultado valores de vazão diversificados em função da altura manométrica e da velocidade de rotação. A velocidade de rotação do impulsor da bomba depende da frequência da tensão fornecida pelo conversor de frequência ou do aerogerador, cuja, a tensão e frequência de saída, é função da velocidade do vento e da carga imposta pela bomba à turbina.

Vale salientar que, embora a disponibilidade potência nominal do aerogerador seja de 1000 W, para cômputo dos custos do sistema, deve-se considerar um de 400 W, desde que o conjunto motor-bomba requer uma potência nominal de apenas 368 W e demandou no máximo 395 W, conforme consta no item 4.2.2, afetando por demais o fator de capacidade do aerogerador. Assim, devem-se levar em conta os custos do sistema para o aerogerador com a

potência realmente necessária para o acionamento do conjunto motor-bomba da unidade, conforme os requisitos de dimensionamento (item 3.5).

Ressalta-se que não houve qualquer problema de ordem elétrica com respeito à utilização de um aerogerador de 1 kW para alimentar o conjunto motor-bomba de 0,36 kW, uma vez que os níveis de tensão do aerogerador e do motor são compatíveis.

Para a apuração dos dados nas diferentes estratégias de operação da unidade, coletaram-se todas as informações mencionadas no Capítulo 3, tais como vazão e pressão de vácuo na tubulação; velocidade de rotação do impulsor da bomba e potência elétrica absorvida pelo motor de acionamento da bomba, capturando-se estes dados por meio da realização de ensaios implementados através do acionamento do conjunto motor-bomba mediante o conversor de frequência ou o aerogerador para cada configuração estabelecida pelas válvulas de elevação apresentada na Tabela 4.1.

O uso do conversor de frequência no decorrer dos ensaios se deu devido à necessidade de se obterem referências, de modo facilitado em termos de valores de vazão, pressão de vácuo e potência absorvida pelo motor em função da velocidade de rotação do impulsor da bomba, ou melhor, em função da frequência da tensão de alimentação do motor. No decorrer do processo de medição das variáveis através de ensaios usando o aerogerador, foi registrado o valor da velocidade média do vento. No entanto, os dados de vento são coletados a cada 1 segundo e a média registrada a cada 10 minutos; sendo a velocidade do vento aleatória, a turbina pode experimentar uma quantidade considerável de velocidades de vento com valores bem diferentes neste intervalo de tempo. No entanto, o *datalogger* disponibiliza o registro apenas da média dos valores ocorridos. Assim, velocidades de vento elevadas, que perdurem por certo intervalo de tempo, dentro deste período serão despercebidas uma vez que a média engloba todos os valores, sendo suficiente um único valor de velocidade muito baixa diante de valores elevados para impor um baixo valor à média. Outro fator a destacar é o nível do poço, que também sofre alterações em sua altura durante o bombeamento implicando em certos momentos no registro de baixas vazões para elevadas velocidades do vento quando se esperava vazões mais elevadas, ou em baixa velocidade de vento vazões elevadas ao passo que se aguardava vazões mais baixas.

Assim, o uso do conversor para obter as referências foi providencial, pois contornou estes problemas e outras dificuldades encontradas no decorrer dos ensaios da unidade eólica de bombeamento de água para obtenção de referências que levassem a relacionar o valor da vazão da água bombeada para cada velocidade de vento que alcançasse a turbina do aerogerador.

O tratamento e a combinação dos dados coletados pelo sistema de aquisição permitiu a geração de gráficos que fornecem curvas das variáveis envolvidas no processo de conversão da energia eólica, em energia hidráulica. Assim, a energia de entrada do sistema é na forma eólica e em seguida é transformada por meio da turbina em energia mecânica na modalidade de torque girante, o qual é entregue ao gerador. Este a converte em eletricidade, que uma vez fornecida ao motor, converte-a em mecânica, a qual é utilizada para acionar a bomba, que a transforma em hidráulica. Essa energia é transmitida a água a qual sofre um deslocamento através do circuito hidráulico da instalação de bombeamento.

Assim, para se ter idéia do quanto de energia eólica disponibilizada em certa velocidade do vento é necessária para gerar uma determinada quantidade de energia em outra modalidade, foi necessário relacionar as grandezas físicas de outras modalidades, que participam do processo do sistema de bombeamento com a variável velocidade do vento. Desta maneira, as variáveis como rotação, potência elétrica, frequência, vácuo, vazão e pressão que participam do processo de conversão de energia eólica em energia hidráulica estão em função da velocidade do vento, que fornece a energia de entrada ao sistema de conversão.

Os resultados foram conseguidos mediante o registro das medições realizadas no local da instalação, os quais são apresentados nas seções que se seguem:

- Comportamento do vento para local: seção 4.1;
- A disponibilidade de energia elétrica em função do vento: seção 4.2;
- Comportamento da bomba em função da velocidade do vento: seção 4.3;
- Comportamento das variáveis não-elétricas do processo: seção 4.4;
- O volume de água bombeada e a energia gerada pelo sistema: seção 4.5 e
- Estudos relacionados à tubulação hidráulica da planta: na seção 4.6

4.1 Comportamento do Vento para o Campus do Pici

O comportamento do vento deve ser estudado e compreendido de modo a se poder realizar uma análise correta do desempenho do sistema de aerogeração. Assim, foram realizadas medições da velocidade do vento para se ter idéia do comportamento no local.

Os resultados aqui expostos refletem o resultado de dados coletados em alguns meses de medição da velocidade do vento através de uma torre anemométrica instalada na estação de pesca próximo ao açude do Pici. Para isso, foi utilizado um anemômetro tipo concha e os dados medidos foram armazenados no *datalogger*, o qual é programado para medir em intervalos de 1 segundo e armazenar os registros a cada 10 minutos, ou seja, 144 registros/dia.

No processamento dos dados foram levados em consideração fatores como características do local, distribuição da velocidade do vento e a energia disponibilizada pelo vento para o período em que foi realizada a medição.

4.1.1 Características do Local

Para avaliar a quantidade e qualidade da energia eólica em determinado lugar ou região, é preciso fazer um estudo das características do lugar. Um estudo relacionado ao local de instalação do aerogerador foi realizado, em que foram levados em consideração vários aspectos. A rugosidade do terreno foi um deles, uma vez que as características topográficas e orográficas afetam o comportamento do vento, já que o atrito do ar com a superfície da terra tem como consequência uma força horizontal sobre o deslocamento do ar que provoca um atraso do fluxo próximo ao solo.

A rugosidade do terreno é a influência da superfície deste e dos obstáculos, que tem como consequência o retardo da velocidade do vento próximo ao solo. No entanto nem todo elemento topográfico contribui para o aumento da rugosidade do terreno, visto que não produz aumento de turbulência, o qual é o caso dos morros longos lisos. Ao passo que construções e vegetações são exemplos de elementos de rugosidade. A rugosidade do local foi definida com base na classificação de Troen e Pettensen (1989) [36]. A tabela 4.2, mencionada por [3] onde o valor da rugosidade está relacionado ao tipo de área.

A rugosidade de um terreno é determinada pela dimensão e distribuição dos elementos que o formam. É normal parametrizar a rugosidade em uma escala de comprimento, denominada de comprimento de rugosidade z_o .

Assim, o valor da rugosidade que mais se aproxima da realidade local, de acordo com a tabela, pertence à classe 3 e possui valor de 0,4 m

Tabela 4.2 Classificação da superfície quanto à rugosidade

<i>Classe</i>	<i>z₀ (m)</i>	<i>Tipo de área</i>
0	0,0002	Com água, tais como mares e lagos
1	0,0300	Aberta com poucos quebra-ventos, plana ou levemente ondulada, podendo apresentar simples fazendas e árvores ou arbustos.
2	0,1000	Terrenos de fazendas com quebra-ventos afastados a mais de 1000 m entre si, e algumas construções espalhadas; caracterizados por grandes áreas abertas entre alguns quebra-ventos, com uma paisagem aberta; o terreno pode ser plano ou ondulado.
3	0,4000	Áreas urbanas, florestas e terras de fazenda com muitos quebra-ventos aglomerados, com separação média de poucas centenas de metros

Fonte: [3]

4.1.2 Turbulência

A turbulência do local é devido à grande quantidade de obstáculos que provocam oscilações na velocidade do vento e isto compromete bastante a coleta de vento por parte da turbina, de modo que afeta a qualidade da conversão eólico-elétrica. Segundo [37], a turbulência é a relação entre o desvio padrão da velocidade do vento e a velocidade média, e é dada por:

$$S = \frac{\sigma}{v} \quad (16)$$

Onde:

v_m - é a velocidade média do vento [m/s];

σ - é o desvio padrão da velocidade do vento [m/s] e

S - representa a turbulência.

Assim, a turbulência sofrida pela velocidade do vento pode ser obtida da relação entre os valores do desvio padrão e da velocidade média do vento, os quais são mostrados na tabela 4.3. A turbulência média anual é $S = 0,452$, a qual tem influência sobre o fator de forma K , que indica a concentração de certo valor da velocidade do vento para o local.

Tabela 4.3 Dados de vento correspondentes a 2010

	<i>JAN</i>	<i>FEV</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAI</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SET</i>	<i>OUT</i>	<i>NOV</i>	<i>DEZ</i>
<i>v_m(m/s)</i>	3,50	4,13	2,84	2,98	3,05	3,31	3,89	4,89	5,18	3,75	4,18	3,37
<i>σ (m/s)</i>	1,54	1,69	1,51	1,81	1,79	1,84	1,65	1,40	1,57	1,62	1,52	1,62
<i>S</i>	0,44	0,41	0,53	0,61	0,59	0,56	0,43	0,29	0,30	0,43	0,36	0,48

4.1.3 Distribuição de Weibull para a Velocidade do Vento no Local

A função de densidade de probabilidade de Weibull apresenta a distribuição da velocidade do vento para determinado lugar, e conforme [3] é expressa por:

$$f(v) = \frac{K}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^K} \quad (17)$$

Sendo:

$f(v)$ - função de densidade de probabilidade [adimensional];

v - Velocidade do vento [m/s];

K - fator de forma [adimensional] e

C - fator de escala [m/s].

Assim, para conseguir a função de Weibull específica para certo lugar é preciso conhecer os parâmetros v , K e C .

4.1.4 Fator de Forma K

O fator de forma é inversamente proporcional à variação da velocidade do vento representada pelo desvio padrão, que está relacionado com a intensidade de turbulência. Deste modo, quanto menor é a variação da velocidade do vento menor será a turbulência e menor é a dispersão dos valores da velocidade do vento e a intensidade de turbulência no local. Deste modo quando K assume valores mais elevados resulta num gráfico da distribuição da frequência mais concentrado. Segundo [3], o valor do fator de forma de Weibull K é fornecido por:

$$K = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1,086} \quad (18)$$

A figura 4.1 apresenta a variação do fator de forma ao longo de 2010 e mostra o quanto aumenta a dispersão dos valores de velocidade média do vento entre os meses de março e junho, em que K possui valores menores que 2,5. O valor de K volta a crescer em julho e permanece com valores acima de 2,5 até novembro, voltando a decrescer abaixo de 2,5 em dezembro.

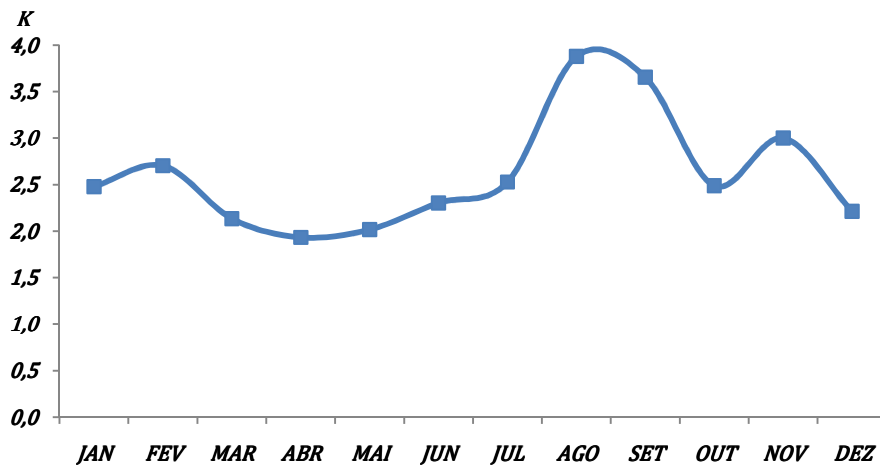


Figura 4.1 Variação do valor de k ao longo dos meses de 2010

Isto indica que o fator de forma K assume uma característica sazonal, uma vez que o maior índice de chuvas para a região ocorre normalmente no 1º semestre, sendo que no 2º semestre K alcança os maiores valores, época de pouca ou nenhuma chuva [38].

4.1.5 O fator de escala C

Há duas formas de se obter o valor do fator de escala C :

- Usando a relação de distribuição Gamma conforme [3] a qual é dada por

$$C = \frac{v}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)} \quad (19)$$

Onde: $\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)$ – é a função Gamma [adimensional] conseguida na tabela A.1 de [3],

- Ou como expresso por [2], empregando a relação entre o fator de escala C e a velocidade média v_m em função do fator de forma K por meio da equação

$$C = 1,12 \cdot v_m \quad (1,5 \leq K \leq 3,0) \quad (20)$$

Segundo [2], quando K assume valores abaixo da unidade, a relação C/v_m rapidamente diminui; no entanto, para valores acima de 1,5 e menos que 3, a relação C/v_m é essencialmente uma constante, em torno de, $C/v_m \cong 1,12$ Isto significa que o parâmetro de compensação C é diretamente proporcional à velocidade média de vento para esta faixa de K .

A maioria dos bons regimes de vento tem o parâmetro de forma K nesta faixa, então esta estimativa de C em termos de v_m possui larga aplicação.

A validade desta expressão pode ser verificada mediante a curva do gráfico da relação entre o fator de escala C e a velocidade média v_m em função do fator de forma K como mostra a figura 4.2.

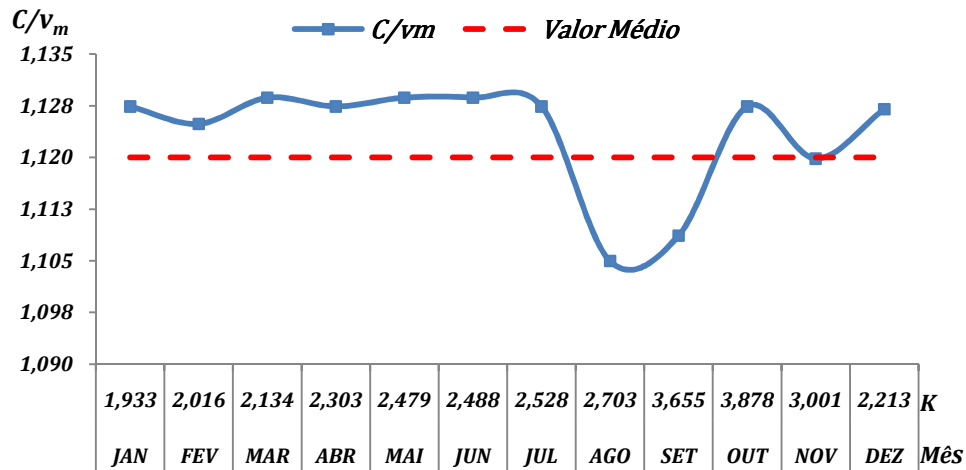


Figura 4.2 Relação C/v_m ao longo de 2010.

Nota-se que para os meses de agosto e setembro de 2010, a relação C/v_m adquire valores menores que 1,12 uma vez que a velocidade média do vento nestes meses foi mais elevada e dessa forma a curva C/v_m realmente experimentou um decremento. No entanto, ainda se manteve acima de 1,10, o qual não representa uma diferença tão elevada a ponto de inviabilizar a validade da Eq. 1. Assim, tal expressão pode ser usada para determinar o valor do fator de escala C em função da velocidade média do vento para todo o período de 2010.

4.1.6 Distribuição de Weibull em Função da Velocidade do Vento em 2010

O gráfico da distribuição de Weibull em função da velocidade média do vento e para os diversos valores alcançados por K a cada mês e adotando $C = 4,23$ m/s ao longo do ano para os meses de janeiro a dezembro de 2010 é mostrado na figura 4.3.

Uma vez aplicado o valor da velocidade média de 2010 na Eq. 19, no caso $V = 3,75$ m/s, obtém-se o valor do fator de escala $C = 4,20$ m/s, ao passo que quando usada a função Gamma $\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)$ é conseguido $C = 4,23$ m/s para o período.

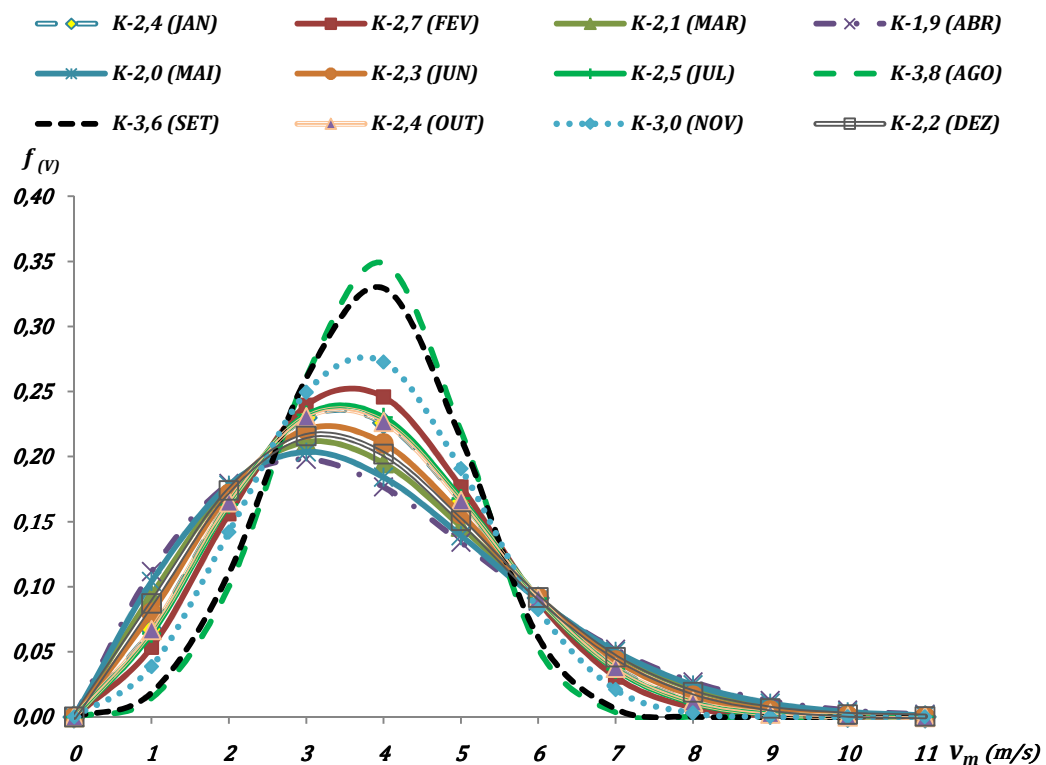


Figura 4.3- Distribuição de Weibull para diferentes valores de K em função da velocidade do vento

Os valores alcançados são bastante próximos de modo que, não comprometem a validade da Eq.17. Deste modo foi possível construir o gráfico que mostra as curvas que representam a variação do valor de K correspondente a cada mês em função da velocidade média do vento para o período onde C adquire valor único.

Conforme a figura 4.4, as curvas de março, abril e maio indicam maior concentração da velocidade de vento em torno de 3 m/s. A curva de janeiro, fevereiro, julho e outubro indicam maior concentração da velocidade de vento em torno de 3,5 m/s, e as curvas de agosto e setembro indicam concentração a cerca de 4 m/s. Outro fato é quanto à curva de outubro que demonstra comportamento da velocidade do vento coincidente com o de janeiro, tendo como resultado $K=2,4$.

4.1.7 Distribuição da Velocidade do Vento no Local para 2010

Os dados coletados de janeiro a dezembro de 2010 foram processados, tabulados e representados graficamente através do histograma, elaborado com base em intervalos de velocidade de 1 m/s. A figura 4.4 mostra o histograma da velocidade média do vento no local em estudo tanto quanto a curva de distribuição de Weibull.

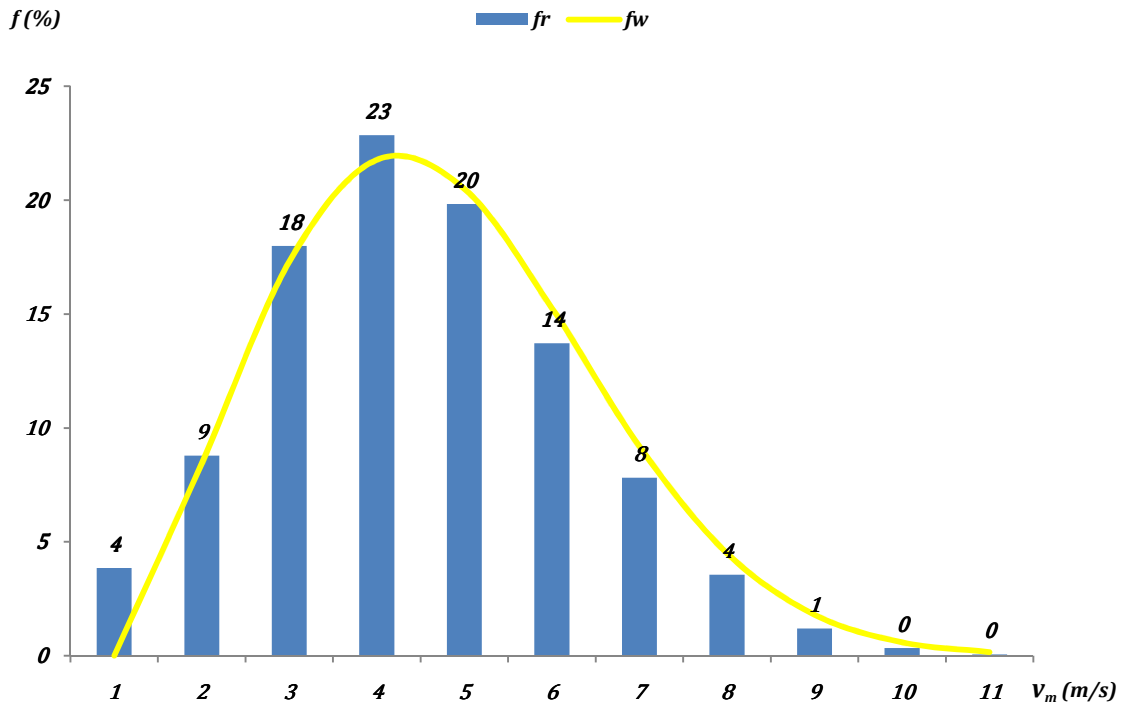


Figura 4.4 - Histograma e curva de Weibull em função da velocidade do vento para 2010

Com base na figura 4.5, se observa que a faixa de velocidade média do vento que ocorre com maior frequência encontra-se em torno de 4 m/s, que corresponde a 23% do período. No entanto, apesar da baixa frequência de elevadas velocidades de vento a ocorrência de ventos na faixa de 4 a 6 m/s, que é propícia à geração de energia elétrica ocorrem em torno de 56% do período.

A distribuição da velocidade do vento representada pelo histograma foi obtida dos dados de vento coletados do *datalogger*, quanto à função de densidade de probabilidade de Weibull foi calculada com base na amostra dos dados da tabela 4.4.

Tabela 4.4 Dados de vento para o período de 2010.

σ	v (m/s)	K	$\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)$	C (m/s)
1,781	3,752	2,246	0,886	4,234

Como se pode ver, não ocorre sobreposição perfeita da curva de Weibull com relação à curva do histograma produzida com os dados reais da velocidade do vento; porém também não se afasta demais comprometendo a sua aderência de modo a prejudicar a aproximação com os dados do histograma.

4.1.8 Valores Médios para o Local

Segundo [1], as principais manifestações da variação do vento se apresentam com característica sazonal, médias diárias e mensais são adequadas para elaboração de projetos confiáveis; as médias diárias para se verificar as horas do dia e as médias mensais para se observar os meses do ano onde ocorrerá menor ou maior disponibilidade de energia. A importância de tal observação dá-se devido à necessidade de se decidir pela inserção ou não de fontes complementares que possam prover os eventuais déficits de geração em épocas de menor disponibilidade do sistema de geração eólica. Assim, a forma mais usual de se analisar graficamente os dados estatísticos do vento é por meio de valores médios da velocidade do vento.

Um dia típico para o período de janeiro a dezembro de 2010, é representado pelo gráfico mostrado na figura 4.5, o qual mostra o comportamento diário da velocidade do vento.

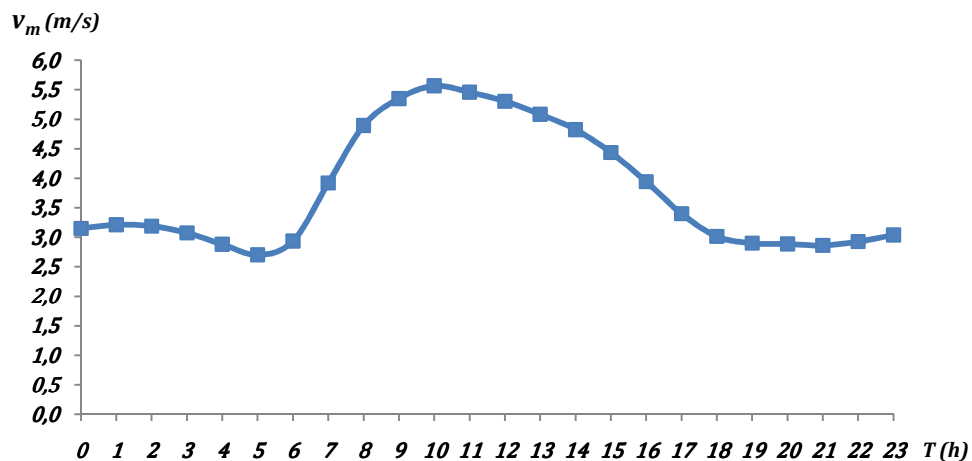


Figura 4.5 - Dia típico para os meses de janeiro a dezembro de 2010

Vê-se que entre 7 e 16 horas ocorrem as velocidades de vento maiores que 3 m/s e com maior concentração de velocidades médias em torno de 5 m/s entre 8 e 13 horas, suficiente para a produção de energia elétrica. Entre as 13 e 18 horas, a velocidade média decresce até 3 m/s e se mantém próximo a este valor até as 23 horas, voltando a aumentar um pouco acima de 3 m/s às 24 horas e vai abaixo das 3 às 6 horas, voltando a crescer novamente acima de 3 m/s.

A velocidade média de vento mensal para o período é mostrada na Tabela 4.3 e dá idéia do comportamento da velocidade média do vento a cada mês de 2010.

O comportamento mensal da velocidade média do vento para o período de 2010 mostra que no 1º semestre as velocidades médias mais elevadas ocorreram nos meses de janeiro e fevereiro. A velocidade média mais baixa foi 2,84 m/s e ocorreu em março, voltando a crescer a partir de abril e mantendo-se em crescimento até setembro. No entanto, a partir do mês de julho é que se verifica uma sensível melhora no crescimento da velocidade média do vento, que alcança valores acima de 4 m/s, perdurando até outubro. A ocorrência de velocidades médias mais elevadas deu-se nos meses de agosto e setembro. No mês de novembro, a velocidade média do vento foi similar a de fevereiro e para o mês de dezembro a velocidade medida foi próxima a de maio. A velocidade média do vento mais elevada do período de 2010 foi de 5,18 m/s e aconteceu em setembro.

Segundo [38], ventos de velocidades mais elevadas no litoral do estado do Ceará ocorrem com maior frequência no segundo semestre. Quando comparado com os resultados obtidos, isto demonstra que os valores medidos são compatíveis em termos de velocidade média para o período e o local onde se encontra instalado o aerogerador.

4.1.9 Energia Eólica Disponibilizada para o Período

A potência disponível no vento é proporcional ao cubo da sua velocidade; assim pequenas variações de sua velocidade representam grandes variações na potência disponível. Dispondo da densidade do ar do local onde se encontra o aerogerador e da área varrida pela turbina do aerogerador é possível obter a potência disponível no vento para o local e a potência de Betz por meio das expressões obtidas em [37]:

$$Pd = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (21)$$

$$PBZ = C_{PBZ} \cdot Pd \quad (22)$$

Onde:

Pd- Potência disponível no vento [W],

PBZ- Potência de Betz [W],

A- Área varrida pela turbina do aerogerador [m²],

v- Velocidade do vento [m/s],

C_{PBZ}- Coeficiente de potência de Betz , o qual vale 0,59 e

ρ representa a densidade do ar [kg/m^3].

Como a área varrida pela turbina do aerogerador GRW 246 em estudo é de $9,5 \text{ m}^2$ e a densidade específica do ar no local instalação da planta é de $1,16 \text{ kg}/\text{m}^3$, os valores da potência eólica disponível e a potência de Betz, em função da velocidade do vento são facilmente conseguidos, por meio das Eq. 21 e 22. Os resultados são apresentados pelas curvas do gráfico da figura 4.6.

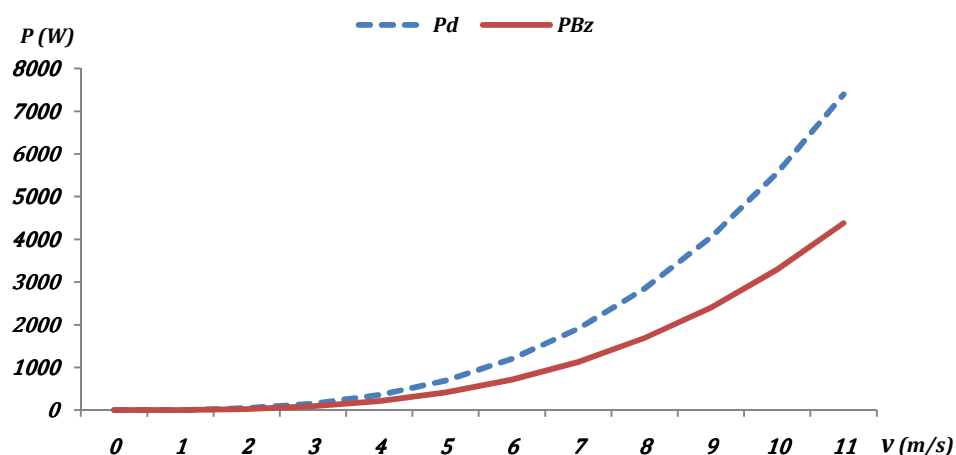


Figura 4.6 Curva de potência disponível no vento e potência de Betz

O gráfico da figura 4.6 mostra que a potência desenvolvida pela turbina ocorre para velocidades de vento acima de 3 m/s . A faixa de velocidade de vento que ocorre com maior frequência para o local encontra-se entre 4 e 5 m/s , 43% do período. Deste modo, conforme a mostrada pela figura 4.6, para esta faixa de velocidades potência eólica disponível pode variar entre 356 e 695 W e a potência de Betz está entre 211 e 412 W .

4.2 Disponibilidade de Energia Elétrica em Função do Vento

Para se ter idéia do quanto de energia elétrica é convertida a partir da eólica, recorreu-se a dois recursos, o primeiro, foi através do uso de curvas gráficas disponibilizadas pelo fabricante [22] do aerogerador, o outro foi o emprego dos dados elétricos conseguidos por meio do analisador de energia, um dos equipamentos que compõe o sistema de aquisição de dados. Os dados armazenados no analisador foram coletados, analisados e tratados, estes dados reais das variáveis elétricas foram associados aos dados das variáveis não-elétricas. Isto permitiu a construção de gráficos que apresenta as curvas de inter-relação entre as variáveis de processo.

4.2.1 Potência Elétrica na Saída do Aerogerador, e a Utilizada pelo Conjunto Motor-Bomba

O aerogerador é acionado pela turbina eólica e está encarregado de gerar energia elétrica através da conversão eletromagnética. O gerador deste sistema é um gerador síncrono de ímã permanente que consiste em um estator trifásico e um rotor com ímãs permanentes. O sistema magnético desta máquina é do tipo fluxo axial. Como este gerador é de baixa potência e opera no modo autônomo, seu acoplamento entre turbina e gerador é direto, evitando o uso de um sistema de transmissão via caixa de engrenagem.

O gerador produz uma tensão de saída de 220 Vca a 60 Hz, a qual por meio de escovas é entregue ao controlador de carga via cabo condutor tripolar e por fim ao motor que aciona a bomba. Este nível de tensão pode ser traduzido como vantagem, quanto à bitola dos condutores, mais finos.

Uma das principais características do gerador é sua potência elétrica de saída em função da velocidade do vento. As curvas de potência absorvida pelo motor P_m e a curva da potência de saída do gerador P_g , disponibilizada pelo fabricante do aerogerador em função da velocidade do vento que age sobre a turbina do aerogerador, são mostradas na figura 4.7.

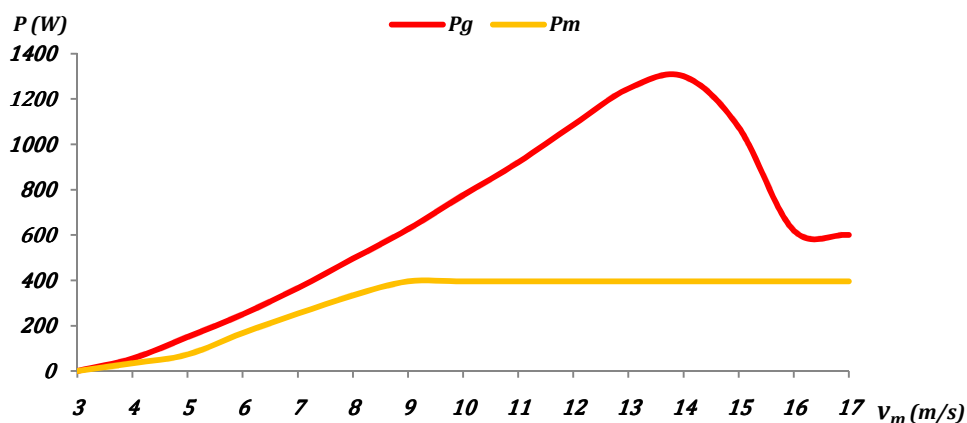


Figura 4.7 Curvas de potência do motor P_m e do aerogerador P_g em função da velocidade de vento.

Apesar da capacidade do gerador de disponibilizar potência nominal de 1000 W, não foi observado demanda de potência além de 395 W por parte conjunto motor-bomba uma vez que sua potência nominal é de 368 W.

O valor de potência de 395 W ocorre por ocasião de sobrecarga normalmente quando se dispõe de vazão em torno de 3,5 m³/h, a uma altura geométrica $DT= 3,9$ m e para velocidades de vento acima de 9 m/s. Com relação à potência absorvida pelo conjunto motor-bomba e a potência que o gerador é capaz de disponibilizar na saída, verifica-se que estas não crescem linearmente em relação à velocidade do vento e ambas as curvas se afastam com o incremento da velocidade do vento.

Como exemplo, é suficiente notar que quando a velocidade do vento que chega até a turbina do aerogerador é de 9 m/s a curva do gerador indica que este é capaz de disponibilizar na saída uma potência de 695 W, mais elevada que a potência nominal do motor. Porém, a curva de potência absorvida pelo motor indica que foi requerida no máximo 395 W do gerador. Isto demonstra que o motor não é uma carga linear e está sujeito às condições operacionais da bomba, que por sua vez sofre influência da altura manométrica total da tubulação, que é função das perdas de carga e do nível estático do poço, em que o valor destas variáveis depende da vazão da bomba.

4.2.2 Energia Disponibilizada pelo Aerogerador

A Produção de eletricidade pelo aerogerador em um mês para uma determinada velocidade média de vento é dada pela curva do gráfico da figura 4.8, fornecida pelo fabricante.

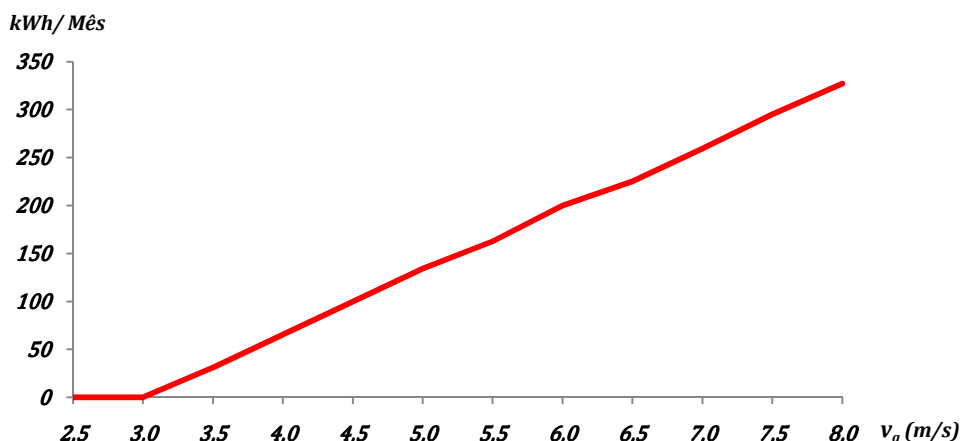


Figura 4.8 Produção energética mensal do GRW 246 em função da velocidade média [23]

Conforme os dados de vento, a velocidade média anual do vento no local está fortemente inclinada a permanecer em torno de 3,75 m/s e com base na curva energética da figura 4.8, é possível estimar que o gerador produza uma quantidade de energia elétrica de 48,5 kWh por mês. No entanto, quando é levada em consideração a distribuição das velocidades médias do vento no decorrer do período nota-se que a frequência em que ocorre cada valor de velocidade média do vento, é correspondente a certa quantidade de energia elétrica produzida.

As curvas, que representam o comportamento energético estimado para o aerogerador GRW 246, quando este alimenta carga nominal ou o conjunto motor-bomba, são mostradas na figura 4.9.

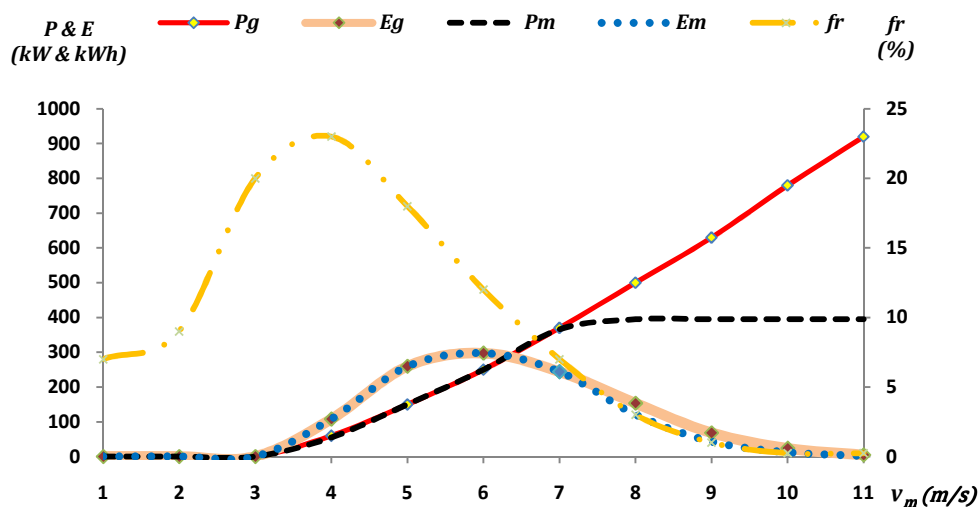


Figura 4.9 Comportamento energético do aerogerador em função da frequência de distribuição da velocidade média do vento

Tomando por base a curva de potência do gerador P_g , a frequência de distribuição, f_r da velocidade média do vento, v_m para o período e a potência, P_m demandada pelo conjunto motor-bomba é possível representar graficamente o comportamento eólico-elétrico do sistema de aerogeração em termos energéticos em que E_g é a energia produzida pelo gerador e E_m , a energia utilizada pelo motor. A figura 4.9 mostra as curvas do comportamento energético estimado em função da velocidade do vento e para duas condições de operação do gerador GRW 246: quando este suprir sua carga nominal, a qual corresponde à potência nominal gerada de 1000 W entregue pelo gerador, ou a potência utilizada pelo conjunto motor-bomba, que depende das condições hidráulicas e que pode alcançar até 395 W. Verifica-se que em termos de potência, o valor desta cresce linearmente tanto quando a carga estabelecida é a nominal ou quando é o conjunto motor-bomba, isto ocorre para velocidades médias de vento na faixa de 3 a 8 m/s. A partir de 8 m/s, a potência gerada pelo GRW 246 para carga nominal P_g cresce um pouco acima de 900 W ao passo que para o conjunto motor-bomba a potência entregue ao motor P_m pelo GRW 246 permanece no patamar de 395 W.

Tratando-se do aspecto energético nota-se que a faixa de velocidade média do vento entre 3 e 7 m/s é a que propicia o crescimento linear da quantidade de energia disponibilizada pelo GRW 246 tanto para carga nominal quanto para o conjunto motor-bomba. Acima de 7 m/s a quantidade de energia gerada E_g para suprir a carga nominal cresce um pouco a mais com relação à energia utilizada E_m pelo conjunto motor-bomba devido ao aumento da potência solicitada pela carga nominal. No entanto, estes valores de potência exigem elevada velocidade de vento e estas ocorrem com baixa frequência, onde se vê que a velocidade do vento de 6 m/s que corresponde a 12% da frequência para 2010 é a que disponibiliza a maior quantidade de energia para ambas as cargas.

Apesar da pouca ocorrência de velocidades médias de valor elevado, é possível verificar que o sistema consegue gerar uma quantidade significativa de energia. Acima de 200 kWh quando o aerogerador recebe ventos com velocidade média na faixa de 5 a 7 m/s, na qual disponibiliza energia capaz de acionar o motor. Esta faixa de velocidade média corresponde a 37,5% da frequência de distribuição da velocidade média do vento para o local em 2010.

Com base na figura 4.9, percebe-se que a diferença nos valores da quantidade de eletricidade disponibilizada pelo sistema eólico-elétrico através do gerador é muito pequena quando comparadas às demandas de potência de cada carga; seja a carga nominal ou a exercida pelo motor da bomba, ficando evidente a elevada importância da distribuição das velocidades médias do vento para o sistema de aerogeração em termos energéticos.

A quantidade de energia elétrica gerada pelo sistema eólio-elétrico é função da potência requerida pela carga nominal ou pelo motor da bomba e depende da quantidade de tempo em que permanece certo valor de velocidade média de vento. Assim, a quantidade de energia elétrica produzida pelo gerador foi estimada mensalmente em função da distribuição da velocidade média do vento e da potência elétrica absorvida pelas cargas estimadas. Os valores estimados da contribuição do gerador para carga nominal são apresentados na Tabela 4.5

Tabela 4.5 Estimativa de contribuição energética do gerador GRW 246 para carga nominal em 2010

PERÍODO	<i>Eg</i> (kWh)	<i>Eg</i> (%)	<i>Eg</i> (1/n)
JAN a JUN 2010	390	34	1/3
JUL a DEZ 2010	767	66	2/3
ANO 2010	1157	100	1

Diante dos valores considerados fica patente a contribuição de praticamente 2/3 da energia anual gerada no 2º semestre confirmando-a como a melhor época de bons ventos no decorrer do ano para o local. Quanto aos valores estimados da contribuição do gerador para o conjunto motor-bomba em energia elétrica são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Estimativa de contribuição energética do gerador GRW 246 para o motor da bomba em 2010

PERÍODO	<i>Em</i> (kWh)	<i>Em</i> (%)	<i>Em</i> (1/n)
JAN a JUN 2010	374	38	1/4
JUL a DEZ 2010	716	73	3/4
ANO 2010	1089	100	1

A estimativa do comportamento da produção de energia elétrica mensal gerada *EMG* pelo aerogerador para carga nominal a cada mês tanto quanto da energia elétrica mensal utilizada *EMU* pelo motor é mostrado pelas curvas da figura 4.10.

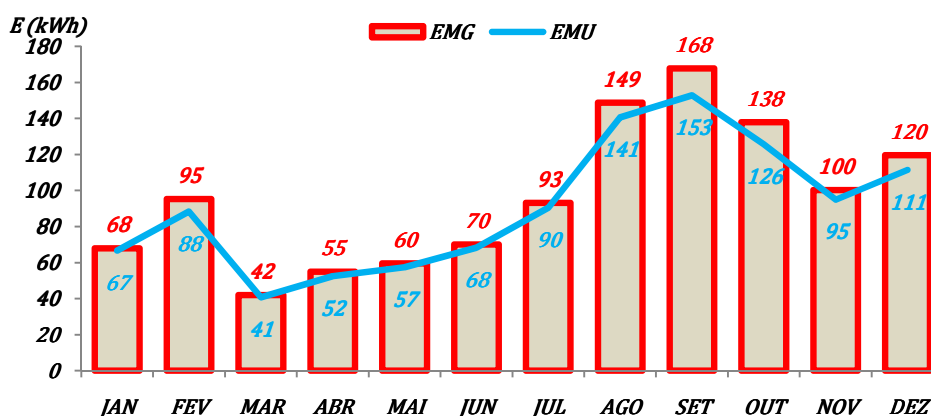


Figura 4.10 Estimativa da energia mensal gerada e utilizada mensalmente em 2010

A figura 4.10 demonstra a contribuição em energia elétrica para o período de janeiro a dezembro de 2010, a qual é estimada em 1157 kWh, onde se vê uma participação energética do aerogerador estimada em 34% no 1º semestre, e no 2º semestre participa com 66%. Deste modo, estima-se que a energia média gerada pelo sistema é de 96 kWh/ano para carga nominal e 91 kWh/ano para a utilizada pelo motor da bomba. Em termos mensais, o mês de março tem a menor participação energética ao passo que a maior é do mês de setembro.

4.2.3 Fator de Capacidade do Aerogerador

Sendo o fator de capacidade F_c a relação entre a potência elétrica gerada pelo aerogerador e produção, com potência nominal, esta é normalmente calculada anualmente, mas pode ser calculada para qualquer tempo. O fator de capacidade é grandemente influenciado pelo perfil do vento do lugar da instalação do aerogerador, visto que este afeta diretamente a energia gerada no ano.

Para o caso do sistema eólico-elétrico em análise, o fator de capacidade é bastante diminuto uma vez que este tem uma capacidade nominal de saída de 1000 W e as medições efetuadas através do analisador de energia não indicam potência de saída do gerador maior que 392,48 W. Além do mais, a faixa de velocidades médias 5 a 7 m/s, que contribuem com a maior quantidade de energia ocorrem 37,5% do período. A estimativa do fator de capacidade do gerador quando este fornece potência ao motor da bomba ou a carga nominal é apresentada semestral e anualmente na tabela 4.7.

Tabela 4.7 Fator de capacidade do gerador GRW 246 para carga nominal e o motor da bomba

PERÍODO	NOMINAL			MOTOR		
	<i>Eg (kWh)</i>	<i>TEMPO (h)</i>	<i>Fc (%)</i>	<i>Em (kWh)</i>	<i>TEMPO (h)</i>	<i>Fc (%)</i>
1ª SEMESTRE	390	4325	9,01	374	4325	8,64
2ª SEMESTRE	767	4391	17,48	716	4391	16,30
ANO	1157	8716	13,28	1089	8716	12,50

Dessa forma, para o primeiro semestre o fator de capacidade foi de 8,64%, sendo que para o 2º semestre o fator de capacidade foi de 16,3%, alcançando um fator de capacidade anual de 12,5%. Para o primeiro semestre, o fator de capacidade foi de 9,01%, sendo que para o 2º semestre, o fator de capacidade foi de 17,48% alcançando um fator de capacidade anual de 13,28%. Quando comparado o fator de capacidade para ambas as cargas verifica-se que a alteração do valor deste é bastante diminuta, já que para o gerador produzir 1000 W em sua saída seria necessário uma velocidade de 12 m/s. Isto confirma a forte influência da velocidade do vento no que tange o fator de capacidade.

4.3 Comportamento do Motor-Bomba em Função da Velocidade do Vento

Foram usados dados de velocidade de rotação do impulsor da bomba, vazão e potência absorvida pelo motor em função da velocidade média do vento, oriundos das medições realizadas entre 16 e 29 de janeiro de 2010, os quais foram coletados no *datalogger* e no analisador de energia. Os arquivos de dados extraídos do *datalogger* foram convertidos em planilha de texto, os quais foram tratados e diretamente convertidos em gráficos do tipo disperso ou empregados para elaborar histogramas que deram origem a outros gráficos. Em seguida, obteve-se a curva de tendência da qual se chega a uma equação polinomial que dá a idéia do comportamento destas variáveis, que são função da velocidade média do vento. Para a construção dos gráficos, foram usados dados reais advindos do *datalogger* sem nenhum tratamento e também obtidos após o tratamento dos dados advindos do *datalogger*.

4.3.1 Potência Absorvida pelo Motor em Função da Velocidade do Vento

As curvas de potência do motor foram construídas com base nas informações coletadas pelo sistema de aquisição dados. Os dados de potência foram conseguidos através do analisador de energia e os dados da velocidade média do vento por meio do *datalogger*.

As curvas de potência do motor em função da velocidade média do vento são mostradas nas figuras 4.11 e 4.12.

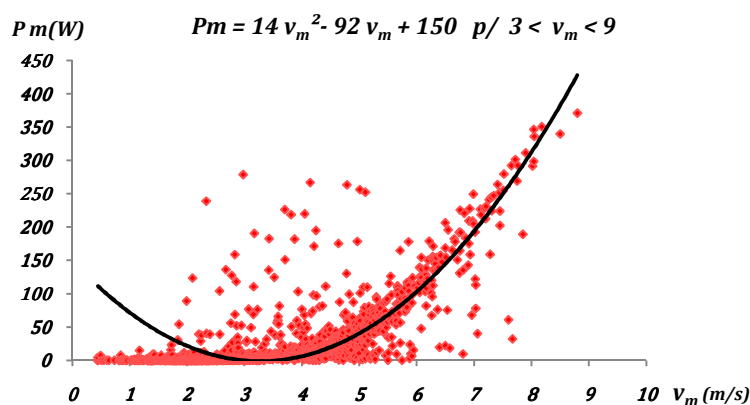


Figura 4.11 Curva da potência do motor em função da velocidade média do vento a partir de dados

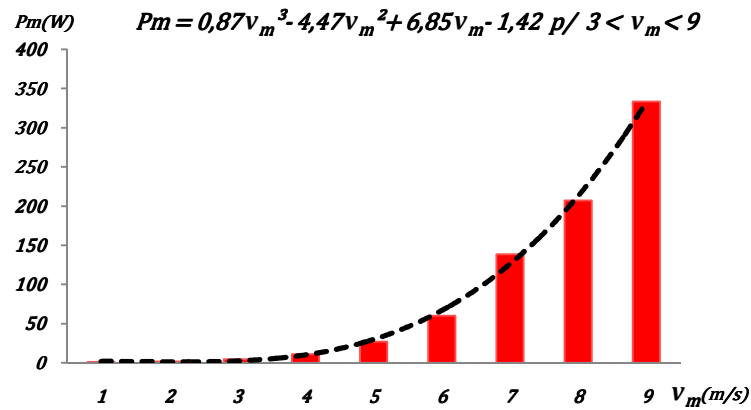


Figura 4.12 Curva da potência motor em função da velocidade média do vento gerada a partir dos dados

4.3.2 Curvas de Rotação.

As curvas de rotação do motor foram construídas com base nos dados de velocidade de rotação do impulsor da bomba, coletados pelo sistema de aquisição através do *datalogger* as quais são mostradas nas figuras 4.13 e 4.14.

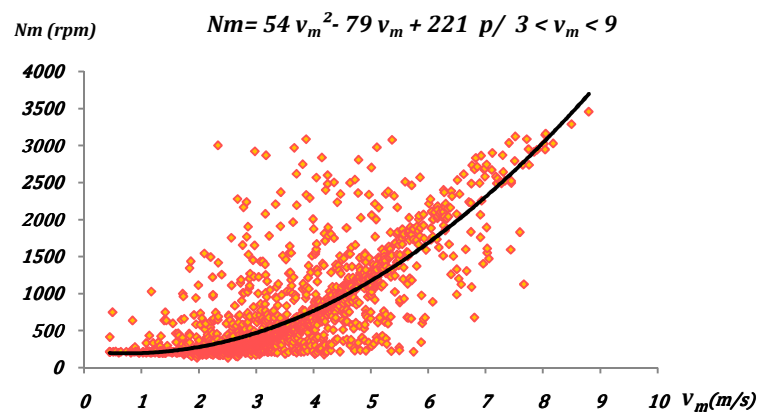


Figura 4.13 Curva de rotação do motor em função da velocidade média do vento a partir de dados

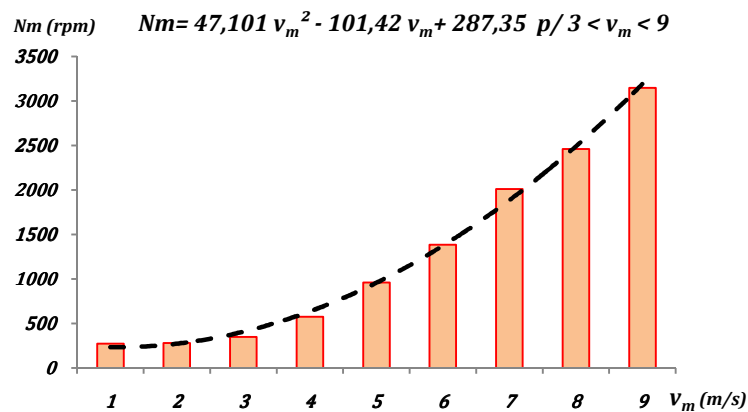


Figura 4.14 Curva de rotação do motor em função da velocidade média do vento gerada a partir dos dados

4.3.3 Curvas de vazão da bomba

As curvas de vazão da bomba foram construídas com base nos dados coletados pelo sistema de aquisição por meio do *datalogger*, as quais são mostradas nas figuras 4.15 e 4.16.

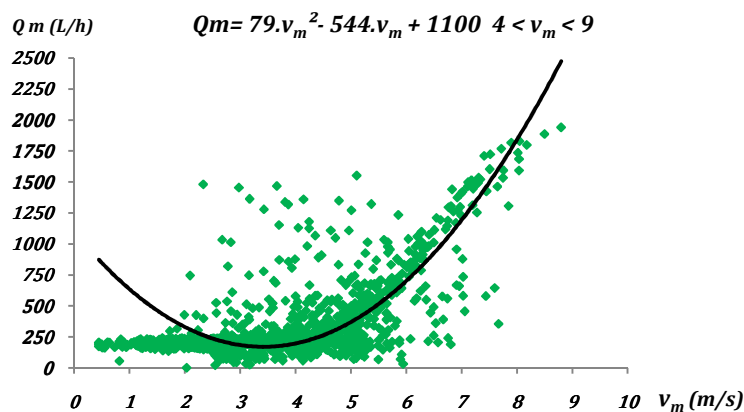


Figura 4.15 Curva da vazão da bomba em função da velocidade média do vento a partir de dados

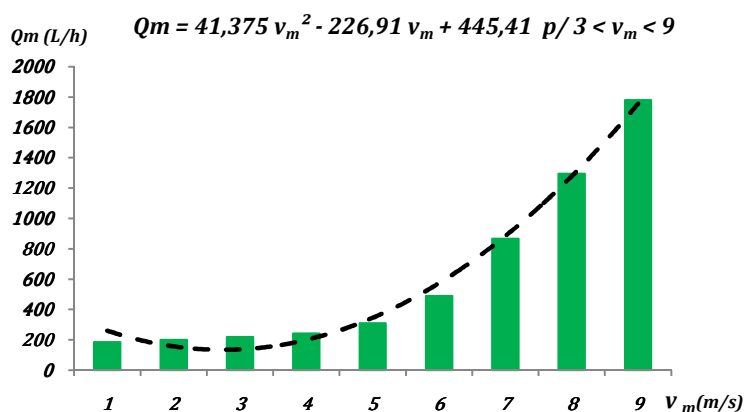


Figura 4.16 Curva da vazão da bomba em função da velocidade média do vento gerada a partir dos dados

Vale salientar que as equações conseguidas das linhas de tendência mostradas nos gráficos, são válidas para o sistema desde que utilizadas no intervalo crescente $3 < v_m < 9$, ou seja, para velocidades médias de vento maior que 3 m/s e menor que 9 m/s. Atendendo a esta restrição, são alcançados valores para as variáveis físicas desenvolvidas no sistema eólico-elétrico de bombeamento de água menos afastados da realidade.

Estes valores atribuídos à restrição são por causa da baixa frequência de valores de velocidade média acima de 9 m/s, em quanto para o valor de 3 m/s é a velocidade em que a turbina inicia a rotação.

4.4 Comportamento das Variáveis Não-Elétricas

O comportamento das variáveis de processo não elétricas registradas pelo *datalogger* podem ser visualizadas por meio de gráficos diretamente na tela do monitor do computador, através do aplicativo PC208W 3.0.

A figura 4.17 apresenta um dos gráficos utilizados para o levantamento das curvas das variáveis não-elétricas como: velocidade do vento instantânea v_i , vazão E_{Qg} , vácuo EVg e velocidade de rotação ENg do impulsor da bomba.

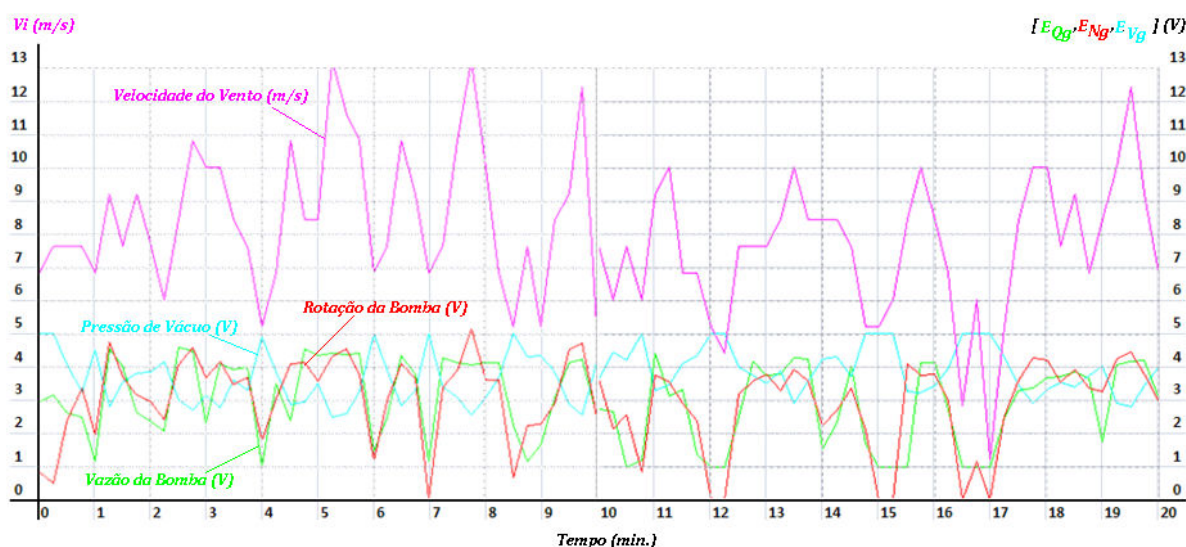


Figura 4.17 Curvas das variáveis não-elétricas em função da velocidade do vento

Estas curvas foram conseguidas em 20 minutos de observação tomadas a cada 1 segundo para uma faixa de velocidade de vento entre 4 e 12,5 m/s.

Os valores alcançados das variáveis estão associados às seguintes condições operacionais: válvula de pé 32 DN, e medidor de vazão G 3725, com alcance ajustado em 3500 L/h para uma altura geométrica DT de 4,20 m. As variáveis apresentadas pela figura 4.17 estão em sinal de tensão (V), exceto a velocidade do vento que é dado em m/s.

Os valores das variáveis foram adquiridos por meio de vários gráficos gerados em tempo real no decorrer dos ensaios de modo que foi coletado o valor da tensão de saída dos transdutores de cada uma das variáveis como: vazão, velocidade de rotação e pressão de vácuo em função de cada valor da velocidade do vento entre 4 e 12,5 m/s. Os valores destas tensões estão registrados na tabela 4.8.

Tabela 4.8 Variáveis de processo em sinal de tensão

v_i (m/s)	E_{Qg} (V)	E_{Ng} (V)	E_{Vg} (V)
4,0	1,1	0,8	4,9
4,5	1,4	1,0	4,8
5,0	2,0	1,5	4,6
5,5	2,3	1,7	4,5
6,0	2,5	1,8	4,3
6,5	3,5	2,0	4,2
7,0	3,6	2,5	4,1
7,5	3,2	2,9	3,6
8,0	3,8	3,5	3,2
8,5	3,9	3,6	3,1
9,0	3,9	3,7	3,0
9,5	4,2	3,8	3,0
10,0	4,3	3,8	2,9
10,5	4,4	3,9	2,8
11,0	4,5	4,0	2,7
11,5	4,9	4,2	2,6
12,0	5,0	4,5	2,4
12,5	5,1	4,6	2,3

Como os valores das variáveis são dados em sinal de tensão, foi necessário efetuar a devida conversão para a unidade conveniente de cada variável de processo; foram aplicadas as seguintes expressões para conversão:

$$Q = 0,875 \cdot E_{Qg} - 0,875 \quad (23)$$

$$P_V = 2,600 \cdot E_{Vg} - 12,800 \quad (24)$$

$$Nm = 958 \cdot E_{Ng} \quad (25)$$

Sendo:

Q – é a vazão [m³/h];

E_{Qg} – é o sinal de saída do transdutor de vazão [V];

P_V – é a pressão de vácuo [mca];

E_{Vg} – é o sinal de saída do transdutor de vácuo [V];

Nm – é a velocidade de rotação do impulsor da bomba [rpm];

E_{Ng} – é o sinal de saída do transdutor de velocidade de rotação do impulsor [V].

A pós, a devida conversão de unidade de medida das variáveis contidas na Tabela 4.8 foi gerada a tabela 4.9.

Tabela 4.9 Variáveis de processo em unidades de cada variável

v_i (m/s)	Q (m ³ /h)	N_m (rpm)	V_c (mca)	f (Hz)	N_g (rpm)	AMT (mca)	Ph (W)	P_m (W)	P_d (W)	PBz (W)
4,0	0,1	766	-0,3	13,3	134	2,5	1	2	176	105
4,5	0,4	958	-0,5	16,7	167	5,1	5	13	251	149
5,0	0,9	1437	-1,0	25,0	251	8,0	19	50	344	204
5,5	1,1	1629	-1,3	28,3	284	9,1	28	72	458	272
6,0	1,3	1724	-1,8	30,0	301	9,8	35	88	595	353
6,5	2,2	1916	-2,0	33,3	334	12,7	75	184	757	449
7,0	2,3	2395	-2,3	41,7	418	12,9	80	195	945	560
7,5	2,4	2778	-3,5	48,3	484	13,2	85	206	1162	689
8,0	2,5	3353	-4,5	58,3	585	13,4	89	213	1411	836
8,5	2,5	3449	-4,8	60,0	601	13,5	92	218	1692	1003
9,0	2,5	3583	-5,0	62,3	625	13,6	94	224	2008	1191
9,5	2,8	3593	-5,1	62,5	626	14,3	109	266	2362	1401
10,0	2,9	3640	-5,3	63,3	635	14,6	114	279	2755	1634
10,5	3,0	3736	-5,5	65,0	651	14,8	120	285	3189	1891
11,0	3,1	3832	-5,8	66,7	668	15,0	125	297	3667	2174
11,5	3,4	4024	-6,0	70,0	701	15,8	147	334	4190	2485
12,0	3,5	4311	-6,6	75,0	752	16,0	153	335	4761	2823
12,5	3,6	4407	-6,8	76,7	768	16,2	158	337	5381	3191
VALORES MÉDIOS										
8,3	2,24	2863	-4	50	499	12	85	200	2006	1189

As curvas apresentadas na figura 4.17 e os valores mostrados na tabela 4.8 foram obtidos sem a participação do analisador de energia. Assim, para alcançar o valor de potência elétrica absorvida pelo motor foi necessário calcular a potência hidráulica que a bomba forneceu à água. Deste modo, foram aplicados os valores de vazão e a altura manométrica total da instalação do sistema de bombeamento contidos na tabela 4.9, além dos valores do rendimento para cada valor de vazão da bomba. O rendimento foi conseguido por meio das curvas de performance da bomba disponibilizadas pelo fabricante [21]. A potência elétrica absorvida pelo motor é conseguida pela Eq. (6), no subitem 3.5.1.

Os valores de potência alcançados são bastante próximos dos conseguidos através dos ensaios realizados com o conjunto motor-bomba acionado pela rede elétrica nas mesmas condições operacionais. Não ocorrendo diferenças elevadas dos valores resultantes seja quando o conjunto motor-bomba é acionado pelo aerogerador ou pela rede elétrica através do conversor de frequência.

Com os dados contidos na Tabela 4.9 é possível se ter idéia do comportamento do sistema em vários aspectos e disponibilizar a construção de outras curvas que sejam necessárias a outras análises. Por exemplo, as informações da pressão de vácuo podem indicar as condições de operação da bomba em que esta esteja sujeita a cavitação para certa

velocidade de vento a uma dada vazão e a altura do nível da água do poço. A rotação do gerador em função da velocidade do vento pode ser usada para verificar o coeficiente de performance da turbina para estas condições de operação.

Com os valores das potências disponíveis na tabela 4.9 foram construídas as curvas de rendimento do sistema eólico-elétrico de bombeamento, em função da velocidade do vento, as quais são mostradas na figura 4.18.

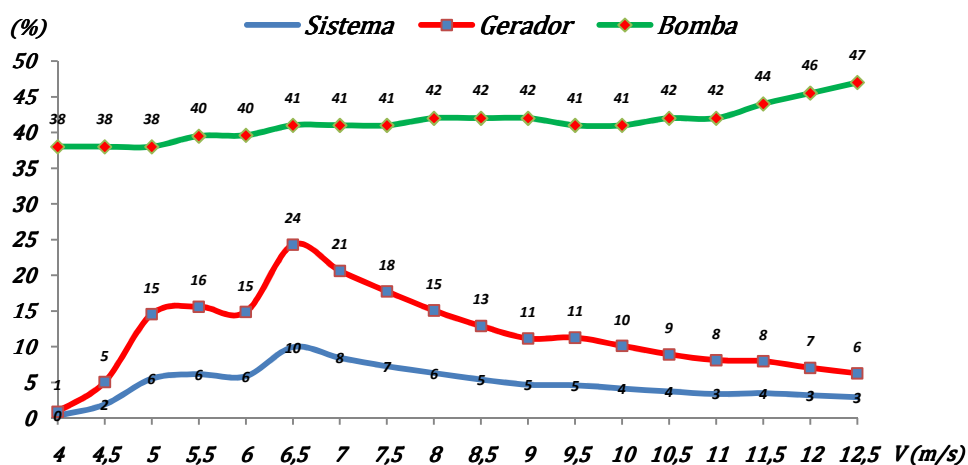


Figura 4.18 Curvas de rendimento em função da velocidade do vento local

Como se pode observar na figura 4.18, os melhores rendimentos ocorrem para faixa de velocidades entre 5 e 8,5 m/s. O rendimento médio do sistema é de 5% em termos de energia hidráulica, 12% em termos de energia elétrica com relação à energia disponível no vento. Com relação à bomba o rendimento médio foi de 41% em termos de energia elétrica transformada em hidráulica, para mesma faixa de velocidades.

4.5 O Volume de Água Bombeada e a Energia Elétrica Gerada

O volume de água bombeado depende das condições operacionais da instalação de bombeamento e da velocidade do vento. Além de estar sujeito também ao nível da água do poço. Foram realizados experimentos em que o sistema hidráulico foi submetido a condições diferentes. Estas condições foram estabelecidas mediante a troca das válvulas de pé e alteração da altura geométrica através da manipulação das válvulas de recalque. Tais alterações influenciam diretamente na altura manométrica da instalação; outro fator que contribui para modificar a altura manométrica é o nível da água do poço que varia no decorrer do bombeamento.

Diante do exposto, vê-se que o valor da vazão é dinâmico e deste modo a potência absorvida pelo motor e a vazão de água podem adquirir valores diferentes para uma mesma velocidade de vento. Para verificar o desempenho do sistema em termos de geração de energia elétrica e capacidade de bombeamento foram realizados ensaios em janeiro e novembro de 2010 os quais são descritos a seguir.

4.5.1 Ensaio Realizado em Janeiro de 2010

Os resultados alcançados em termos de comportamento da energia elétrica gerada, do volume de água bombeado em função da velocidade média do vento, e do tempo de operação do sistema para cada dia, são apresentados na figura 4.19.

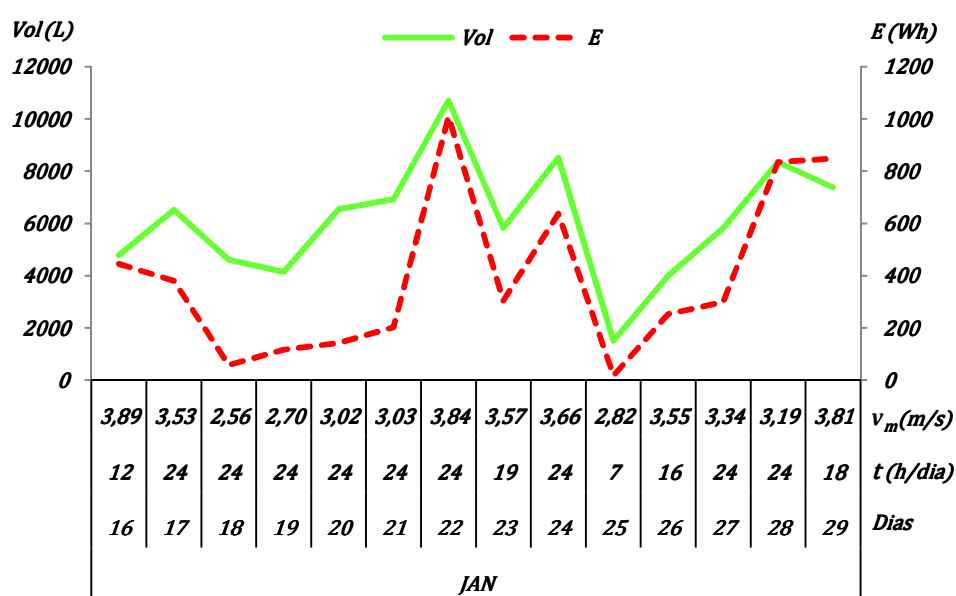


Figura 4.19 Volume de água bombeado e a energia produzida em função da velocidade média do vento (janeiro de 2010)

As medições foram efetuadas durante 14 dias entre os dias 16 e 29 de janeiro de 2010, a velocidade média do vento neste período foi de 3,5 m/s. Todas as medições foram realizadas em função da velocidade média do vento e da quantidade de horas diárias de operação. O sistema operou nas seguintes condições: altura geométrica $DT = 4,20$ m e empregou uma válvula de pé de 25 DN.

Isto mostra a dinâmica do sistema hidráulico, bem como o quanto o mesmo valor da média de uma faixa de velocidades, de vento pode conter uma grande variedade de valores de velocidade de vento mais altas, ou seja, apesar de diversos os valores de duas amostras de velocidade do vento, estas podem resultar numa média de mesmo valor numérico.

É mostrado também que o melhor desempenho do sistema ocorreu no dia 22 de janeiro, em que a velocidade média do vento foi de 3,84 m/s e a quantidade de água bombeada atingiu a marca de 10.698 L/dia. Neste período foram gerados 5.500 Wh de energia elétrica e bombeados 85.600 L de água em 275 horas de operação do sistema.

O volume de água bombeado é função de velocidade média do vento. No entanto, foi observado que para velocidades médias acima de 3 m/s, ocorridas em janeiro de 2010 surgem diferentes volumes de água, devido à instabilidade do nível de água do poço, conforme mostra a figura 4.20.

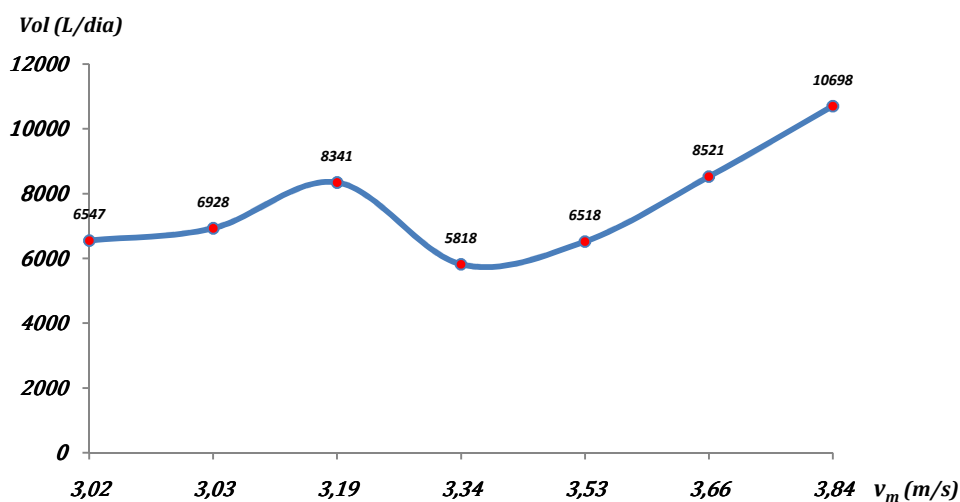


Figura 4.20 Volume de água bombeado em função da velocidade média do vento em torno de 3,37 m/s

A tabela 4.10 fornece o valor das quantidades de água bombeada e energia elétrica gerada em função da velocidade média do vento e do tempo de operação do sistema eólico de bombeamento.

Tabela 4.10 Energia elétrica gerada e a quantidade de água bombeada em janeiro de 2010

<i>DATA</i>	<i>T. OPERAÇÃO (h)</i>	<i>v_m (m/s)</i>	<i>Vol (L)</i>	<i>E (Wh)</i>
16	12	3,89	4787	445
17	24	3,53	6518	380
18	24	2,56	4606	58
19	24	2,70	4143	117
20	24	3,02	6547	143
21	24	3,03	6928	202
22	24	3,84	10698	1009
23	19	3,57	5827	304
24	24	3,66	8521	637
25	07	2,82	1507	17
26	16	3,55	3998	253
27	24	3,34	5818	300
28	24	3,19	8341	835
29	18	3,81	7380	848

Apesar das baixas velocidades médias de vento, os resultados das medições indicam que dentro da faixa de velocidades que se encontra média existem valores altos de velocidade que apesar da curta duração são suficientes para produzir energia em quantidade o bastante para acionar o motor. Isto demonstra que mesmo com um funcionamento aleatório, a energia eólica disponível pode ser armazenada na forma de energia hidráulica potencial por meio da acumulação da água em um reservatório elevado. Assim, quando se necessitar desta energia acumulada, é possível obtê-la na modalidade hidráulica.

4.5.2 Medições Realizadas em Novembro de 2010

Nestas medições, a válvula de pé de 25 DN foi trocada pela de 32 DN; sem, contudo alterar a configuração da instalação, que permaneceu semelhante à utilizada no mês de janeiro de 2010. No entanto, a título de experimento, o sistema de aerogeração foi submetido a operar sem a participação do controlador por dois dias. Isto foi conseguido por meio do fechamento dos contatos da chave magnética do controlador, de modo que foi estabelecido o acoplamento direto entre gerador e motor. Nesta configuração, foi observado que a turbina do aerogerador necessita de velocidades elevadas de vento para fornecer potência ao motor, o suficiente para pô-lo em funcionamento. Porém, para que o gerador vença a inércia da bomba é preciso que a velocidade do vento permaneça em valores elevados por maior quantidade de tempo. Na maioria das vezes a velocidade do vento varia muito de valor por causa da turbulência e se mantém em valor elevado por pouco tempo; isto resulta em dificuldade para o gerador vencer a inércia da bomba. As curvas da energia elétrica gerada e do volume de água bombeado são apresentadas na figura 4.21.

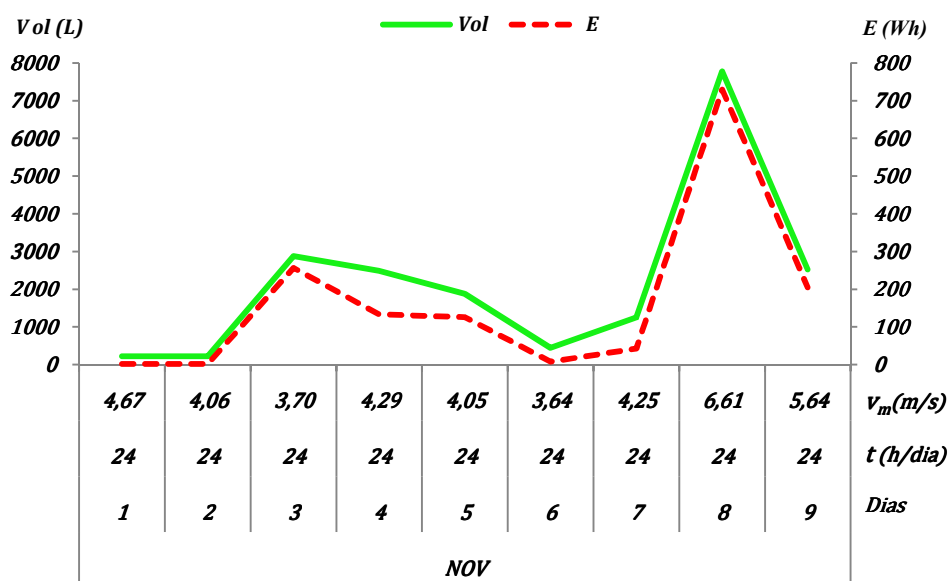


Figura 4.21 Volume de água bombeado e energia produzida em função da velocidade média do vento (novembro de 2010)

Através do gráfico da figura 4.21 é possível ver o efeito causado pela ausência do controlador no sistema de aerogeração durante os dias 1 e 2 de novembro de 2010.

Os efeitos foram percebidos através da pouca quantidade de energia elétrica gerada que resultou num baixo volume de água bombeado apesar da velocidade média de vento em torno de 4,4 m/s durante as 48 horas de operação sem a participação do controlador. Isto evidencia a importância da presença do controlador no sistema de aerogeração, pois se a turbina do aerogerador não consegue acelerar à baixas velocidades de vento, a bomba opera apenas em altas velocidades e isto é o suficiente para comprometer o rendimento global do sistema, pois as baixas velocidades de vento não são aproveitadas.

Com relação ao dia 8 de novembro, verifica-se que a energia gerada é bastante elevada relação aos demais dias haja vista que, para aquele dia a velocidade média de vento foi de 6,61 m/s, mais que suficiente para acionamento do motor. Durante o ensaio em velocidade instantânea verificou-se que ventos com velocidade entre 8 e 10 m/s podem impor ao motor potências entre 284 e 370 W.

Considerando que para estas velocidades o gerador é capaz de disponibilizar potências entre 277 e 775 W, de modo que existe a possibilidade de sobrecarga por excesso de energia aplicada. No entanto, o motor requereu apenas 353 W não se afastando da potência nominal de modo que não caracterizou uma sobrecarga.

Existe a possibilidade de surgir uma sobrecarga com relação ao nível estático do poço, caso este se encontre muito baixo e a turbina receba velocidades de vento elevadas;

naturalmente para compensar o aumento da altura manométrica e obter certo valor de vazão, a bomba deve solicitar maior quantidade de energia mecânica do motor que por sua vez requer mais potência elétrica do gerador.

O período de 1 a 9 de novembro de 2010 foram gerados 1.500 Wh de energia elétrica e bombeado 19.691 L de água em 216 horas de operação do sistema.

A tabela 4.11 fornece de modo resumido o valor numérico das variáveis, como volume de água bombeada e energia gerada em função da velocidade média do vento em 24 horas de operação diária, pelo sistema que operou de 1 a 9 de novembro de 2010.

Tabela 4.11 Energia gerada e a quantidade de água bombeada no período

<i>DATA</i>	<i>T. OPERAÇÃO (h)</i>	<i>v_m (m/s)</i>	<i>Vol (L)</i>	<i>E (Wh)</i>
1	24	4,67	224,87	1,76
2	24	4,06	223,56	1,76
3	24	3,70	2876,85	256,55
4	24	4,29	2490,54	133,71
5	24	4,05	1881,25	125,90
6	24	3,64	440,56	7,70
7	24	4,25	1252,13	42,39
8	24	6,61	7780,35	728,98
9	24	5,64	2520,88	204,50

4.6 Estudos Relacionados à Tubulação Hidráulica da Planta

Os ensaios de natureza hidráulica foram necessários para verificar o comportamento do sistema hidráulico e de seus componentes durante a operação, de modo a verificar as condições em que ocorre o melhor rendimento do sistema de bombeamento. Assim, foram realizados testes no circuito hidráulico em diversas configurações e condições de velocidade de rotação do impulsor da bomba. As alterações nas configurações e velocidade de rotação do impulsor da bomba foram conseguidas mediante o uso de válvulas e conversor de frequência, respectivamente. Os testes serviram para verificar o comportamento no que tange o valor da vazão em função da frequência da tensão de alimentação do motor para cada configuração em termos de altura manométrica promovida pela manobra das válvulas de elevação e troca da válvula de pé com medida de 25 DN por outra de 32 DN.

Para facilitar a compreensão dos estudos realizados com relação à tubulação que implementa o circuito hidráulico, os itens são apresentados a seguir:

- Modelo do sistema hidráulico da planta, em 4.6.1
- Perdas de carga em tubos e conexões da tubulação, em 4.6.2
- Ponto de operação do sistema de bombeamento, em 4.6.3
- Configuração do circuito hidráulico de elevação, em 4.6.4
- Rendimento e potência do sistema hidráulico, em 4.6.5 e
- Cálculo do NPSH, em 4.6.6

4.6.1 Modelo do Sistema Hidráulico da Planta

O modelo do sistema hidráulico é mostrado na figura 4.22, o qual é do tipo simples de *condutos ramificados*, conforme em [39]. Neste caso a vazão pode ocorrer simultaneamente nos três condutos, que estão em alturas distintas. A depender da pressão exercida sobre o ponto de conexão J entre os dutos de elevação. O valor da vazão que entra é igual à soma das vazões que saem. O valor numérico da vazão em cada duto de elevação é distinto e depende de pressão mínima no ponto de interconexão J , necessária para vencer a altura manométrica de cada duto de elevação a depender da condição das válvulas, se abertas ou fechadas. Desta maneira o valor da vazão na saída da bomba é proporcional à velocidade de rotação do rotor da bomba e da configuração estabelecida para o circuito hidráulico de elevação mediante a manobra de válvulas. Chegando certo valor de vazão no ponto de conexão J , esta se subdivide

nos três ramos, constituídos de tubos de elevação com comprimentos diferentes $CE1$, $CE2$ e $CE3$.

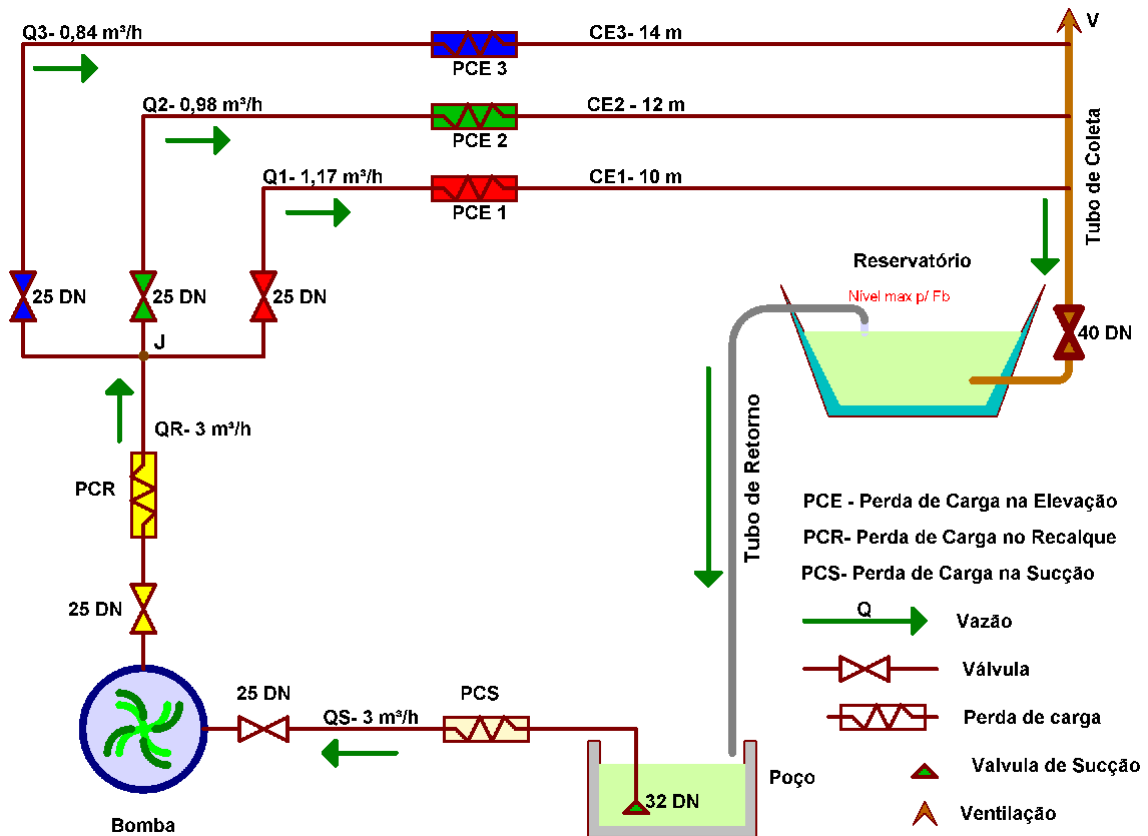


Figura 4.22 Modelo Hidráulico do Sistema de Bombeamento de Água.

A figura 4.22 e ilustra a subdivisão das vazões nos tubos de elevação de diferentes comprimentos e mesmo diâmetro quando a bomba injeta $3 \text{ m}^3/\text{h}$ na junção J .

Em se tratando do circuito hidráulico da figura 4.22, como todos os tubos de elevação estão em paralelo então o valor da perda de carga é a mesma em todos, deste modo a vazão total Q_R é:

$$Q_R = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (26)$$

Todos os tubos possuem diâmetro D , desta forma, é possível expressar o comprimento equivalente dos tubos de elevação em paralelo CEP por

$$CEP = \frac{1}{\frac{1}{CE1} + \frac{1}{CE2} + \frac{1}{CE3}} \quad (27)$$

Sendo $CE1$, $CE2$ e $CE3$ são os comprimentos equivalentes de cada tubo do circuito de elevação e representam a soma do comprimento C do tubo mais as perdas localizadas PL nas conexões. Os valores da vazão em cada tubo, Q_1 , Q_2 e Q_3 serão obtidos por

$$Q_1 = \frac{CEP \cdot Q_R}{CE1}, \quad Q_2 = \frac{CEP \cdot Q_R}{CE2}, \quad Q_3 = \frac{CEP \cdot Q_R}{CE3} \quad (28)$$

4.6.2 Perdas de Carga em Tubos e Conexões da Tubulação

A perda de carga é parte da energia inicial que se dissipa sob forma de calor no interior dos tubos e conexões e é causada pela resistência ao movimento do líquido. Assim, a mesma é desmembrada em duas componentes, as quais são denominadas de perda normal, (que ocorre nos trechos retilíneos dos tubos) e localizada (originada nas conexões). Os valores das perdas nos tubos variam com o comprimento, o diâmetro e natureza das paredes do tubo, bem como da velocidade do líquido e não depende da posição do mesmo. Segundo [42], a perda de carga por atrito PA em um tubo é a relação entre o produto do comprimento do tubo C pelo quadrado da vazão Q e a quinta potência do diâmetro D , expressa matematicamente por:

$$PA = \frac{C \cdot Q^2}{D^5} \quad (29)$$

Os tubos que formam a tubulação do sistema hidráulico são de 25 DN e estão sujeitos à perda de carga por atrito em função do valor da vazão, Com base na tabela de perda de cargas de [11] foi gerada a curva, mostrada na figura 4.23.

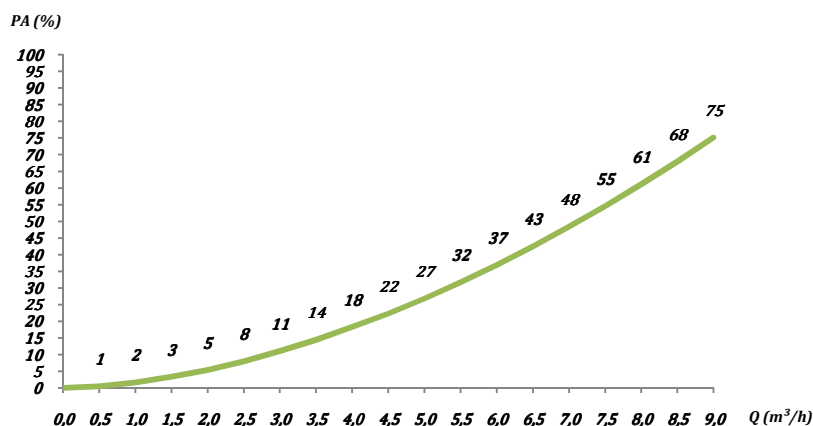


Figura 4.23 Curva da perda de carga para o tubo de 25 DN em função da vazão [11]

Fundamentado nos dados da figura 4.23, nota-se que para vazões acima de 3 m³/h as perdas por atrito nos tubos aumentam, acima de 11%. Isto reduz o rendimento do sistema hidráulico e compromete o rendimento global do sistema.

A importância da perda de carga é devido ao fato da mesma se manifestar sob forma de pressão contrária a exercida pela bomba, o que resulta na redução da vazão. A determinação dos valores de perda de carga, tanto quanto da altura manométrica total da instalação hidráulica foi conseguida através de cálculos baseados no esquema da tubulação apresentado na figura 4.24.

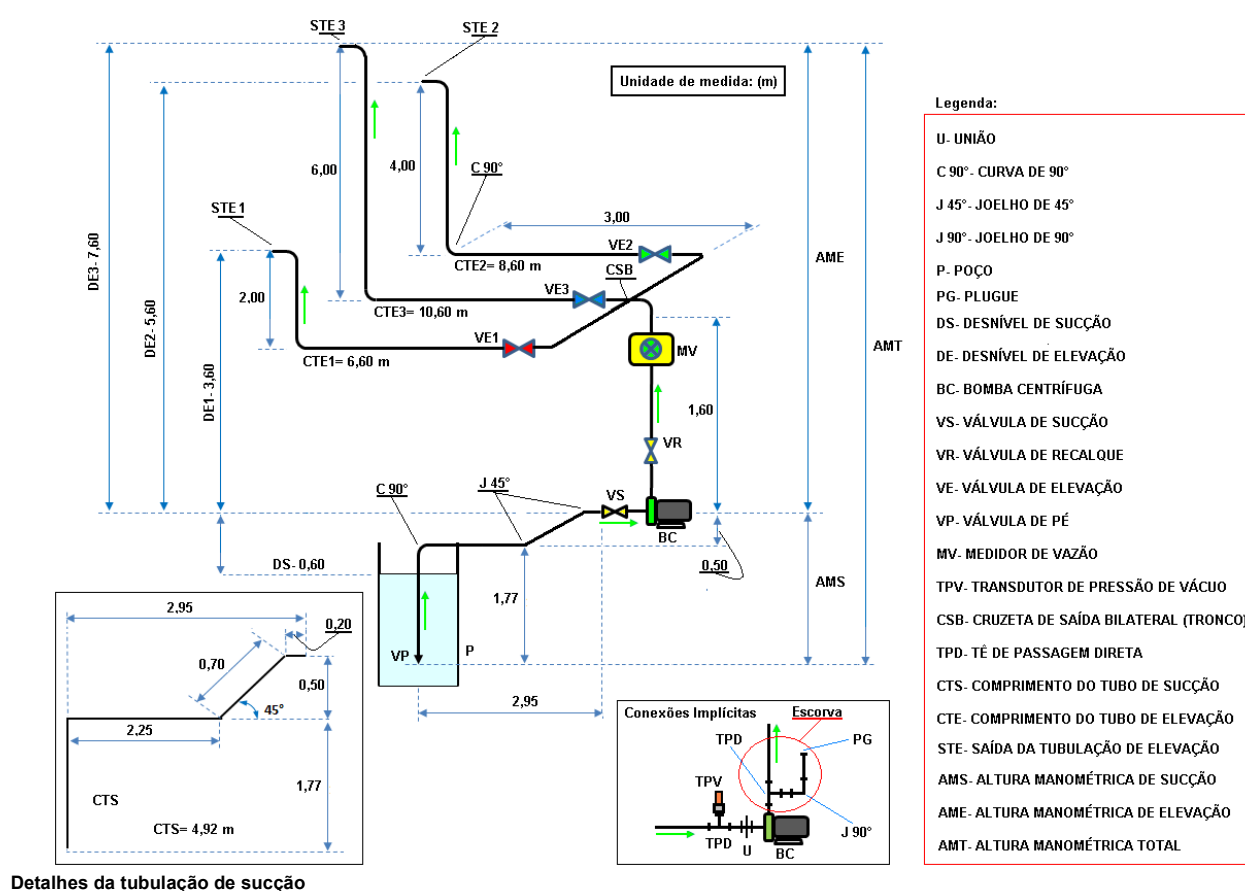


Figura 4.24 Esquema do sistema de tubulação utilizado para cálculo das perdas

Para evitar o excesso de perda de carga, se deve empregar o mínimo possível de emendas e conexões na tubulação a fim de minimizar o desperdício energético na instalação. As perdas de carga produzem uma altura virtual, que faz a bomba enxergar uma altura manométrica maior que a altura geométrica, no caso a altura entre o desnível de sucção e o ponto mais elevado da instalação, no caso a saída do tubo de elevação.

A figura 4.24 mostra de maneira simplificada, como os dispositivos que compõem o sistema estão distribuídos e interligados no circuito hidráulico. Alguns dispositivos não são mostrados no esquema principal devido a sua escala reduzida. No entanto, são apresentados por meio dos diagramas auxiliares os quais mostram de forma ampliada os símbolos destes dispositivos. Deste modo, o esquema do sistema de tubulação utilizado para o cálculo de perdas ilustra:

- o sentido do fluxo no circuito hidráulico por meio de setas,
- as válvulas de entrada e saída de líquido na bomba, VS e VR , respectivamente, as de elevação $VE3$, $VE2$ e $VE1$, a válvula de pé VP e o medidor de vazão MV ,
- os comprimentos dos tubos da instalação desde a sucção, atravessando a de elevação e indo até a de saída;
- as cotas de desnível de sucção e elevação.

De imediato, percebe-se por meio do esquema mostrado na figura 4.24, que o circuito é relativamente complexo, uma vez que o mesmo dispõe de uma razoável quantidade de elementos hidráulicos, sem contar que o mesmo possui muitas curvas para implementar desvios necessários para contornar obstáculos apresentados pela estrutura de alvenaria do cubículo; além de contar com diversos acessórios para interconectar ao circuito hidráulico da instalação os instrumentos de medição e controle de vazão. Diante do exposto, vê-se que a quantidade de perda de carga hidráulica é provocada pela presença destes dispositivos de conexão em adição a fatores relacionados às características do líquido, tais como peso específico e viscosidade.

Os valores das perdas de carga e as alturas manométricas correspondentes a cada desnível de elevação da instalação do sistema hidráulico foram determinados mediante o processo de dimensionamento sugerido pela Tabela de Seleção [21]; e o valor das perdas de carga localizada das conexões foi obtido na Tabela de Seleção de Bombas e Motobombas [11].

O processo de cálculo das perdas em tubos e conexões conforme [21] ocorre da seguinte forma:

- Determina-se o valor de desnível de sucção DS e o desnível de elevação DE ;
- Obtêm-se o valor do comprimento dos tubos de sucção CTS e dos de elevação CTE ;
- Determina-se o valor da perda de carga localizada PL somando as perdas individuais de cada conexão;

- Efetua-se a soma dos valores de CT e das perdas PL para determinar o comprimento equivalente CE tanto na canalização de sucção quanto na de elevação pela equação;

$$CE = CT + \Sigma PL \quad (30)$$

- De posse do valor de CE , multiplica-se pelo valor da perda por atrito na tubulação em função da vazão, PA para se conseguir a perda de carga dada pela expressão;

$$PC = CE \cdot PA \quad (31)$$

- Somando os desníveis DS e DE com as perdas de carga na sucção PCS e na elevação PCE , chega-se à altura manométrica de sucção AMS e à de elevação AME , respectivamente;

$$AME = DE + PCE \quad (32)$$

$$AMS = DS + PCS \quad (33)$$

- Somando AMS e AME , obtêm-se o valor da altura manométrica total AMT .

$$AMT = AMS + AME \quad (34)$$

Diante do exposto percebe-se que a altura manométrica total AMT é fortemente influenciada pela perda localizada das conexões, o comprimento dos tubos, os desníveis de sucção e elevação, as perdas por atrito nos tubos, que é diretamente proporcional à vazão, e as características do líquido bombeado, como peso específico, viscosidade e densidade.

4.6.3 Ponto de Operação do Sistema de Bombeamento

Os principais componentes do sistema de tubulação são as válvulas de elevação $VE1$, $VE2$ e $VE3$, de modo que por meio destas é possível estabelecer diferentes configurações para o circuito hidráulico e modificar o ponto de operação do sistema de bombeamento. O sistema de tubulação e a bomba foram avaliados através das suas curvas características para as diversas condições de operação em função da vazão no que tange respeito à altura manométrica. Assim, o ponto de operação do sistema de bombeamento é obtido pela intersecção da curva da tubulação ($AMT \times Q$) com a curva da bomba ($Q \times AMT$). Deste modo, cada condição de operação foi estabelecida por meio da permuta da medida da válvula de pé e

pela alteração da configuração do circuito hidráulico, mediante a manobra das válvulas de elevação VE que estabelecem as alturas geométricas totais DT , distintas que por sua vez são conseguidas pela equação:

$$DT = DS + DE \quad (35)$$

Os diversos valores assumidos por DT foram obtidos por meio da Eq. (35), como mostrados na tabela 4.12

Tabela 4.12 Desníveis totais em função da configuração das válvulas para vários desníveis de sucção

VÁVULAS DE ELEVAÇÃO (Abertas)	DS (m)	0,60	1,00	1,40	1,80	2,20
$VE1, VE 2, VE 3$	DT (m)	3,29	3,69	4,09	4,49	4,89
$VE 1$	DT (m)	4,20	4,60	5,00	5,40	5,80
$VE 2$	DT (m)	6,20	6,60	7,00	7,40	7,80
$VE 3$	DT (m)	8,20	8,60	9,00	9,40	9,80

Como se pode ver através da tabela 4.12, o desnível total DT ou altura geométrica total, apesar de poder ter seu valor estabelecido mediante o controle de fechamento e abertura de válvulas de elevação VE depende extremamente do desnível de sucção DS do poço. No caso em que o sistema de bombeamento é dimensionado para que a vazão de extração deva ser menor que a vazão de recarga do poço, nesta condição o nível estático do poço é permanente e desta forma o desnível de sucção não tem sua medida alterada resultando em desnível total estável.

Porém, em circunstâncias em que a vazão de extração é igual ou maior que a vazão de reposição, o nível do poço começa a diminuir durante o bombeamento até atingir o nível dinâmico. Conforme mencionado no subitem 3.5.2, é distância entre o nível dinâmico, altura máxima variável do lençol freático quando extraída uma vazão máxima Q_M e a superfície do solo. A alteração da medida do desnível de sucção DS do poço altera, portanto, o desnível total a qual assume diversos valores em função do desnível de sucção que varia entre 0,6 e 2,2 m. Os efeitos da variação do desnível de sucção são percebidos por meio da alteração da vazão indicada pelo medidor e no caso de poços rasos pode ser verificada a altura do nível da água do poço mediante inspeção visual. Apesar do desnível de sucção possuir tendência dinâmica, ou seja, variar a altura no decorrer do bombeamento durante os ensaios implementados, buscou-se estabilizar o nível do poço de modo a manter o desnível de sucção

constante. Isto foi conseguido por meio do tubo de retorno, de modo que os cálculos relativos ao circuito hidráulico são com base em uma altura de 0,6 m de desnível de sucção.

Várias curvas relativas ao sistema de tubulação e à bomba foram levantadas considerando a faixa de valores de vazão disponibilizada pelas curvas de performance da bomba e a capacidade de condução do tubo de elevação de 25 DN. Deste modo foram detectados vários pontos de operação para o sistema de bombeamento.

O gráfico apresentado na figura 4.25 expõe os pontos teóricos de operação do sistema de bombeamento para cada configuração estabelecida pelas válvulas de elevação *VE1*, *VE2*, *VE3* quando a válvula de pé utilizada é a de 25 DN. Nota-se que cada válvula que abre estabelece um ponto de operação distinto, sendo que para cada uma das válvulas que é aberta, duas permanecem fechadas. Deste modo o ponto de operação se desloca para direita do gráfico pelo aumento do valor das vazões e para cima pelo crescimento do valor da altura manométrica.

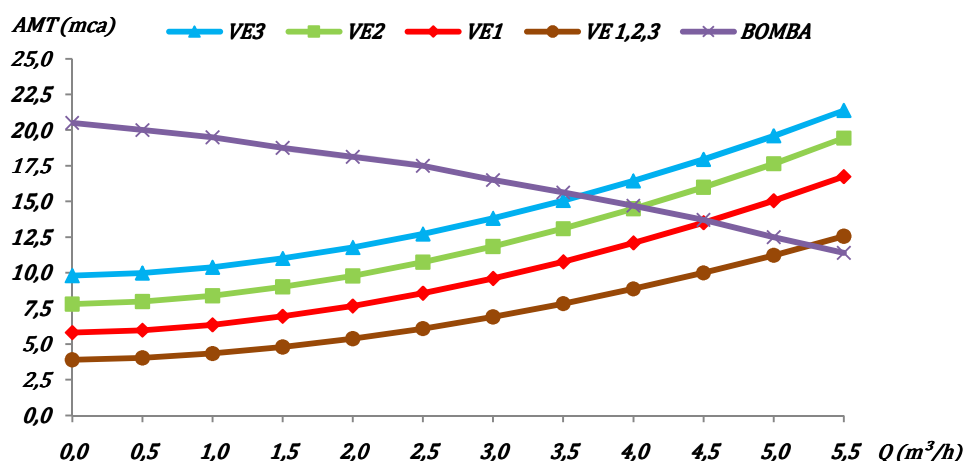


Figura 4.25 Pontos de operação quando do uso da válvula de pé de 25 DN

À medida que as válvulas são abertas, estas promovem a participação dos tubos de elevação no circuito hidráulico do maior comprimento para o menor; para isto a participação de cada válvula de elevação é iniciada com *VE3*, em seguida *VE2* e por fim *VE1*, permitindo que os pontos de operação teóricos ocorram a vazões máximas de 3,65, 4,10 e 4,60 m^3/h , respectivamente. Para a configuração em que todas as válvulas de elevação *VE1,2,3* participam do circuito, o ponto de operação ocorre a uma vazão de 5,25 m^3/h .

Os pontos teóricos de operação do sistema de bombeamento para cada configuração estabelecida pelas válvulas de elevação *VE1*, *VE2*, *VE3* quando a válvula de pé utilizada é a de 32 DN, são mostrados pelas curvas do gráfico da figura 4.26 e sua análise é feita da mesma

forma que para o gráfico da figura 4.25. As intersecções das curvas da tubulação promovidas pelas válvulas *VE1*, *VE2* e *VE3* e da bomba ocorrem quando a vazão atinge o valor de 3,60, 3,90 e 4,40 m³/h ao passo que a participação de todas as válvulas *VE1,2,3* o ponto de operação é obtido a 5,12 m³/h.

Como se pode verificar na figura 4.26, em termos de ponto de operação do sistema de bombeamento, os valores da altura manométrica total em função da vazão praticamente não são alterados quando se troca a válvula de pé de 25 DN pela de 32 DN. Donde se conclui que o sistema de bombeamento admite a troca da medida da válvula de pé sem apresentar qualquer restrição à tubulação de sucção e elevação implementada com tubo de 25 DN.

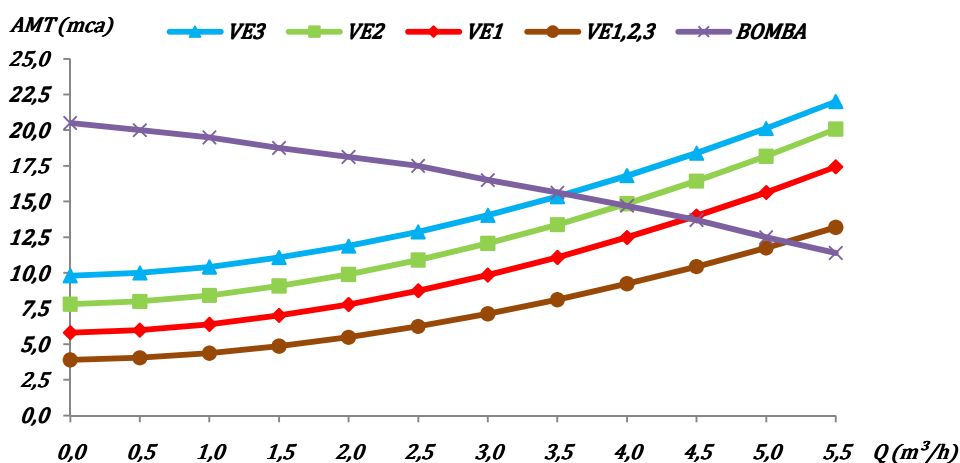


Figura 4.26 Pontos de operação quando do uso da válvula de pé de 32 DN

Porém, essa troca de válvula de pé de 25 DN por outra de 32 DN tem uma clara participação em termos de rendimento do sistema hidráulico, pois os valores de vazão obtidos com a de 32 DN são mais elevados, de modo que desencadeia alterações em outras variáveis que participam do sistema de bombeamento.

4.6.4 Configuração do Circuito Hidráulico de Elevação

A depender da configuração estabelecida na tubulação de elevação, da válvula de sucção utilizada e da frequência da tensão de alimentação do motor de acionamento da bomba ocorre na saída da bomba uma vazão correspondente. A cada configuração estabelecida para o sistema de tubulação constitui um circuito hidráulico o qual é implementado pela manobra das válvulas de elevação *VE1*, *VE2* e *VE3*. A variação de frequência da tensão de alimentação do motor de acionamento da bomba ficou a cargo do conversor de frequência.

A altura manométrica total é função do valor da vazão. No entanto para o caso do sistema proposto, a vazão também depende: da medida da válvula de sucção, da configuração da tubulação estabelecida pelas válvulas de elevação e da rotação da bomba. O motor experimentou freqüências de 30 a 65 Hz que corresponde a uma variação de rotação do impulsor da bomba de 1725 a 3738 rpm, respectivamente.

As válvulas de elevação participaram do sistema de tubulação estabelecendo para cada circuito constituído uma altura geométrica total DT distinta, conforme mostra a tabela 4.12

Assim para configuração A, DT é 3,29 m, para B DT é 4,20 m, para C DT é 6,20 m e para D DT é 8,20 m; de maneira que estas também são as alturas manométricas mínimas para cada configuração das válvulas de elevação para um desnível de sucção estável de 0,6 m.

Estas são as alturas a serem vencidas e demandam certa potência elétrica do motor no início da operação de modo que para cada altura desta é preciso certa potência de valor mínimo para acionar o motor. As curvas da altura manométrica total em função da vazão e da rotação da bomba relativas a cada configuração quando do emprego da válvula de pé de 25 DN são apresentadas na figura 4.27

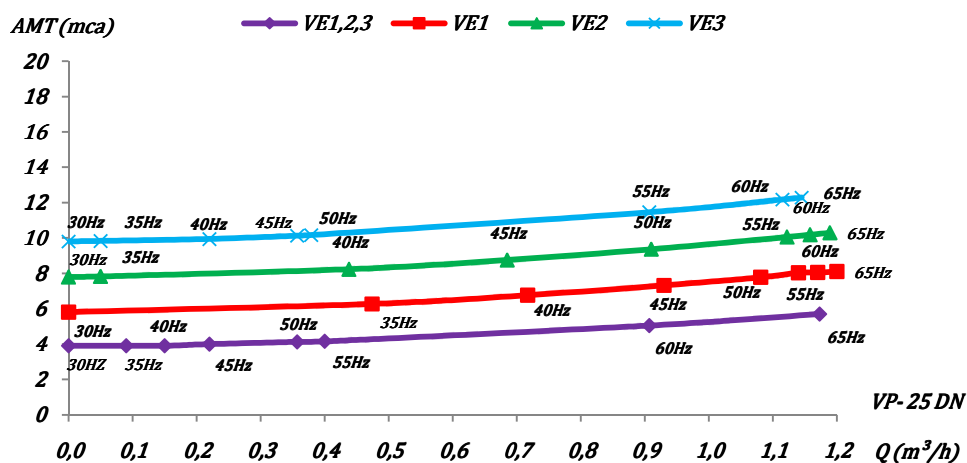


Figura 4.27 Curvas da altura manométrica em função da vazão e da rotação para VP 25 DN

Como pode ser visto no gráfico da figura 4.27, cada curva exprime o comportamento do sistema de bombeamento em termos de altura manométrica, vazão e rotação do rotor da bomba, com respeito a cada configuração estabelecida pela manobra das válvulas de elevação e válvula de pé adotada. Todas as curvas mostram que quando o motor é alimentado por uma corrente em 30 Hz, este não desenvolve velocidade de rotação suficiente no eixo do rotor da bomba para que esta vença a força antagônica exercida pela coluna manométrica dos tubos de elevação do sistema.

Para 35 Hz as curvas mostram que as configurações implementadas pelas válvulas de elevação *VE* permitem o sistema experimentar vazões abaixo de 100 L/h, exceto pela curva *VE1* a qual indica que o sistema de bombeamento experimentou uma vazão de 474 L/h uma altura manométrica de 6,27 mca. Nota-se que a configuração representada pela curva *VE1* apresenta o melhor desempenho em termos de vazão em função da frequência que varia de 35 a 55 Hz quando alcança a vazão de 1140 L/h.

A curva *VE2* apresenta um comportamento praticamente linear entre vazão e frequência na faixa de 40 a 55 Hz. Na curva *VE3*, a vazão chegou a 379 L/h quando a frequência atingiu 50 Hz e 1145 L/h a 65 Hz.

Quanto à curva *VE1,2,3* esta representa a configuração em que todas as válvulas de elevação estão abertas e esperava-se que vazões maiores ocorressem em frequências bem menores, apesar da coluna manométrica variar de 3,9 a 4,12 mca na faixa de 30 a 55 Hz. Assim, nesta nova condição, a bomba solicita potência elevada para vencer a elevada inércia causada pelo aumento da força peso exercida pela coluna. De sorte que tal configuração não se constitui vantagem em termos de vazão para o sistema uma vez que é preciso frequências elevadas para que seja iniciado o bombeamento de água pelo menos quando do uso da válvula de pé de 25 DN.

Com a adoção do uso da válvula de pé de 32 DN, as curvas apresentam um comportamento similar as curvas *VE1,2,3* produzidas com o uso da válvula de sucção de 25 DN. No entanto, para a nova condição, as vazões possuem intensidade duas vezes maior que a anterior. A curva *VE1* apresenta o maior ganho em vazão em baixas velocidades, pois a 30 Hz são bombeados 380 L/h e a 65 Hz a vazão alcança até 3000 L/h valores que não foram contemplados para a válvula de pé de 25 DN. Quanto às curvas *VE2* e *VE3*, o início do bombeamento só ocorre para frequências acima dos 35 Hz e a curva *VE2* apresenta vazões maiores para todas as frequências em relação à curva de *VE3*. A figura 4.28 apresenta as curvas obtidas quando do uso da válvula de pé de 32 DN.

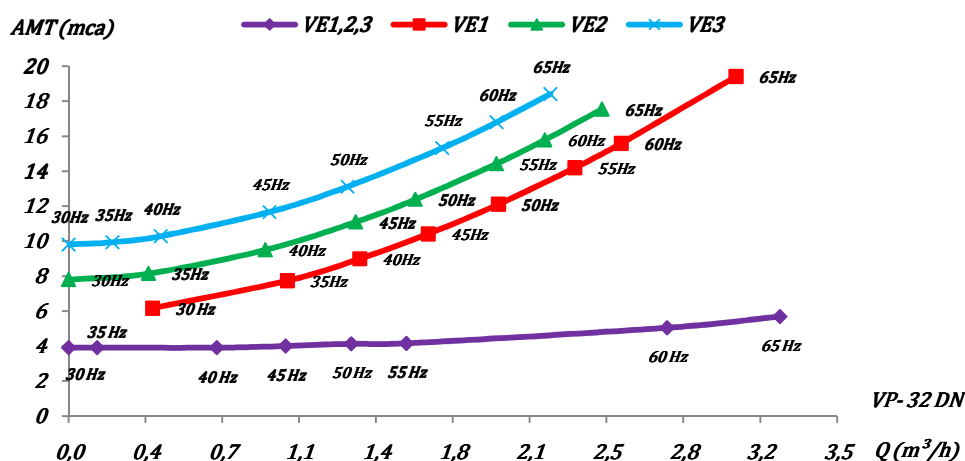


Figura 4.28 Curvas da altura manométrica em função da vazão e da rotação para VP 32 DN

Diante do exposto, com respeito aos gráficos apresentados nas figuras 4.27 e 4.28, fica clara a alteração nos valores das variáveis: vazão, perda de carga e alturas manométricas, na configuração em que participam todas as válvulas de elevação no modo aberto. Verificou-se que independente da configuração do circuito hidráulico, quando a velocidade de rotação da bomba é variável, ocorre que em baixas velocidades a vazão sucede apenas nas colunas de elevação de menor comprimento, mas com o crescimento do valor da velocidade esta vai aparecendo nas colunas de elevação de maior comprimento. Outro fato verificado foi a vazão estar relacionada à medida da válvula de pé, pois uma vez trocada, o valor da vazão alterou seu valor.

Observou-se ainda que por meio da variação da velocidade de rotação do rotor da bomba, pela manobra das válvulas de elevação e troca da válvula de pé de 25 DN por outra de 32 DN, a vazão experimenta uma grande faixa de valores; e ainda ocorre que para frequências acima de 55 Hz notou-se que para todas as válvulas de elevação abertas há escoamento em todas as colunas. O efeito promovido pela manobra das válvulas é percebido com mais nitidez.

4.6.5 Rendimento e Potência do Sistema Hidráulico

Durante os ensaios, a bomba experimentou diversos valores de rotação promovidos pelo conversor de frequência que acionou o motor em frequências que variaram de 25 a 65 Hz. O rendimento da bomba empregada na instalação do sistema eólico de bombeamento de água em análise é dado através das curvas mostradas na figura 4.29.

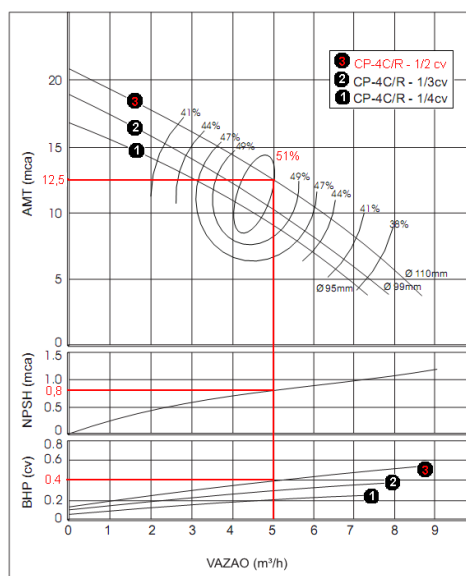


Figura 4.29 - Performance da bomba centrífuga modelo CP-4R [21]

Como se pode ver na figura 4.29, a curva específica para bomba CP-4CR -1/2 cv indica as condições para o melhor rendimento. Deste modo, quando a vazão alcança $5 \text{ m}^3/\text{h}$ a uma altura manométrica de 12,5 mca, caso em que a bomba rende em torno de 51%, a bomba desenvolve uma potência hidráulica próxima a 0,4 cv, ou seja, 294,4 W. No entanto, os valores destas variáveis apresentadas na figura 4.29, foram obtidos a uma rotação constante, no caso, produzida por uma tensão de alimentação do motor em 60 Hz.

O comportamento da potência hidráulica desenvolvida pela bomba e da potência elétrica recebida pelo motor em função da frequência são expostos na figura 4.30.

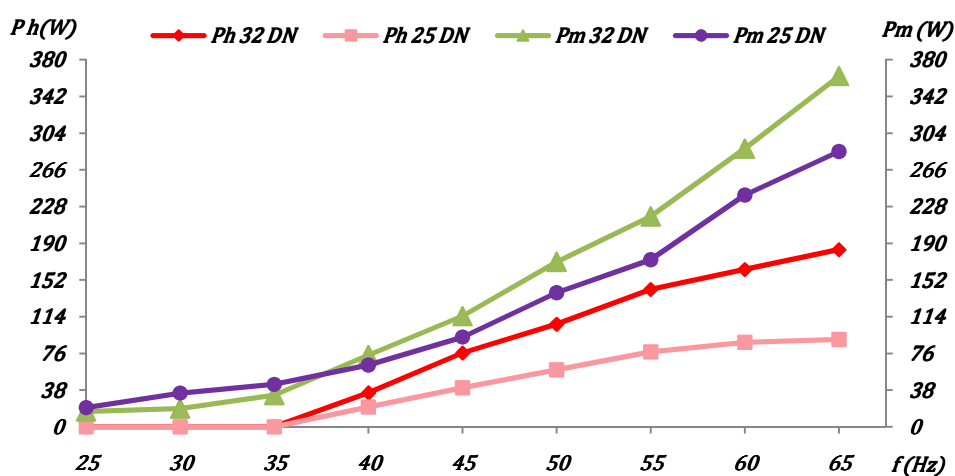


Figura 4.30 Potência absorvida pelo motor e potência hidráulica de saída da bomba p/ DT=8,20 m.

As curvas da figura 4.30 denotam a variação sofrida na potência P_m absorvida pelo motor em função da variação da potência hidráulica P_h . Estes valores foram obtidos para um

desnível total de 8,20 m para frequências entre 25 e 65 Hz apenas trocando a válvula de pé de 25 DN pela de 32 DN. O crescimento do valor da potência elétrica absorvida pelo motor aumenta muito pouco em relação ao crescimento da potência hidráulica. Outro fato, é que para ambas as válvulas de pé a potência hidráulica inicia seu crescimento a partir de 35 Hz. No entanto, a potência utilizada pelo motor é sensivelmente menor entre 25 e 35 Hz, para válvula de pé de 32 DN em média 47% passando a ser mais elevada a partir de 37 Hz. De modo que, para frequências entre 35 e 40 Hz, já ocorre vazão com baixa demanda de potência. Assim, o sistema consegue bombear com bom rendimento em baixas rotações.

Conforme [40], o rendimento do sistema de bombeamento está relacionado à potência absorvida pelo motor e à potência hidráulica cedida ao líquido; deste modo, o rendimento do sistema depende da vazão e da altura manométrica total *AMT* da instalação, uma vez que a potência hidráulica é dada pela Eq. (7), no subitem 3.5.1

O motor deve fornecer potência mecânica à bomba para vencer a altura manométrica para certa vazão e esta potência depende do rendimento da bomba dado pela Eq. 36:

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_m} \quad (36)$$

Ao passo que para se chegar ao rendimento do sistema deve-se verificar qual o rendimento do motor, dado pela Eq. (37)

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_E} \quad (37)$$

Isolando P_m nas Eq. (36) e (37) e igualando-as chega-se ao rendimento do sistema pela relação entre os rendimentos individuais da bomba e motor.

$$P_h \eta_h = P_E \eta_m, \quad \frac{\eta_m}{\eta_h} = \frac{P_h}{P_E}, \quad \eta_s = \frac{P_h}{P_E} \quad (38)$$

onde:

P_h - potência hidráulica cedida ao líquido pela bomba [cv],

P_m - potência mecânica fornecida pelo motor a bomba [cv],

P_E - potência elétrica absorvida pelo motor [cv],

η_h - rendimento da bomba [%],

η_m - rendimento do motor [%] e

η_s - rendimento do sistema de bombeamento [%].

O comportamento do sistema hidráulico em termos de rendimento e vazão em função da frequência é mostrado através das curvas na figura 4.34.

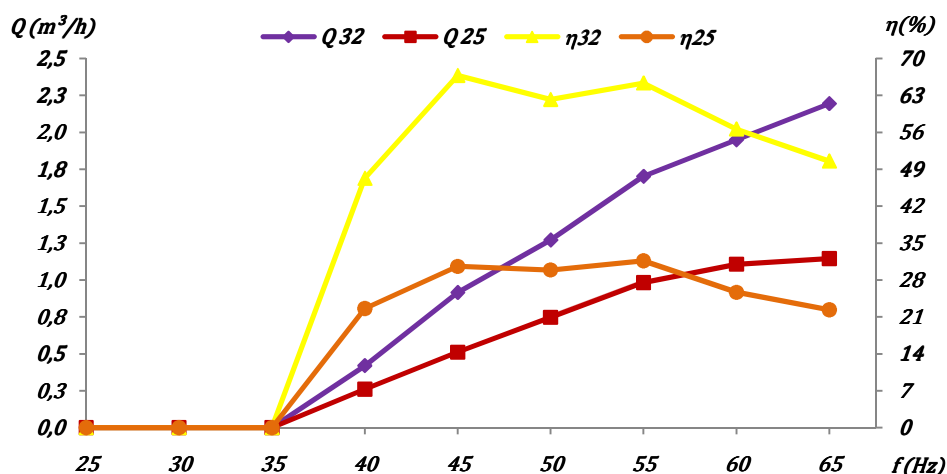


Figura 4.31 Vazão e rendimento em função da frequência, para altura geométrica de 8,20m

Na figura 4.31 a vazão e o rendimento estão em função da frequência e são mostradas as curvas para cada condição de operação, tanto com válvula de pé 25 DN quanto com a de 32 DN. O delineamento das curvas mostradas deixa evidenciado o aumento da vazão com o aumento da frequência aplicada ao motor, visto que a rotação do rotor da bomba está relacionada à frequência. Como mencionado anteriormente, apesar da alteração da altura manométrica bastante diminuta com a troca das válvulas de pé, com a vazão ocorre diferente; vê-se que a variação do valor da vazão cresce próxima a 75% na rotação nominal da bomba sem que se tenha necessidade de trocar os tubos de 25 DN por tubos de 32 DN; isto se traduz em economia de recurso quando da montagem da instalação.

Outro fato evidente é o maior rendimento ocorrer em frequências entre 45 e 55 Hz, porém em 42,5 Hz o sistema alcança rendimento por volta de 57%, praticamente igual ao rendimento do sistema quando da operação da bomba em 60 Hz. Também se verifica que o rendimento mais elevado, 67% ocorre em 45 Hz e decai para 65% em 55 Hz quando o sistema opera com a válvula de 32 DN, ao passo que com a válvula de 25 DN o rendimento ainda é diminuto, pois a vazão ainda é pequena. Estas condições de rendimento são benéficas no que toca ao bombeamento de água de modo a evitar que a água aqueça em baixas rotações por falta de circulação e que no caso da troca da válvula de 25 DN pela de 32 DN se mostra bastante vantajosa.

Observa-se ainda que o rendimento decreta a partir de frequências acima de 55 Hz; isto acontece justamente pelo crescimento da vazão que atravessa os tubos do sistema hidráulico e aumenta substancialmente as perdas de carga. Isto pode ser observado através da curva de perda de carga para tubos de 25 DN mostrada na figura 4.23, que mostra o quanto as perdas crescem com o incremento da vazão a partir de 1 m³/h, que de 5% salta para 17% para vazão de 2 m³/h.

A tabela 4.13 expõe os valores que deram origem às curvas dos gráficos apresentados nas figuras 4.30 e 4.31.

Tabela 4.13 Comportamento do sistema bombeamento em função da frequência

<i>VARIÁVEIS EM FUNÇÃO DA FREQUENCIA PARA DESNÍVEL TOTAL DE 8,20 m</i>										
<i>f (Hz)</i>	<i>25</i>	<i>30</i>	<i>35</i>	<i>40</i>	<i>45</i>	<i>50</i>	<i>55</i>	<i>60</i>	<i>65</i>	<i>VP</i>
<i>Q (m³/h)</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,42</i>	<i>0,91</i>	<i>1,27</i>	<i>1,70</i>	<i>1,95</i>	<i>2,19</i>	32 DN
<i>Pm (W)</i>	<i>16</i>	<i>19</i>	<i>33</i>	<i>74</i>	<i>115</i>	<i>171</i>	<i>218</i>	<i>288</i>	<i>363</i>	
<i>Ph (W)</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>35</i>	<i>76</i>	<i>106</i>	<i>142</i>	<i>163</i>	<i>183</i>	
<i>η (%)</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>47</i>	<i>67</i>	<i>62</i>	<i>65</i>	<i>57</i>	<i>51</i>	
<i>Q (m³/h)</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,26</i>	<i>0,51</i>	<i>0,75</i>	<i>0,98</i>	<i>1,11</i>	<i>1,15</i>	25 DN
<i>Pm (W)</i>	<i>20</i>	<i>35</i>	<i>44</i>	<i>64</i>	<i>93</i>	<i>139</i>	<i>173</i>	<i>240</i>	<i>285</i>	
<i>Ph (W)</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>21</i>	<i>40</i>	<i>59</i>	<i>78</i>	<i>88</i>	<i>91</i>	
<i>η (%)</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>23</i>	<i>31</i>	<i>30</i>	<i>32</i>	<i>26</i>	<i>22</i>	

4.6.6 Cálculo do NPSH para verificação da possibilidade de cavitação no sistema

Uma vez que a instalação disponibiliza de três colunas de elevação e que cada uma dispõe de uma válvula de esfera, a manobra destas permite a bomba experimentar diversos valores de vazão como mostrado na tabela 4.15, valores estes que alcançam a marca de 3 m³/h a 60 Hz. O fato é que quando a vazão da tubulação ultrapassa o valor de 3 m³/h, verifica-se que o nível de ruído aumenta, tanto quanto a intensidade de corrente do motor a qual ultrapassa os limites para uma operação segura. Tal efeito surgiu quando foi aplicada no motor, tensão com frequência de 65 Hz, para a configuração do sistema hidráulico em que todas as válvulas de elevação foram mantidas abertas, quando do emprego da válvula de pé de 32 DN no tubo de sucção. Nestas condições a vazão alcançou 3,24 m³/h, como mostra a figura 4.28, e o valor da potência elétrica do motor chegou até 363 W, como mostrado no gráfico da figura 4.30.

Tais efeitos motivaram a elaboração do cálculo de altura da pressão de vapor do líquido disponível da instalação $NPSH_d$, para verificar a possibilidade de ocorrer o efeito de

cavitação na bomba. Para se evitar tal efeito é preciso verificar a $NPSH_d$ da instalação e este deve possuir valor menor que a $NPSH_b$, conforme [15] a desigualdade é expressa por:

$$NPSH_d > NPSH_b + 0,6 \quad (39)$$

O $NPSH_d$ é dado por:

$$NPSH_d = P_{at} - P_V - P_{CS} \pm D_S \quad (40)$$

Onde :

$NPSH_d$ - é a altura de pressão de vaporização do líquido disponível na instalação;

$NPSH_b$ - é a altura de pressão de vaporização do líquido na bomba;

P_{at} - é a pressão atmosférica local [mca];

P_V - é a pressão de vapor da água para determinada temperatura [mca];

P_{CS} - é a perda de carga na sucção [m];

D_S - é a altura do desnível de sucção [m].

Para calcular o $NPSH_d$ é necessário determinar as demais variáveis das quais a maior parte é obtida através de tabelas. Assim algumas tabelas foram geradas com base nas informações disponibilizadas nas tabelas de seleção de bombas da [21] e [11]. Os valores calculados indicam os valores de $NPSH_D$ em função da vazão para o tubo de 25 DN e em relação à presença das válvulas de pé de 25 DN e a de 32 DN. Para se obter o valor do $NPSH_d$, busca-se em primeiro os valores de perda de carga por atrito PA no tubo em função da vazão, conforme figura 23 e em seguida o $NPSH_b$ da bomba. Os dados necessários ao cálculo do $NPSH$ em termos operacionais e ambientais são fornecidos nas tabelas 4.14 e 4.15, respectivamente.

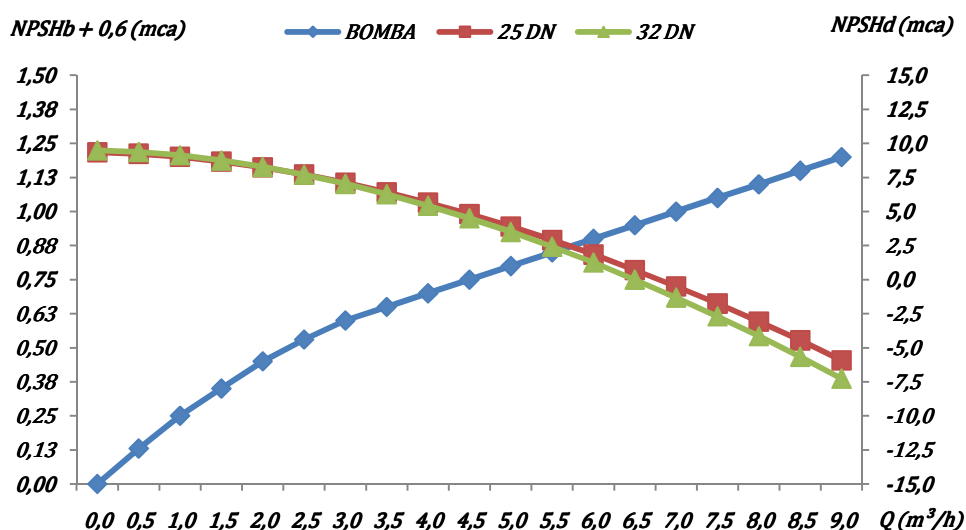
Tabela 4.14 Condições operacionais da bomba

TUBO DE 25 DN				
Q (m^3/h)	<i>1</i>	<i>1,5</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
PAT $f(Q)$ (m)	<i>4,90</i>	<i>10,00</i>	<i>16,50</i>	<i>33,60</i>
$NPSH_b$ $f(Q)$ (mca)	<i>0,25</i>	<i>00,35</i>	<i>00,40</i>	<i>00,60</i>
PCS $f(CE)$ (m)				
25 DN	<i>1,03</i>	<i>2,10</i>	<i>3,46</i>	<i>7,04</i>
32 DN	<i>0,83</i>	<i>1,68</i>	<i>2,78</i>	<i>5,66</i>

Tabela 4.15 Condições ambientais

<i>Pat (mca)</i>	10,33 @ 0 m, Em relação ao nível do mar
<i>Pv (mca)</i>	0,239 @ 20°C (Temp. da água)

Quanto às perdas de carga em função do comprimento equivalente da tubulação de sucção *CES* são obtidas mediante as tabelas 4.12 e 4.13. Por fim calcula-se o $HPSH_d$ por meio da Eq. (43) aplicando os valores indicados nas tabelas 4.14 e 4.15. De posse dos valores do $NPSH_d$ em função da vazão substitui estes na Eq. (44) de modo a verificar em que condições a operação da bomba é adequada para cada válvula de pé. Os valores do $NPSH_d$ e as condições para que a bomba opere afastada dos efeitos da cavitação estão registrados na figura 4.32.

Figura 4.32 Curvas do $NPSH_b$ e $NPSH_d$ em função da vazão

As curvas apresentadas na figura 4.32 demonstram o quanto é necessário evitar vazões acima de 3 m³/h para ambas as medidas do tubo de sucção 25 DN ou 32 DN, afim de que os efeitos da cavitação não alcancem valores prejudiciais aos componentes da bomba, ou seja, para que o $NPSH_d > NPSH_b + 0,6$.

4.7 Principais Dificuldades Superadas

É uma realidade que em toda e qualquer implementação experimental em campo apareçam obstáculos de pequena ou grande importância. Esses empecilhos que aparecem promovem oportunidades de aprendizado, visto que normalmente não são previstos no decorrer do projeto da instalação, fato que faz com que sejam empregadas durante os ensaios soluções alternativas para contornar tais obstáculos.

A seguir, as principais dificuldades surgidas e as respectivas soluções adotadas quando da execução da planta da unidade eólica de bombeamento:

- Dificuldade em se manter o nível da água do poço estável: a solução adotada foi instalar um tubo entre o ponto mais alto do reservatório e o poço, de modo a permitir o retorno da água ao poço toda vez que a água ultrapassava o nível máximo do reservatório de forma que a água retornava ao poço;

- Nível do lençol freático instável, alterava demasiadamente a altura do nível da água do poço de modo que em certos momentos o nível da água alcançou uma altura de sucção 2,20 m a solução foi completar o volume da água do poço através da implementação de uma tubulação de adução da água de um tanque que se encontra ao lado da planta da unidade de bombeamento, de modo a manter a altura do nível da água do poço próximo a 0,6 m.

- Medição de pressão de saída da bomba, o transdutor disponível possuía um alcance de pressão muito elevado 50 bar quando a máxima pressão 16 mca e ainda estava com defeito, e não foi possível a aquisição de outro: a solução adotada foi substituí-lo por um transdutor de pressão de vácuo com alcance de 10 mca, o qual foi instalado próximo à entrada de sucção da bomba para medir o vácuo;

- Dificuldade para implementar a carga hidráulica uma vez que o ponto mais alto do reservatório elevado está 3,1 m do nível de entrada da bomba: solução adotada foi utilizar a estrutura da torre para servir de suspensão para a tubulação de modo que foi possível conseguir alturas mais elevadas para a tubulação; se alcançou até 7,6 m de altura em relação ao nível de entrada da bomba.

- Dificuldade para implementar a tubulação uma vez que a arquitetura do cubículo não previa os devidos acessos de entrada e saída dos tubos: a solução adotada foi efetuar furos e cortes nas paredes do cubículo em locais estratégicos que minorasse a quantidade de curvas a serem efetuadas pela tubulação.

- Vazão de saída da bomba muito baixa no máximo 1200 L/h: A solução adotada foi trocar a válvula de sucção de 25 DN por outra de 32 DN para compensar as perdas localizadas provocadas pelas demais conexões, abrir roscas nos tubos de entrada e saída tanto da bomba quanto do medidor de vazão, no sentido de se evitar o uso de luvas, uma vez que estas provocam perdas localizadas;

- Medição da frequência de saída do gerador e a rotação da turbina: o primeiro obstáculo foi apresentado pelo analisador de energia, visto que este mede sinais apenas em torno de 60 Hz, de modo que a leitura para frequências que se afastavam de 60 Hz os valores eram altamente distorcidos, de tal modo que não havia confiabilidade. O segundo empecilho

foi não dispor de um *encoder* para medir a rotação do eixo da turbina e nem o manual do aerogerador fornecer a quantidade de pólos do gerador. A solução adotada foi adaptar um pequeno motor cc para operar como tacogerador, o qual foi instalado na ponta do eixo na parte posterior do conjunto motor-bomba. Após sucessivos ensaios empregando o conversor de frequência obteve-se a relação entre rotação do eixo da bomba e a frequência da tensão de alimentação do motor com a tensão de saída do tacogerador. Deste modo o sinal de tensão de saída do tacogerador passou a corresponder à frequência da tensão tanto do motor quanto do gerador, as quais são as mesmas. Para se obter a rotação do eixo tanto do motor como do gerador foi suficiente relacionar a frequência com os respectivos números de pólos, 2 e 12;

- Interrupção dos ensaios relacionados à operação do sistema eólico de bombeamento causado pela queima de um dos enrolamentos de fase do aerogerador: a solução foi remover o aerogerador do topo da torre, realizar uma inspeção visual e após análises da causa enviá-lo ao fabricante, devido à falta de recursos técnicos.

- Problema com o sistema de aquisição de dados foi com respeito à coleta de dados da unidade: as informações dos sensores eram capturadas pelo sistema de aquisição de dados, pois de início um antigo *Lap Top* usado para coletar os dados do *datalogger* e do analisador de energia apresentou falhas no teclado de funcionamento impedindo a coleta de dados do sistema de aquisição: a solução adotada de início foi a substituí-lo por um *Note Book*, no entanto o mesmo não dispunha de porta serial RS 232, e foi preciso recorrer a um conversor RS 232/ USB para casar o *note book* com *datalogger*, porém a entrada RS 232 do conversor era incompatível com a saída RS 232 do *datalogger*. Também foi tentado fazer o mesmo com o analisador de energia que possui saída RS 485, mas em ambos os casos não se obteve êxito. Por fim recorreu-se a um PC o qual dispunha de uma entrada R232 a qual era usada alternadamente para parametrizar e coletar os dados de ambos, *datalogger* e analisador de energia, de modo que os dados eram armazenados e posteriormente transferidos para o Note Book.

- Outra dificuldade vivenciada no decorrer da operação do sistema foi que alguns meses depois a fonte de alimentação do computador apresentou falha: a solução foi aquisição de outra fonte, no entanto dias depois o próprio computador parou de funcionar e foi necessária a troca por outro computador. Isto impôs a retirada dos dados do disco rígido do antigo computador os quais foram transferidos para o disco rígido do novo computador de modo que não se perdeu nenhum dos dados coletados e armazenados anteriormente. Este processo de troca consumiu bastante tempo, mas trouxe como vantagem a possibilidade de interligação simultânea ao novo computador tanto do *datalogger* quanto do analisador de

energia, desde que este possuía duas portas serial RS 232, de forma que o processo de parametrização, leitura e coleta de dados foi bastante facilitado.

- Outra dificuldade contornada foi após a reinstalação do aerogerador, pois o mesmo uma vez instalado e posto em operação, foi notado que apesar do vento aumentar a velocidade, a turbina não acelerava e a tensão de saída do gerador não aumentava: novamente a solução adotada foi retirá-lo do topo da torre para efetuar a averiguação em laboratório, pois devido à baixa resistência dos enrolamentos não era possível detectar curto-circuito no gerador com o aerogerador montado já havia um dos condutores de fase da saída do gerador em contato com a carcaça por falha na montagem mecânica do aerogerador. Após o desmonte do aerogerador e realizadas algumas medições no gerador e na cabeça rotativa em separado foi detectado mais um curto-circuito, entre outro terminal de saída da cabeça rotativa e o eixo da mesma, que por sua vez encontra-se em contato elétrico com a carcaça do aerogerador. Isto causou curto-circuito entre duas fases do gerador que por sua vez impedia a aceleração da turbina devido ao efeito de frenagem causado pela reação da armadura do gerador. Outra falha foi com relação à resistência elétrica, de contato entre escovas e pista dos anéis coletores da cabeça rotativa, experimenta valores diversos de resistência elétrica. Essa diferença no valor da resistência de contato entre escova e anel coletor, provoca desequilíbrio na intensidade de correntes dos condutores das fases do gerador. Este é um dos fatores contribuintes para degradação precoce do grupo de condutores do enrolamento de uma das fases do gerador. Assim, o sobreaquecimento nos condutores é provocado por aumento na intensidade de correntes, decorrentes do desequilíbrio causado pela diferença de resistência de contato entre escova e anel coletor.

- Com relação ao controlador, foi detectado por meio da leitura no display do analisador de energia que o mesmo casava constantes desequilíbrios de corrente entre fases: a solução adotada foi substituir o relé de apenas dois contatos por um contator de três contatos. O fato é que o relé interligava apenas duas fases enquanto uma das fases de saída do aerogerador era diretamente ligada à fase do motor. Isto causava o desequilíbrio de corrente devido o aumento da resistência de contato causado pelo desgaste natural dos contatos do relé no decorrer da operação. Outra falha encontrada no controlador foi o não acionamento do relé quando a frequência da tensão de saída do gerador atingia 37 Hz: a solução adotada foi realizar uma inspeção visual associada a uma pesquisa de sinais, a qual verificou a falta de sinal na entrada do circuito detector de frequência. Em seguida foi descoberto que uma trilha da placa de circuito impresso que interligava a saída do transformador encarregado de

fornecer o sinal ao circuito detector de frequência estava rompida, isto impedia o acionamento do relé.

- Reinstalado o aerogerador, após substituir a cabeça rotativa este funcionou por nove dias no mês de novembro de 2010. Estes dias foram suficientes para verificar que existia uma determinada direção assumida pelo aerogerador para acompanhar a direção do vento que colocava as escovas da cabeça rotativa em uma posição com relação aos anéis coletores, de modo que causava desequilíbrio de corrente, mesmo após a permuta do relé bipolar pelo contator tripolar ter sido efetuada. Tais dias foram de ventos fortes, e foi necessária inspeção visual da planta com maior frequência. Ao final destes nove dias de operação verificou-se que o aerogerador já não se encontrava em prumo com relação ao plano da terra; imediatamente foi interrompido o funcionamento do mesmo por meio do desligamento da chave do controlador. Novamente foi necessária a retirada do aerogerador do topo da torre, porém a equipe encarregada da retirada do aerogerador verificou que dois dos parafusos de fixação da base do tubo de acoplamento entre torre e aerogerador estavam folgados e o terceiro já não existia. Porém simultaneamente a este fato outro se sucedeu, a turbina do aerogerador estava travada mecanicamente, donde se supõe que tal travamento é devido à queima de algum dos enrolamentos de fase causada pelo desequilíbrio de corrente promovido por falha da cabeça rotativa. Devido ao tempo exíguo não foi possível analisar a causa desta falha com mais profundidade. Com este fato os experimentos usando o aerogerador foram encerrados.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A dissertação foi inicialmente elaborada após uma revisão bibliográfica relacionada a temas que envolvem bombeamento de água e energias renováveis. Esta etapa inicial foi importante para a pesquisa, uma vez que foram estudadas as principais tecnologias aplicadas ao bombeamento de água bem como as fontes energéticas utilizadas, em especial as renováveis. Este estudo mostrou que o uso de sistemas eólicos de bombeamento de água isolados que empregam aerogeradores para acionar bombas centrífugas demonstra ser uma alternativa viável, uma vez que esta tecnologia já vem sendo experimentada há algum tempo.

Na segunda etapa, foi concebida uma planta piloto no campus do Pici da UFC constituída de uma tubulação escalonada para o sistema hidráulico, de forma a constituir distintas cargas hidráulicas para bomba centrífuga onde cada carga hidráulica foi estabelecida por meio da manobra de válvulas; como item da planta podem também ser citados um quadro de comando elétrico de controle e proteção para o aerogerador, um conversor de frequência e um motor para acionamento da bomba.

A terceira etapa foi com relação à metodologia de avaliação do sistema eólico de bombeamento instalado. Assim, a metodologia de avaliação verificou o volume de água bombeado por dia em função da quantidade de horas de operação do sistema e da velocidade média do vento. Uma vez que a velocidade do vento varia aleatoriamente no decorrer do tempo, a quantidade de horas de operação do sistema é distribuída irregularmente no dia.

Quando comparado aos sistemas de bombeamento alimentados pela rede de eletricidade, o sistema eólico difere justamente no critério de regularidade do tempo de operação do bombeamento de água. Quando alimentado pela rede, é possível determinar o tempo de operação para um dia e se obter certo volume de água, ao passo que quando alimentado pelo aerogerador, este depende da velocidade do vento. A planta eólica de bombeamento apresentou as seguintes características inovadoras:

- Utilização de bomba centrífuga acionada por motor de indução 380/220 Vca alimentado com potência oriunda de gerador síncrono de imã permanente operando em velocidade e frequência variáveis, com tensão de saída em 220 Vca/ 60 Hz em sistema isolado;
- Possibilidade de usar, ou não, a rede de distribuição para alimentar o motor da bomba centrífuga;

- Alteração da medida da válvula de sucção de 25 DN para 32 DN, mantendo a medida do diâmetro do tubo de sucção em 25 DN.

Estas características permitiram a análise do desempenho do sistema em diversas condições operacionais, estabelecidas pela carga hidráulica imposta à bomba, e do desempenho do sistema utilizando-se válvulas de sucção de medidas diferentes. Em termos hidráulicos, os resultados se apresentaram satisfatórios. Foi verificado que variaram tanto com a velocidade do vento quanto com a configuração hidráulica adotada, seja pela manobra das válvulas de elevação, pela troca na medida da válvula de sucção, ou pela variação do nível da água do poço. Neste sentido, verificou-se que tanto a potência quanto a eficiência do sistema variaram em função da velocidade do vento e do nível da água do poço para cada configuração estabelecida.

Apesar de se buscar estabilizar o nível da água do poço com a inserção de um tubo de retorno na tubulação do sistema hidráulico, não foi o suficiente para mantê-lo em altura constante. Devido a este fato, a variação da altura do nível do poço fez a bomba requerer potência mecânica variável do motor de acionamento, que por sua vez na mesma proporção solicita energia elétrica do aerogerador em maior ou menor quantidade.

No decorrer dos ensaios empregando o aerogerador como alimentador, verificou-se que a bomba operando nessas condições não possui um comportamento linear, visto que existiu leitura de vazões de diferentes valores para uma mesma velocidade de vento, onde ocorreram frequentemente vazões de 2500 L/dia a velocidades de vento de 5,64 m/s ou ainda vazão de 8000 L/dia a velocidades de vento de 3,19 m/s.

Em janeiro de 2010, a velocidade média do vento neste período foi de 3,5 m/s. Foram gerados 5500 Wh de energia elétrica e bombeado 8.5600 L de água em 275 horas de operação. Em novembro de 2010, uma velocidade média do vento de 4,54 m/s, foram gerados apenas 1500 Wh de energia elétrica e bombeados 1.9691 L de água em 216 horas de operação do sistema.

Com relação às válvulas de pé, a troca das medidas aumentou a vazão substancialmente de modo, que a de 25 DN permitiu vazão de 1.150 L/h a 12,5 mca, e a de 32 DN permitiu, acima de 1.950 L/h a 16,8 mca par uma altura geométrica de 8,20 m e com a bomba a uma rotação de 3.450 rpm.

Conclusões

O comportamento do sistema eólico de bombeamento de água em função da velocidade do vento foi obtido por meio dos dados obtidos do sistema de aquisição de dados, os quais foram tratados e analisados. Os dados reais das variáveis elétricas foram associados aos dados das variáveis não elétricas. Isto permitiu a construção de gráficos que apresentaram as curvas que mostram as relações entre as variáveis do processo de operação do sistema eólico de bombeamento. Tais curvas permitiram a análise do comportamento do sistema em partes e como um todo de modo a facilitar a conclusão a respeito de cada um dos aspectos do sistema em função da velocidade do vento.

Comparando o fator de capacidade da carga nominal e do conjunto motor-bomba, foi observado que a mudança no valor do fator de capacidade é diminuta para ambas as cargas. Assim, com relação ao motor, o fator de capacidade para o 1º semestre de 2010, foi de 8,64%, para o 2º semestre foi de 16,3%, alcançando um fator de capacidade anual médio de 12,5%. Relacionado à carga nominal, o fator de capacidade no 1º semestre foi de 9,01%, e para o 2º semestre foi de 17,48% chegando a 13,28% no ano.

Os melhores rendimentos ocorrem para faixa de velocidades entre 5 e 8,5 m/s. O rendimento médio do sistema é de 5% em termos de energia hidráulica, 12% em termos de energia elétrica com relação à energia disponível no vento, respectivamente. Com relação à bomba o rendimento médio foi de 41% em termos de energia elétrica transformada em hidráulica, para mesma faixa de velocidades. O sistema apresentou rendimento de 10% em termos de conversão de energia eólica em hidráulica, a velocidade instantânea de 6,5 m/s.

Com respeito à participação do controlador, os efeitos da operação sem a participação do componente foram percebidos através do baixo volume de água bombeado, somente 448,47 L, apesar da ocorrência de velocidade média de vento em torno de 4,4 m/s durante as 48 horas de operação. Com a participação do controlador em 24 horas de operação a uma velocidade média de 3,70 m/s foi possível bombear 2.876,85 L. Deve ser levado em conta que durante as 168 horas de operação no decorrer dos ensaios, o controlador apresentou falhas intermitentes no tocante ao ajuste de frequência, pois em algumas ocasiões o mesmo acoplou o aerogerador ao conjunto motor-bomba em frequências abaixo de 37 Hz. Isto influenciou na aceleração da turbina do aerogerador, que por sua vez não disponibilizando de potência o suficiente para o arranque do motor de acionamento da bomba, logo era freada.

Diante do exposto, se pode concluir que a participação do controlador em boas condições operacionais é muito importante para o desempenho do sistema de aerogeração.

Sem o controlador, o aerogerador não consegue acelerar em baixas velocidades de vento e a bomba opera apenas em altas velocidades de vento. Isto é o suficiente para comprometer o rendimento global do sistema, visto que as baixas velocidades de vento não são aproveitadas.

Com relação à operação do aerogerador, os ensaios demonstraram fragilidade operacional, uma vez que o mesmo apresentou falhas no decorrer dos ensaios. Em janeiro de 2010, o aerogerador operou 14 dias e interrompeu o funcionamento do sistema devido à queima do enrolamento de uma das fases.

Em setembro de 2010, o aerogerador foi reinstalado e não conseguiu operar devido a um curto-circuito entre uma das fases do enrolamento e a massa do aerogerador, causado por falha da cabeça rotativa. Após ser substituída a cabeça rotativa, o mesmo foi reinstalado em novembro de 2010 e operou por mais dez dias e parou. Tais eventualidades não são toleradas, uma vez que este equipamento deve trabalhar, na maioria das vezes, em locais de difícil acesso e carente de assistência técnica.

No que tange à disponibilidade operacional e confiabilidade do equipamento, é necessário corrigir tais falhas operacionais. Diante do exposto, os fatos constatados são fatores que inviabilizam o aerogerador usado do ponto de vista técnico para acionamento de um sistema de bombeamento de água. No entanto, isto não significa a inviabilidade do uso da energia eólica para bombeamento de água.

Sugestões de Trabalhos Futuros

Apesar de alcançar os objetivos propostos na dissertação, não há a intenção de esgotar os trabalhos relacionados, procurando sempre um aperfeiçoamento contínuo do sistema avaliado, de forma a contornar ou eliminar os problemas mencionados da melhor forma possível. Sendo assim, como sugestão para futuro desenvolvimento, os seguintes trabalhos são propostos:

- Desenvolver um controlador mais adequado e de melhor qualidade no que tange a montagem dos componentes, elaboração da placa de circuito impresso, blindagem eletromagnética do gabinete e terminais elétricos de entrada e saída. É necessário produzir o controlador com qualidade industrial, uma vez que o mesmo pode operar em ambientes agressivos associado a outros equipamentos, num mesmo sistema. Vale salientar que a estrutura da planta do sistema eólico de bombeamento vibra bastante em ocasiões de ventos fortes e isto pode causar o mau contato entre os componentes por folga ou mesmo rompimento de trilha do circuito impresso. Outra sugestão é dotar

o controlador de acesso externo para o ajuste da faixa de frequência, bem como a troca do relé bipolar de acoplamento gerador/motor, por outro tripolar de maneira que minimize o desequilíbrio de corrente entre fases;

- Automatizar o quadro de controle através de contactores de modo a garantir que o aerogerador ou o conversor de frequência não alimentem o conjunto motor-bomba simultaneamente no decorrer dos experimentos;
- Verificar a viabilidade de utilização de dois conjuntos motor-bomba de $\frac{1}{2}$ cv, uma vez que o aerogerador disponibiliza em sua saída até 1 kW. As bombas poderão ser configuradas para operar em série ou paralelo de acordo com a necessidade do sistema hidráulico. Com este acréscimo de carga é possível melhorar o fator de capacidade do aerogerador em momentos de vento forte;
- Melhorar o balanceamento mecânico do aerogerador para diminuir o excesso de vibração radial que provocou a folga de parafusos tanto da torre quanto da base do tubo de acoplamento entre aerogerador e torre;
- Perfurar um poço de elevada profundidade para verificar o desempenho da planta com a bomba centrífuga do tipo submersa;
- Formar e avaliar os custos globais em termos de produção de água e energia elétrica da unidade eólica de bombeamento de água em médias anuais, analisando o efeito da sazonalidade na operação da planta;
- Experimentar o emprego de tubos e conexões de 32 DN para compor a tubulação do sistema hidráulico e avaliar o desempenho da planta mantendo a mesma bomba;
- Verificar o desempenho da unidade com a utilização de outras fontes renováveis de energia de forma híbrida, tais como eólica e solar FV;
- Empregar o sistema eólico de bombeamento de água para recircular a água de tanques utilizados na criação de peixes para que este venha a contribuir como elemento para oxigenação da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pinho J. T., Barbosa C. F. O., Pereira E. J. S., Souza H. M. S., Blasques L. C. M., Galhardo M. A. B., Macedo W. N., SISTEMAS HÍBRIDOS (Soluções Energéticas para Amazônia), MME, Brasília, 2008.
- [2] Johnson, G. L., WIND ENERGY SYSTEMS, Electronic Edition Manhattan KS, 2006.
- [3] Custódio, R. S., Energia eólica para produção de energia elétrica, Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2009.
- [4] 9th WORLD WIND ENERGY CONFERENCE & EXHIBITION LARGE-SCALE INTEGRATION OF WIND POWER (WWEC 2010), (<http://www.wwec2010.com/>) Istanbul, Turkey, 15-17 June 2010. Acessado em fevereiro de 2011.
- [5] CBEE (Centro Brasileiro de Energia Eólica), (www.eolica.com.br), Geração de energia elétrica e o meio ambiente. Acessado em novembro de 2010.
- [6] CRESESB (Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito), FAQ Eólica (Perguntas frequentes) www.cresesb.cepel.br/content.php Acessado em fevereiro de 2011.
- [7] Adapta Sertão, Tecnologias sociais de adaptação a mudança climática, www.adaptasertao.net. Acessado em janeiro de 2011.
- [8] Epaminondas Pio Correia Lima, Mecânica das Bombas, 2ª edição, Rio de Janeiro: Interciência, 2003. http://pt.wikipedia.org/wiki/Bomba_hidráulica, Acessado em fevereiro de 2011.
- [9] Stephanie Dalley and John Peter Oleson (January 2003). "Sennacherib, Archimedes, and the Water Screw: The Context of Invention in the Ancient World", Technology and Culture 44 (1) (em inglês). http://pt.wikipedia.org/wiki/Bomba_hidráulica, Acessado em fevereiro de 2011.
- [10] Fialho, A. B., Automação Hidráulica, Projetos, Dimensionamento e Análise de circuitos, São Paulo, Érica, 2002.

- [11] Schneider, Manual Técnico, Considerações Gerais Sobre Bombas Hidráulicas, www.schneider.ind.br/.../df5aa056c18944db498d92870adb2821.pdf
- [12] Anauger, MANUAL DE INSTRUÇÕES da bomba submersa 800, www.anauger.com.br, 2009. Acessado em junho de 2009.
- [13] SunLab Power®, Bombas movidas a Energia Solar, Manual de instalação Shurflo 9300 (pdf), www.sunlab.com.br/. Acessado em março 2011.
- [14] SOLAR BRASIL-TECNOLOGIA E ENERGIA FOTOVOLTAICA, Aplicações de Produtos, BOMBAS D'ÁGUA, 2011, www.solarbrasil.com.br/aplicacoes.htm
- [15] MINHA CASA SOLAR, Bomba 12 V ShurFLO 8000, 2010, minhacasasolar.com.br/ShurFLO8000, Acessado em março de 2011.
- [16] [Bomba centrífuga – Wikipédia, a enciclopédia livre](http://pt.wikipedia.org/wiki/Bomba_centrifuga), Bomba centrífuga, pt.wikipedia.org/wiki/Bomba_centrifuga
- [17] UFRN, Operações Unitárias, Engenharia química, Bombas centrífugas: Conceitos Básicos de Operação e Manutenção, <http://www.ufmet.br/~lair/Pagina-OPUNIT/bombacentrifugas-1.htm>
- [18] Karassik, I. J., W. C. Krutzsch, W. H. Fraser, and J. P. Messina: Pump Handbook, McGraw-Hill, New York, 1976. *apud* JOHNSON, 2006 *Op. cit.*
- [19] Stepanoff, A. J.: Centrifugal and Axial Flow Pumps, Theory, Design, and Application, John Wiley, New York, 1948. *apud* JOHNSON, 2006 *Op. cit.*
- [20] Rodrigues L.E.M.J., Mecânica dos Fluidos, Aula 17, Bombas Hidráulicas, Instituto Federal de Educação e Tecnologia de São Paulo, 2011, em www.engbrasil.eng.br/pp/mf/aula17.pdf, Acessado em março de 2011.
- [21] Dancor Bombas e Filtros, Tabela de seleção de bombas filtros e sistemas de pressurização, Dancor, novembro/ 2008.
- [22] ENERSUD Indústria e Soluções Energéticas Ltda. “Gerar-Bombeamento GRB 246” Manual de instalação.

- [23] Martignoni, Alfonso, Máquinas de Corrente Alternada, 5ª edição, Globo - Rio de Janeiro, 1987.
- [24] WEG motores Ltda.
- [25] *Manual de inst. e Operação*, WEG Automação S.A. Inversor de Frequência CFW-08
- [26] *Manual de instalação e Operação*, EMBRASUL Indústria Eletrônica Ltda. “Analisador de Energia RE6010”. “Software de Análise ANL6000”.
- [27] Fedrizzi, Maria Cristina, *Sistemas Fotovoltaicos de Abastecimento de Água para Uso Comunitário: Lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão*, Tese de doutorado, Programa de Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. 174pg, 2003.
- [28] *Catálogo Técnico - Caixas de armazenamento*, FORTLEV, 2010.
- [29] Natale, Ferdinando, Automação Industrial (Série Brasileira de Tecnologia), 3ª edição, Érica - São Paulo.
- [30] Campbell Scientific, Inc. “CR10X Measurement and control module” Operator’s Manual, 1997.
- [31] Campbell Scientific, Inc. PC 208 software
- [32] Campbell Scientific, Inc. “Model 014A Met One Wind Speed Sensor” Instruction Manual, 1997.
- [33] Ifm electronic worldwide, Ifm stands for sensors, networking & control technology for automation, <http://www.ifm.com>, Acessado em maio de 2011.
- [34] George Fischer Signet Inc. “Signet 2537 Paddlewell Flowmeter” Instructions.
- [35] *IES-Optimized pumps: JOULE II PROJECT: JOU2-CT92-0161, DRAFT, 1995 apud Fedrizzi, 2003. Op. cit.*
- [36] Troen I. & Petersen, E.L., European Wind Atlas. Riso National Laboratory. Roskilde, Risø Publication, Dinamarca, 1989. *Op cit apud CUSTÓDIO, 2009.*
- [37] Carvalho P., Geração Eólica, Imprensa Universitária, Fortaleza, 2003.

- [38] Secretaria de Infra-estrutura do Governo do Estado do Ceará: Estado do Ceará – Atlas do Potencial Eólico; 2001. *Op cit apud* CARVALHO, 2003.
- [39] Streeter, Victor Lyle, Mecânica dos Fluidos; tradução de Celso da Silva Muniz *et al.*, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- [40] Neto F.C.S., ELETROBRÁS-PROCEL, “Programa de Eficientização Industrial – Módulo Bombas”, Rio de Janeiro, 2003.

APÊNDICE A – Trabalho publicado Durante a Realização de Mestrado

1. L.C.N. Lopes, M.R.Borges Neto, P.C.M. de Carvalho, "Avaliação de aerogerador para acionar bomba centrífuga em aeração de água". Em anais.do 8º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural - AGRENER GD 2010, CAMPINAS SP. 2010.