



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA

**A utilização de bombas operando como
turbinas e geradores de indução na
geração de energia elétrica**

Daniel de Macedo Medeiros

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Itajubá para obtenção do título de
Mestre em Ciências em Engenharia da
Energia

Itajubá

- 2004 -

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Jacqueline Rodrigues de Oliveira Balducci – CRB_6/1698

M488u

Medeiros, Daniel de Macedo.

A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica / por Daniel de Macedo Medeiros -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2004.

129 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana

Co-Orientador: Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá –
Departamento de energia .

1. Microcentrais Hidrelétricas. 2. Bombas funcionando como turbinas. 3. Geradores de indução. I. Viana, Augusto Nelson Carvalho, orient. II. Rezek, Ângelo José Junqueira, co-orient. III. Universidade Federal de Itajubá . IV. Título.

CDU 621.311.21 (043)



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 518, de 07 de dezembro de 2004, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“A Utilização de Bombas Operando como Turbinas e Geradores de Indução na Geração de Energia Elétrica”** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Universidade Federal de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia da Energia, na Área de Concentração Geração Hidrelétrica**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a **Daniel de Macedo Medeiros**.

Itajubá, 10 de Dezembro de 2004

Prof. Frederico Fábio Mauad
1º Examinador - USP-São Carlos

Prof. Ângelo José Junqueira Rezek
3º Examinador - UNIFEI (Co-Orientador)

Prof. Geraldo Lúcio Tiago Filho
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Augusto Nelson Carvalho Viana
4º Examinador - UNIFEI (Orientador)



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“A Utilização de Bombas Operando como Turbinas e Geradores de Indução na Geração de Energia Elétrica”**

Autor: **Daniel de Macedo Medeiros**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
1º	A		<i>[Handwritten Signature]</i>
2º	A		<i>[Handwritten Signature]</i>
3º	A		<i>[Handwritten Signature]</i>
4º	A		<i>[Handwritten Signature]</i>

Observações:

- 1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- 2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- 3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Resultado Final: A , ou seja, Aprovado

Observações: _____

Itajubá, 10 de Dezembro de 2004

[Handwritten Signature]
Prof. Frederico Fábio Mauad
1º Examinador - USP-São Carlos

[Handwritten Signature]
Prof. Ângelo José Junqueira Rezek
3º Examinador - UNIFEI (Co-Orientador)

[Handwritten Signature]
Prof. Geraldo Lúcio Tiago Filho
2º Examinador - UNIFEI

[Handwritten Signature]
Prof. Augusto Nelson Carvalho Viana
4º Examinador - UNIFEI (Orientador)

Daniel de Macedo Medeiros

A utilização de bombas operando como
turbinas e geradores de indução na
geração de energia elétrica

Dissertação apresentada a Universidade
Federal de Itajubá para obtenção do título
de Mestre em Ciências em Engenharia da
Energia

Área de concentração:
Geração Hidrelétrica

Orientador:
Prof.º Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana

Co-orientador:
Prof.º Dr. Ângelo José Junqueira Rezek

Itajubá

- 2004 -

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jesus que me concedeu saúde, força, me abençoou e me iluminou para realizar este trabalho.

Aos meus Orientadores Espirituais que me encorajaram e me ajudaram nas horas difíceis.

Agradeço aos meus Pais, à minha Avó Jandira, aos meus tios Manoel, Adriana e Jandira por terem me ajudado a vencer esta batalha.

À minha tia Laura pela ajuda e pela revisão gramatical deste trabalho.

Agradeço à minha Amada Valéria, por ter me dado força e me encorajado a seguir em frente, mesmo diante das dificuldades.

Meus agradecimentos aos meus ex-professores, Mauro Pissiani e Roberto Brunow por terem escrito as cartas de recomendação para meu ingresso no Mestrado.

Ao meu orientador, Professor Augusto Nelson Carvalho Viana por ter me dado uma oportunidade de trabalho a fim de concluir esta dissertação e por ter muito me ensinado.

Meu agradecimento ao Professor Ângelo José Junqueira Rezek por ter me co-orientado neste trabalho e por ter me ensinado muito com sua simplicidade e sabedoria..

Ao Professor Geraldo Lúcio Tiago Filho por ter me concedido, gentilmente, uma sala e um computador para a realização desta dissertação e pela oportunidade de ingresso no Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH).

Ao Professor Zeca por ter, gentilmente, cedido o motor de indução utilizado neste trabalho.

Agradeço aos meus amigos Alexandre Estácio Féo, Tadeu Carneiro, Carlos Vanelli, Luis Carlos, Sérgio Paixão e Regina Storino (DRA) por terem me ajudado nas horas difíceis.

Aos funcionários Osvaldo de Melo Rodrigues, José Batista de Lima e Adailton Santos Oliveira, do Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidroelétricas (LHPCH) e ao funcionário Júlio do Laboratório de Etiquetagem de Bombas (LEB), por terem me auxiliado nos trabalhos experimentais.

Ao colega Marcos, da KSB Bombas, por ter cedido, gentilmente, os preços da bomba centrífuga, do motor de indução e dos acessórios utilizados no estudo de caso (Capítulo 5).

Meu agradecimento ao José Henrique, da RM Equipamentos, por ter cedido o preço da turbina Michell-Banki, do gerador síncrono e dos acessórios utilizados no estudo de caso (Capítulo 5).

À colega Camila, do CERPCH, pela revisão gramatical do “Abstract”.

Ao colega Adriano, do CERPCH, por ter cedido a figura 4.1.

À todas as pessoas que, direta ou indiretamente colaboraram neste trabalho.

A Jesus e aos meus Orientadores Espirituais.
Aos meus Pais.
À minha Amada Valéria.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS.....	5
2.1 – Fundamentação teórica	5
2.2 – Seleção da bomba para operar como turbina.....	6
2.2.1 – Método de Viana.....	7
2.2.2 – Método de Chapallaz.....	10
2.2.3 – Comparação entre os Métodos de Viana e de Chapallaz.....	15
2.3 – Modificações a serem realizadas na BFT.....	18
2.4 – Cálculo da altura geométrica de sucção.....	20
CAPÍTULO 3 – GERADORES DE INDUÇÃO.....	23
3.1 – Introdução.....	23
3.2 – Princípio de funcionamento do motor e do gerador de indução.....	24
3.3 – Auto excitação do gerador.....	26
3.4 – Influência da velocidade no processo de auto-excitação.....	30
3.5 – Seleção do gerador e do banco de capacitores para auto-excitação.....	32
3.6 – Determinação da potência elétrica e do rendimento do gerador de indução	37
3.7 – Controle da tensão no gerador de indução.....	38
3.8 – Métodos de controle da tensão gerada.....	40
3.8.1 – Método do capacitor série.....	40
3.8.2 – Método dos capacitores chaveados.....	42

3.8.3 – Método do controlador eletrônico de carga.....	44
3.8.4 – Método do reator saturado.....	45
3.8.5 – Método do indutor controlado.....	46
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	48
4.1 – Introdução.....	48
4.2 – Ensaio no grupo moto-bomba.....	48
4.2.1 – Características da bomba utilizada.....	48
4.2.2 – Características do laboratório de ensaios.....	49
4.2.3 – Procedimento operacional para o ensaio do grupo moto-bomba.....	51
4.2.4 – Equacionamento básico para o ensaio da bomba	52
4.2.4.1 – Vazão da bomba.....	52
4.2.4.2 – Velocidade média na entrada e na saída da bomba.....	53
4.2.4.3 – Altura total de elevação da bomba.....	53
4.2.4.4 – Potência hidráulica da bomba.....	54
4.2.4.5 – Potência elétrica do motor.....	55
4.2.4.6 – Rendimento do conjunto moto-bomba.....	56
4.2.4.7 – Potência de eixo da bomba.....	56
4.2.4.8 – Rendimento total da bomba.....	57
4.2.5 – Resultados obtidos no ensaio do grupo moto-bomba.....	57
4.3 – Ensaio no motor de indução.....	60
4.3.1 – Características do motor.....	60
4.3.2 – Ensaio a vazio e com o rotor travado.....	60
4.3.3 – Resultados dos ensaios no motor de indução.....	63
4.4 – Ensaio na BFT e no gerador de indução	64
4.4.1 – Características do laboratório de ensaios.....	64
4.4.2 – Determinação da altura manométrica na entrada da BFT.....	66
4.4.3 – Determinação da equação do medidor Venturi.....	69
4.4.4 – Determinação da altura referente à velocidade da água.....	71
4.4.5 – Determinação da altura total da BFT.....	72
4.4.6 – Determinação da potência hidráulica da BFT.....	73
4.4.7 – Determinação da potência elétrica gerada pela máquina de indução.....	74

4.4.8 – Determinação da potência aparente da máquina de indução.....	74
4.4.9 – Determinação do fator de potência do gerador de indução.....	75
4.4.10 – Determinação do rendimento do grupo-gerador.....	75
4.4.11 – Determinação do rendimento do gerador de indução.....	76
4.4.12 – Determinação do rendimento da BFT.....	76
4.4.13 – Ensaio no grupo-gerador.....	77
4.4.14 – Resultados obtidos nos ensaios do grupo-gerador.....	77
4.4.14.1 – Resultados obtidos nos ensaios da BFT.....	78
4.4.14.2 – Resultados obtidos nos ensaios do gerador de indução.....	82
4.4.14.3 – Resultados do grupo-gerador para o melhor rendimento.....	85
CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO.....	87
5.1 – Introdução.....	87
5.2 – A microcentral hidrelétrica Boa Esperança.....	87
5.3 – Seleção da BFT.....	88
5.4 – Seleção do gerador de indução e do banco de capacitores.....	96
5.5 – Comparação entre os custos dos equipamentos.....	102
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
ANEXO I – Resultados dos ensaios.....	109
ANEXO II – Fotos das partes constituintes da bomba.....	117
ANEXO III – Fotos dos equipamentos e instrumentos utilizados nos ensaios....	121

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** – Bomba funcionando como bomba – BFB, (VIANA, 1987)
- Figura 2.2** – Bomba funcionando como turbina – BFT, (VIANA, 1987)
- Figura 2.3** – Curvas de recepção da BFB e da BFT, (VIANA, 2002)
- Figura 2.4** – Coeficientes de altura e vazão, adaptado de (VIANA e NOGUEIRA, 1990)
- Figura 2.5** – Pré-seleção da BFT, (CHAPALLAZ et al, 1992)
- Figura 2.6** – Máximo rendimento da bomba em função da rotação específica e da vazão, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)
- Figura 2.7** – Coeficiente de altura, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)
- Figura 2.8** – Coeficiente de vazão, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)
- Figura 2.9** – Tubo de sucção montado na saída da BFT, (VIANA, 2002)
- Figura 2.10** – Coeficiente de cavitação de Thoma, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)
- Figura 3.1** – Motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo
- Figura 3.2** – Campo magnético girante, adaptado de (COGO et al, 1984)
- Figura 3.3** – Características operacionais do motor e do gerador de indução, adaptado de (CHAPMAN, 1991)
- Figura 3.4** – Gerador assíncrono auto-excitado
- Figura 3.5** – Processo de auto-excitação do gerador assíncrono, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1990)
- Figura 3.6** – Pré-seleção do motor para ser utilizado como gerador, adaptado (CHAPALLAZ et al, 1990)
- Figura 3.7** – Circuito equivalente do motor de indução
- Figura 3.8** - Relação experimental entre $\text{sen}(\phi_g)$ do gerador e $\text{sen}(\phi_m)$ do motor em função da potência nominal, adaptado de CHAPALLAZ et al (1990)
- Figura 3.9** – Regulação de tensão do gerador de indução, adaptado de (RESENDE, 1994)
- Figura 3.10** – Regulação de tensão do gerador de indução através de um capacitor em série, adaptado de (BASSET e POTTER, 1935)

Figura 3.11 – Tensão terminal em função da potência ativa na carga, para diversos fatores de potência, (CALDAS, 1980)

Figura 3.12 – Esquema para controle da tensão por meio de capacitores chaveados, (CHAPALLAZ et al, 1990)

Figura 3.13 – Variação da tensão em função da carga, (CHAPALLAZ et al, 1990)

Figura 3.14 – Diagrama simplificado do circuito de um controlador eletrônico de carga (CHAPALLAZ et al, 1992)

Figura 3.15 – Reatores saturados ligados em delta-estrela, (CALDAS, 1980)

Figura 3.16 – Método do indutor controlado (uma fase), (CALDAS, 1980)

Figura 4.1 – Esquema utilizado no LEB para o ensaio na bomba

Figura 4.2 – Circuito de ensaios de uma das linhas

Figura 4.3 – Rendimento em função da vazão para as rotações de 1740, 1800, 1840 e 1860rpm

Figura 4.4 – Altura em função da vazão para as rotações de 1740, 1800, e 1840 e 1860rpm

Figura 4.5 – Bancada de ensaios do motor de indução

Figura 4.6 – Esquema de montagem dos instrumentos e equipamentos

Figura 4.7 – Equipamentos e instrumentos utilizados no ensaio da BFT e do gerador de indução

Figura 4.8 – BFT e gerador de indução

Figura 4.9 – Bancada de instrumentos

Figura 4.10 – Banco de capacitores para a excitação do gerador

Figura 4.11 – Manômetro de colunas de mercúrio montado na entrada da BFT

Figura 4.12 – Medidor Venturi

Figura 4.13 – Rendimento do grupo gerador em função da vazão

Figura 4.14 – Altura da BFT em função da vazão

Figura 4.15 – Potência elétrica gerada em função da altura

Figura 4.16 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n=1740\text{rpm}$

Figura 4.17 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n=1800\text{rpm}$

Figura 4.18 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n=1840\text{rpm}$

Figura 4.19 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n=1860\text{rpm}$

Figura 4.20 – Frequência do gerador em função da potência elétrica gerada

Figura 4.21 – Fator de potência em função da potência elétrica gerada

Figura II.1 – Desmontagem da bomba

Figura II.2 – Voluta da bomba

Figura II.3 – Vista frontal do rotor

Figura II.4 – Vista lateral do rotor

Figura II.5 – Caixa de lubrificação da bomba

Figura II.6 – Eixo e rolamento

Figura III.1 – Vista geral da linha de recalque, das válvulas esfera, globo e dos medidores eletromagnéticos no Laboratório de Etiquetagem de Bombas (LEB)

Figura III.2 – Tanque de calibração – LEB

Figura III.3 – Computador para aquisição de dados – LEB

Figura III.4 – Ensaio do grupo moto-bomba – LEB

Figura III.5 – Vista geral do Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidroelétricas (LHPCH)

Figura III.6 – Tanque de sucção

Figura III.7 – Piezômetro

Figura III.8 – Bomba utilizada para simular a altura e a vazão da BFT

Figura III.9 – Vaso de pressão

Figura III.10 – Manômetro de colunas de mercúrio para medição da pressão manométrica na entrada da BFT

Figura III.11 – Medidor Venturi para medição da vazão

Figura III.12 – Manômetro invertido de colunas de mercúrio do medidor Venturi

Figura III.13 – Válvula gaveta

Figura III.14 – Vista geral da bancada de ensaios

Figura III.15 – Resistência líquida para simulação da carga ativa

Figura III.16 – Motor de indução utilizado para simular partida de motores

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre os Métodos de Viana e de Chapallaz

Tabela 3.1 – Relação entre o número de pólos do motor de indução e sua velocidade síncrona

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio da bomba para o ponto de melhor rendimento

Tabela 4.2 – Comparação entre os coeficientes de altura e de vazão

Tabela 4.3 – Pontos onde o grupo gerador operou com máximo rendimento

Tabela 5.1 – Dados principais do aproveitamento e dos equipamentos

Tabela 5.2 – Comparação entre os custos dos equipamentos

Tabela I.1 – Resultados do ensaio no grupo moto-bomba para $n_b = 1740\text{rpm}$

Tabela I.2 – Aplicação das Leis de Afinidades para $n_b = 1800\text{rpm}$, 1840rpm e 1860rpm

Tabela I.3 – Resultado dos ensaios no motor de indução

Tabela I.4 – Resultados dos ensaios na BFT, para $n_{gg} = 1740\text{rpm}$

Tabela I.5 – Resultados dos ensaios no gerador, para $n_{gg} = 1740\text{rpm}$

Tabela I.6 – Resultados dos ensaios na BFT, para $n_{gg} = 1800\text{rpm}$

Tabela I.7 – Resultados dos ensaios no gerador, para $n_{gg} = 1800\text{rpm}$

Tabela I.8 – Resultados dos ensaios na BFT, para $n_{gg} = 1840\text{rpm}$

Tabela I.9 – Resultados dos ensaios no gerador, para $n_{gg} = 1840\text{rpm}$

Tabela I.10 – Resultados nos ensaios da BFT, para $n_{gg} = 1860\text{rpm}$

Tabela I.11 – Resultados nos ensaios no gerador, para $n_{gg} = 1860\text{rpm}$

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BFT – Bomba Funcionando como Turbina

BFB – Bomba Funcionando como Bomba

DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

LEB – Laboratório de Etiquetagem de Bombas

LHPCH – Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas

MCH – Micro Central Hidrelétrica

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

LISTA DE SÍMBOLOS

φ – latitude local [°]

ρ – massa específica da água [kg/m³]

η_b – rendimento da bomba [1]

ω_{cg} – velocidade angular do campo magnético girante do gerador [rad/s]

η_g – rendimento do gerador de indução [1]

ω_g – velocidade angular do eixo do gerador [rad/s]

Δh – diferença de altura lida no manômetro de colunas d'água [m]

ρ_{Hg} – densidade do mercúrio [kg/m³]

ϕ_m – ângulo de fase do motor [°]

η_{gg} – rendimento do grupo-gerador [1]

η_m – rendimento do motor de indução [1]

η_{mb} – rendimento do conjunto moto-bomba [1]

η_t – rendimento da BFT [1]

σ_t – coeficiente de cavitação de Thoma [1]

τ_t – tensão no eixo da bomba [N/m²]

ΔV – queda de tensão sobre uma impedância [V]

a, b – constantes obtidas na calibração do medidor [1]

A – altitude local [m]

A_s – área da seção transversal do estrangulamento do Venturi [m²]

A_p – anel piezométrico

B – bomba para simulação da altura (LHPCH)

c, d, e, f – constantes de calibração dos transdutores [1]

C – capacitância necessária à auto-excitação do gerador [μF/fase]

C₅₀ – capacitância a 50Hz [μF/fase]

C₆₀ – capacitância a 60Hz [μF/fase]

C_{eq} – capacitância equivalente “enxergada” pelos terminais do gerador [μF/fase]

c_H – coeficiente de altura [1]

cos(φ_g) – fator de potência do gerador de indução [1]

cos(φ_m) – fator de potência do motor de indução [1]

- c_Q – coeficiente de vazão [1]
 C_s – capacitância série [$\mu\text{F}/\text{fase}$]
 C_V – constante do Venturi [1]
 d – diâmetro do eixo da bomba [m]
 D – diâmetro interno do Venturi [m]
 D_{1b}, D_{2b} – diâmetros internos na entrada e na saída da bomba, respectivamente [m]
 D_{1t}, D_{3t} – diâmetros internos na entrada e na saída da BFT, respectivamente [m]
 E – medidor de vazão eletromagnético
 f – frequência [Hz]
 f_g – frequência elétrica gerada pela máquina de indução [Hz]
 g – aceleração local da gravidade [m/s^2]
 h_1 – altura da coluna de mercúrio [m]
 h_2 – altura da coluna de mercúrio do manômetro [m]
 h_3 – altura da coluna de água [m]
 H_g – campo magnético girante [A. espira/m]
 H – altura referente à velocidade da água [m]
 H_{nb} – altura referente à velocidade nominal da bomba [m]
 H_{2b} – altura da bomba para uma velocidade qualquer da bomba [m]
 H_b – altura total de elevação da bomba [m]
 H_{ob} – altura referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m]
 H_s – altura geométrica de sucção [m]
 H_t – altura da BFT ou altura disponível no aproveitamento [m]
 I – corrente [A]
 I_m – corrente de saída do medidor de vazão eletromagnético [mA]
 I_1, I_2 – correntes dos transdutores de pressão 1 e 2, respectivamente [mA]
 I_{Ag} – corrente do gerador de indução [A]
 I_{Sg} – corrente referente à potência aparente do gerador [A]
 L_1 – distância entre o anel piezométrico A_{p1} e a saída da bomba
 L_2 – distância entre o anel piezométrico A_{p2} e a entrada da bomba
 M_1 – manômetro de colunas de mercúrio invertido do Venturi
 M_2 – manômetro de colunas de mercúrio

- n_{2b} – velocidade da bomba diferente da nominal [rpm]
- n_b – velocidade da bomba [rpm ou rps]
- n_{dt} – rotação de disparo da BFT [rpm]
- n_{nb} – rotação nominal da bomba [rpm]
- n_{ob} – velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [rpm]
- n_{qA} – rotação específica da bomba ou da BFT no Sistema Internacional [1]
- n_{qb} – rotação específica da bomba no Sistema Técnico
- n_{qt} – rotação específica da BFT no Sistema Técnico
- n_r – velocidade do rotor [rpm]
- n_s – velocidade do campo magnético girante ou velocidade síncrona [rpm]
- n_t – rotação da BFT [rpm] ou [rps]
- P – número de pólos do gerador
- P_z – anel piezométrico
- p_{1b} – pressão na entrada da bomba [Pa]
- p_{2b} – pressão na saída da bomba [Pa]
- p_{1t} – pressão na entrada da BFT [Pa]
- p_{3t} – pressão na saída da BFT [Pa]
- P_{eb} – potência de eixo da bomba [kW]
- P_{eg} – potência de eixo do gerador [kW]
- P_{elg} – potência ativa gerada pela máquina de indução [kW]
- P_{elm} – potência elétrica ativa absorvida pela máquina operando como motor [kW]
- P_{et} – potência de eixo da BFT [W]
- P_{et}/P_n – relação experimental obtida da figura 3.4 [1]
- P_{hb} – potência hidráulica da bomba [kW]
- P_{ht} – potência hidráulica da BFT [kW]
- P_{maxb} – pressão máxima da bomba [m]
- P_{maxt} – pressão máxima admissível na BFT [m]
- P_{nm} – potência nominal do motor [kW]
- Q – potência reativa [var]
- Q_{nb} – vazão referente à velocidade nominal da bomba [m³/s]
- Q_{2b} – vazão da bomba para uma velocidade da nominal [m³/s]
- Q_b – vazão da bomba [m³/s]

- Q_g – energia reativa necessária à auto-excitação do gerador [kvar]
- Q_m – energia reativa absorvida pela máquina de indução operando como motor [kvar]
- Q_{ob} – vazão referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m^3/s]
- Q_t – vazão da BFT ou disponível no aproveitamento [m^3/s]
- r – linha de recalque
- r_1 – resistência do circuito do estator [$\Omega/fase$]
- r_{1Y} – resistência equivalente (estrela) do circuito do estator [$\Omega/fase$]
- r_2 – resistência do circuito do rotor [$\Omega/fase$]
- r_m – resistência do circuito magnético [$\Omega/fase$]
- x_1 – reatância do circuito do estator [$\Omega/fase$]
- x_2 – reatância do circuito do rotor [$\Omega/fase$]
- x_m – reatância do circuito magnético [$\Omega/fase$]
- r_o – linha de retorno
- R_{sb} – reservatório de sucção da bomba
- R_c – resistência da carga [$\Omega/fase$]
- R_{st} – reservatório de sucção da BFT
- r_{medido} – resistência medida entre duas fases quaisquer motor [Ω]
- s – escorregamento [1]
- s_u – linha de sucção da bomba
- S – potência aparente [VA]
- S_g – potência aparente do gerador de indução [kVA]
- T_c – tanque de calibração
- t – temperatura da água [$^{\circ}C$]
- v_{1b}, v_{2b} – velocidades médias do escoamento na entrada e na saída da bomba, respectivamente [m/s]
- v_{1t}, v_{3t} – velocidades médias do escoamento na entrada e na saída da BFT, respectivamente [m/s]
- V – tensão de linha [V]
- V_e – válvula esfera da linha de recalque da bomba
- V_g – tensão gerada pela máquina de indução operando como gerador [V]

V_{g0} – tensão do gerador de indução operando a vazio [V]

V_{go} – válvula globo da linha de recalque da bomba

V_p – válvula de pé da bomba

V_{pr} – vaso de pressão

W – potência ativa [W]

W_0 – perdas a vazio da máquina de indução [W]

W_1 – potência lida no wattímetro 1 [W]

W_2 – potência lida no wattímetro 2 [W]

W_{perdas} – perdas totais da máquina de indução [W]

$W_{travado}$ – perdas nos circuitos do estator e do rotor, obtidas no ensaio com o rotor travado [W]

x – altura da coluna d'água no piezômetro (figura 4.11) [m]

z_{1b} – cota da entrada da bomba [m]

z_{2b} – cota da saída da bomba [m]

z_{1t} – cota da entrada da BFT [m]

z_{3t} – cota da saída da BFT [m]

Z – impedância [Ω]

RESUMO

A utilização de bombas funcionando como turbinas (BFT's) em micro recursos hidroenergéticos para substituir as turbinas convencionais como Pelton, Francis e Hélices têm sido comum nos países como EUA, Alemanha e França. Entretanto, no Brasil essa prática e a utilização de geradores de indução acoplados a BFT's continuam no âmbito de experiências em laboratórios, como aqueles feitos no Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas da Universidade Federal de Itajubá (LHPCH – UNIFEI). Este trabalho, baseado em resultados experimentais realizados no LHPCH, (VIANA, 1987), (NOGUEIRA, 1990) descreve e propõe a utilização de bombas operando como turbinas e motores de indução operando como geradores (geradores de indução) na geração de energia elétrica de um sistema isolado. Ensaios foram realizados no grupo moto-bomba no Laboratório de Etiquetagem de Bombas (LEB) da UNIFEI, a fim de se levantar as curvas que caracterizam seu funcionamento no bombeamento de água. Também foram realizados ensaios na BFT e no gerador de indução com a finalidade de levantar suas características operacionais na geração de energia elétrica. Dos resultados, obteve-se relações experimentais entre a altura e a vazão da bomba e da BFT, onde também foi constatada a viabilidade técnica da BFT e do gerador de indução. A fim de mostrar a viabilidade econômica em microcentrais hidrelétricas, é mostrado o exemplo da microcentral Boa Esperança, situada no município de Delfim Moreira, no sul de Minas Gerais, onde é feita uma comparação entre o custo de um grupo gerador síncrono funcionando com uma turbina Michell-Banki e um grupo gerador assíncrono operando com uma BFT.

ABSTRACT

The use of pumps working as turbines (PATs) in micro hydropower plants - MHP in order to replace conventional turbines like Pelton, Francis and Propeller is very common in the USA, Germany and France. Meanwhile, in Brazil the utilization of induction generators working with PAT's still stand in laboratory scope and experiments, as in the Hydromechanics Laboratory for Small Hydropower Plants – LHPCH – UNIFEI, (VIANA, 1987) and (NOGUEIRA, 1990). This work, based on experimental results carried on the LHPCH, describe and recommend the utilization of induction motors working as generators (inductions generators) and operating with PAT's in the electric generating in isolated systems. Tests were realized, on a pump and a motor in the Label Laboratory of Pumps – LEB in UNIFEI, to built a curve that describes their behavior on water pumping. Tests in the PAT's and the induction generator were also realized to assemble the operational characteristics in the electric generating. Experimental matching were obtained between pump's and PAT's head and flow, as shown in the induction generator's and PAT's technical feasibility. Moreover this paper demonstrate the financial attractiveness in micro hydropower plants, as presented in the example of Boa Esperança MHP, located in Delfim Moreira, Minas Gerais. Where a comparison cost was developed between the synchronous generator group working with a Michell-Banki turbine and a asynchronous generator group operating with a PAT.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No Brasil, a exploração dos recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica iniciou-se ao final do século XIX, com a implantação de centrais hidrelétricas de pequeno porte, geralmente bancadas pela municipalidade ou por empresários que tinham interesse de suprir energeticamente seus investimentos no surto de industrialização ocorrida na época. Isto se deu de tal maneira que atualmente é comum encontrar centrais hidrelétricas associadas às fazendas, usinas de açúcar, indústria de papel, de tecidos e às pequenas prefeituras (TIAGO FILHO, 2000).

A política tarifária da década de 50 e uma inflação significativa passaram a desestimular novos investimentos no setor elétrico. Tal fato, associado a outros de natureza política, fez com que o Estado começasse a ter maior participação no setor, garantindo a expansão do parque gerador, (SANTOS e BAJAY, 1986). Desta forma, o Brasil construía Furnas no final da década de 50, sendo a primeira central brasileira a ter potência acima de 1000 MW. Toda a filosofia de suprimento de energia elétrica estava sendo mudada, com o surgimento dos grandes sistemas elétricos de natureza estatal, ao invés dos pequenos sistemas com características regionais e pertencentes à iniciativa privada ou municipal.

Outro fato que ocorreu na década de 50 foi o programa de eletrificação rural, normalmente baseado no padrão monofásico, conforme era utilizado nos EUA, cuja frequência era de 60Hz, o que tornava difícil a substituição de peças das usinas que operavam com frequência de 50Hz. Este programa, suportado por financiamento externo, era subsidiado. Aliado a isto, o fato da energia do grande sistema ter boas características técnicas, fez com que o meio rural abandonasse os suprimentos usuais de energia. Assim, o motor elétrico substituiu muitas rodas d'água e as pequenas gerações hidrelétricas foram abandonadas (VIANA, 1997).

Várias crises de energia ocorreram até os dias atuais, como a crise do petróleo em 1973, onde fez se despertar no país as discussões sobre as fontes renováveis de energia, com destaque no início dos anos 80 para as pequenas centrais hidrelétricas (PCH's), que estavam quase no esquecimento.

O governo federal estabeleceu diretrizes sobre fontes renováveis, promoveu encontros sobre PCH's, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) conceituou a PCH através da portaria 109, a Eletrobrás desenvolveu manuais sobre micro, mini e pequenas centrais hidrelétricas e laboratórios foram construídos para atender aos fabricantes de equipamentos eletro e hidromecânicos e as pesquisas. Vários cursos foram realizados e os assuntos disseminados em todo o país, mas os anos oitenta estavam terminando e os resultados esperados no que tange aos investimentos em PCH's não foram os mais positivos. Uma das razões desse resultado foi o sistema elétrico ter um domínio estatal aliada à queda no preço do petróleo.

Nos anos 90, com as leis são assinadas, aparece o autoprodutor, o produtor independente, extingue-se o DNAEE e cria-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A conceituação de PCH's é modificada como nas leis 9074 de 07/95 e 9427 de 12/96, onde estabelece que, autoprodutor e produtor independente com potência abaixo ou igual a 1 MW não necessitam de autorização e concessão, e que, de 1 a 30 MW de potência necessitam apenas de autorização.

Nos anos seguintes até o ano 2001, com novas leis e os processos de privatizações no setor elétrico, houve uma melhoria nos investimentos em PCH's, aumentando esta modalidade de geração de energia junto à matriz energética do nosso país. Entretanto essas leis beneficiaram empreendedores de centrais com potência acima de 1 MW, onde as gerações de potências inferiores a esse valor foram esquecidas, principalmente aquelas inferiores a 100 kW, que caracterizam as microcentrais hidrelétricas.

Nesses últimos anos não existe censo que determine o atual estado de geração das micro e minicentrais. Geralmente elas são operadas por autoprodutores para fins de consumo próprio e estão associadas a empreendimentos agroindustriais. Supõe-se que existem mais de 1000 micros e minicentrais com potências médias de 300 kW e seu estado de conservação é ignorado, (TIAGO FILHO, 2000).

Como os incentivos para esse tipo de investimento são poucos e os custos do grupo gerador de uma microcentral hidrelétrica giram em torno de até 50% do total do investimento o Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais hidrelétricas da Universidade Federal de Itajubá (LHPCH-UNIFEI) vem desenvolvendo pesquisas

em equipamentos eletromecânicos e hidromecânicos. Além das pesquisas em melhorias de eficiência nas turbinas convencionais Pelton, Francis e Hélices, o LHPCH desenvolveu nos últimos 20 anos pesquisas em turbinas não convencionais como Michell-Banki, BFT's, turbinas Turgo e os reguladores de carga para controle da rotação em grupos geradores, equipamentos estes de custos baixos.

No trabalho de (TIAGO FILHO, 1987) foi desenvolvido um modelo brasileiro de uma turbina Michell-Banki, enquanto que (VIANA, 1987) desenvolveu um procedimento de seleção de bombas centrífugas para operar em reverso como turbinas. No trabalho de (BERNARDES et al, 1993) foi desenvolvido um regulador eletrônico de carga para atender microaproveitamentos utilizando BFT's e turbinas Michell-Banki. A grande vantagem de se utilizar a BFT é o baixo custo devido à sua ampla disponibilidade no mercado aliada ao seu bom funcionamento como turbina.

Outro fator que reduz os custos de implantação de uma microcentral hidrelétrica é a utilização de motores de indução como geradores. Segundo (CHAPALLAZ et al, 1990), para potências até 10kVA o gerador de indução e o banco de capacitores para sua excitação custam a metade do preço de um gerador síncrono equivalente. Para potências até 25kVA esta diferença se reduz para um terço. Outra vantagem que o gerador de indução possui e relação ao gerador síncrono é a sua robustez e ausência de escovas e anéis coletores. A ausência destes elementos reduz bastante a manutenção da máquina de indução, tornando-se praticamente nula se comparada à manutenção no gerador síncrono, sendo outro fator que torna esta alternativa bastante interessante.

Para dar continuidade a esses trabalhos, essa dissertação tem como objetivo um estudo de bombas funcionando como turbinas acionando geradores de indução.

Para atingir este objetivo, uma bomba centrífuga acoplada a um motor de indução disponível no laboratório foi testada como bomba. Em seguida, utilizando a inversão do fluxo de água, a bomba foi ensaiada como turbina e o motor como gerador, onde constatou-se sua viabilidade técnica.

Para mostrar a viabilidade econômica da utilização da BFT e do gerador de indução, apresenta-se no trabalho um estudo de caso em uma microcentral existente.

Em face de tantas vantagens, pergunta-se então: por que não utilizar bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica em microaproveitamentos? Esta é a questão que este trabalho propõe a responder.

Nesta dissertação foram utilizados uma bomba e um motor de pequeno porte na análise experimental realizada no Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas e no Laboratório de Etiquetagem de Bombas (LEB) ambos pertencentes à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). O trabalho está dividido como descrito a seguir.

No capítulo 2 é descrito o estado da arte dos geradores de indução, suas principais características, o método de seleção do motor mais adequado para ser utilizado como gerador, assim como o método de seleção do banco de capacitores para sua auto-excitação e as principais técnicas de controle da tensão gerada e da rotação.

No capítulo 3 disserta-se sobre as bombas operando como turbinas, suas principais características, os métodos utilizados para a seleção da bomba, ou seja, aqueles propostos nos trabalhos de (VIANA, 1987) e de (CHAPALLAZ et al, 1992), faz-se uma comparação entre as duas metodologias e descreve-se algumas modificações que devem ser realizadas na bomba que irá operar como turbina.

No capítulo 4 são descritos os experimentos feitos no grupo moto-bomba, no motor e no grupo-gerador utilizado neste trabalho. Lá são mostradas as curvas que caracterizam o funcionamento tanto do grupo moto-bomba como do grupo-gerador.

No capítulo 5 é feito um estudo de caso na microcentral hidrelétrica Boa Esperança, situada no município de Wenceslau Brás, estado de Minas Gerais, onde se compara os custos de aquisição entre um grupo-gerador utilizando uma BFT e um gerador de indução e um grupo-gerador utilizando uma turbina Michell-Banki e um gerador síncrono.

No capítulo 6 são feitas as conclusões e as sugestões para um futuro trabalho.

CAPÍTULO 2

BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINAS

2.1 – Fundamentação teórica

Para que a bomba opere como turbina é necessário que se inverta o sentido do fluxo do fluido, cuja consequência é a inversão da rotação do rotor, como pode ser visto nas figuras 2.1 e 2.2.

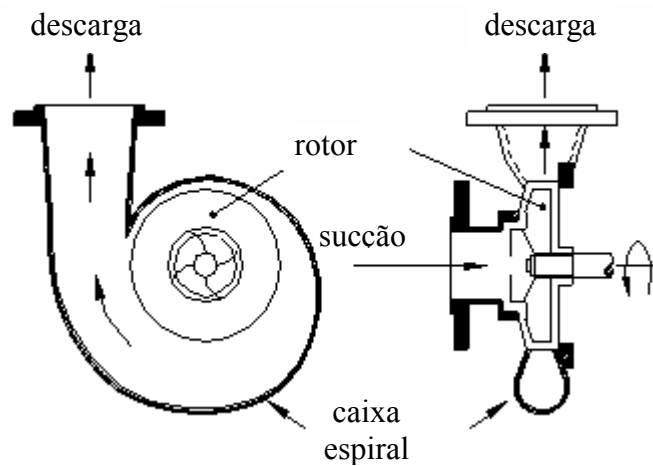


Figura 2.1 – Bomba funcionando como bomba – BFB, (VIANA, 1987)

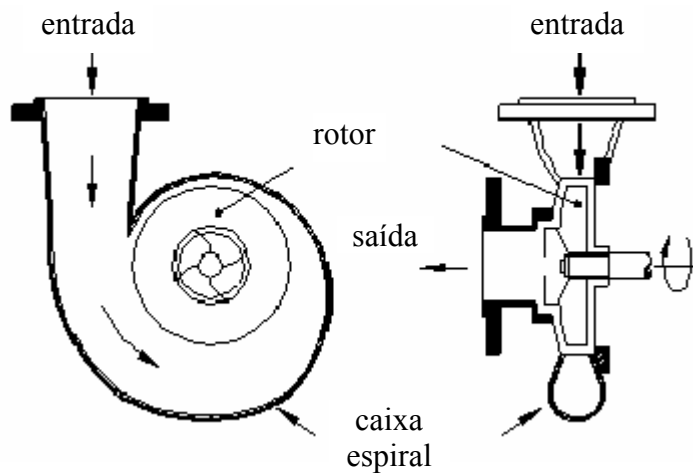


Figura 2.2 – Bomba funcionando como turbina – BFT, (VIANA, 1987)

No entanto, para que o rendimento da bomba operando como turbina seja igual àquele da bomba operando como bomba, é necessário que a altura e a vazão da BFT sejam maiores que as da BFB, para a mesma rotação, (VIANA, 1987). Estes aumentos são necessários a fim de se compensar as perdas internas da máquina, devido à inversão do fluxo. A consequência disso é o aumento da potência de eixo quando a máquina estiver operando como turbina. A figura 2.3 mostra as curvas de recepção da bomba operando como bomba e como turbina, operando com rotação constante.

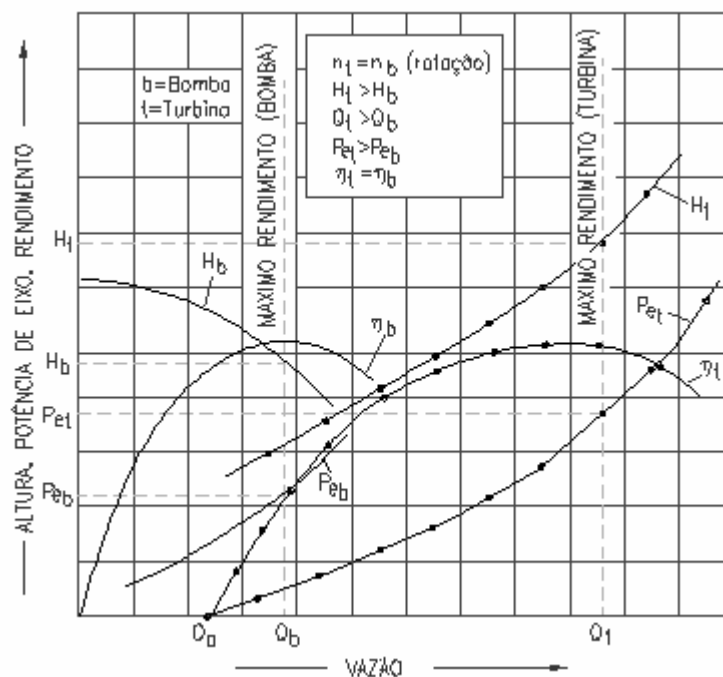


Figura 2.3 – Curvas de recepção da BFB e da BFT, (VIANA, 2002)

Como pode ser observada na figura 2.3, a potência de eixo da BFT é maior do que a da BFB, portanto deve ser verificada a tensão que o material do eixo vai ser submetido, de acordo com a seção 2.3.

2.2 – Seleção da bomba para operar como turbina

Como a altura e a vazão da BFT são maiores que as da BFB, houve a necessidade de se desenvolver métodos para selecionar a bomba que vai operar como

turbina. No Brasil, este trabalho foi realizado por (VIANA, 1987) e (NOGUEIRA, 1990), onde foram realizados ensaios em bombas de fabricantes nacionais. Os resultados destes trabalhos e de outros autores foram coeficientes obtidos experimentalmente, que relacionam a altura e a vazão da BFT e da BFB em função da rotação específica da bomba. Coeficientes estes denominados coeficientes de altura e de vazão.

Outro método semelhante foi desenvolvido por (CHAPALLAZ et al, 1992) na Europa, que também realizou ensaios em diversas bombas e levantou coeficientes experimentais de altura e de vazão em função da rotação específica da bomba.

Os dois métodos são semelhantes, exceto pelo fato de que (CHAPALLAZ et al, 1992) leva em consideração o rendimento da bomba nas curvas utilizadas na determinação dos coeficientes, e (VIANA, 1987) utiliza o rendimento da bomba retirado do catálogo do fabricante.

Portanto, com base nos dados do aproveitamento energético, ou seja, a altura e vazão disponíveis, e na rotação específica, é possível selecionar uma bomba para operar como turbina através dos métodos propostos. No entanto, é importante considerar que estes métodos são aproximados, o que pode levar a diferenças na seleção da bomba correta.

2.2.1 – Método de Viana

Neste método, a altura e a vazão da bomba são dados pelas equações (2.1) e (2.2) a seguir:

$$H_b = c_H \cdot H_t \quad (2.1)$$

$$Q_b = c_Q \cdot Q_t \quad (2.2)$$

Onde:

H_b – altura da bomba que será utilizada como turbina [m];

c_H – coeficiente de altura [1];

H_t – altura disponível no aproveitamento (da BFT) [m];

Q_b – vazão da bomba que será utilizada como turbina [m^3/s];

c_Q – coeficiente de vazão [1];

Q_t – vazão disponível no aproveitamento (BFT) [m^3/s].

De posse destes dados e da rotação da BFT (1800 ou 3600rpm), calcula-se a rotação específica da máquina através da equação (2.3).

$$n_{qA} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{3/4}} \cdot 10^3 \quad (2.3)$$

Onde:

n_{qA} – rotação específica da bomba ou da BFT no Sistema Internacional [1];

n_t – rotação da BFT [rps];

Q_t – vazão da BFT [m^3/s];

g – aceleração da gravidade [m/s^2];

H_t – altura da BFT [m].

Conhecida a rotação específica, determinam-se os coeficientes de altura e vazão com base na figura 2.4. Note que na figura 2.4, (NOGUEIRA, 1990), utilizam bombas com rotação específica até 200, ou seja, rotores radiais ou centrífugos.

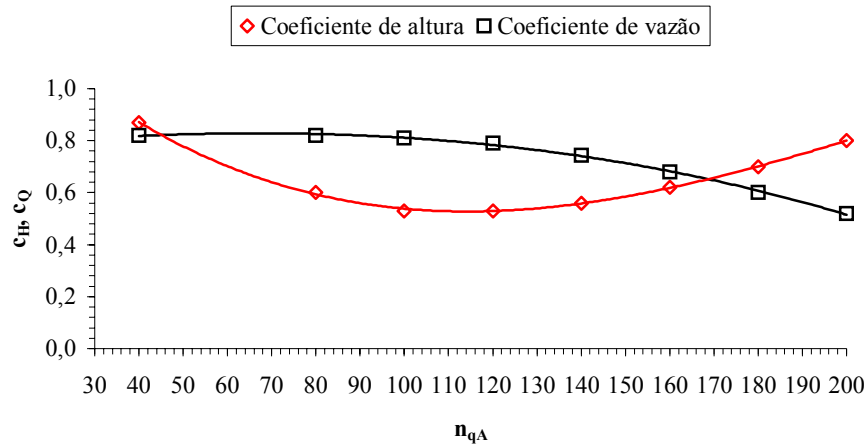


Figura 2.4 – Coeficientes de altura e vazão, adaptado de (NOGUEIRA, 1990)

Determinados os coeficientes e de posse da altura e da vazão disponíveis no aproveitamento energético, calcula-se a altura e a vazão da bomba, através das equações (2.1) e (2.2). É importante salientar que, os catálogos dos fabricantes não levam em consideração as rotações de 1800 e 3600rpm (velocidades síncronas dos motores de indução), pois as bombas operam abaixo destas, em função da velocidade dos motores assíncronos. Estas rotações situam-se em torno de 1750 e 3500rpm. Há necessidade, no entanto, de fazer um ajuste na altura e na vazão da bomba a fim de se considerar a rotação encontrada nos catálogos. Isto pode ser feito, com boas aproximações, utilizando-se as Leis de Semelhança, através das equações (2.4) e (2.5).

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot H_b \quad (2.4)$$

$$Q_{ob} = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b \quad (2.5)$$

Onde:

H_{ob} – altura referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m];

n_{ob} – velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [rpm];

n_b – velocidade da bomba [1800rpm ou 3600rpm];

H_b – altura referente às velocidades de 1800rpm ou 3600rpm [m];

Q_{ob} – vazão referente à velocidade nominal da bomba encontrada no catálogo do fabricante [m^3/s];

Q_b – vazão referente às velocidades de 1800 ou 3600rpm [m^3/s].

Realizados estes procedimentos, seleciona-se a bomba, através dos catálogos de fabricantes, que oferece o melhor rendimento possível, que, para a turbina será o mesmo da bomba, na mesma rotação.

2.2.2 – Método de Chapallaz

Neste método, a altura e a vazão da bomba podem ser determinadas através das equações (2.6) e (2.7).

$$H_b = \frac{H_t}{c_H} \quad (2.6)$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{c_Q} \quad (2.7)$$

Onde:

H_b – altura da bomba que será utilizada como turbina [m];

H_t – altura disponível no aproveitamento (da BFT) [m];

c_H – coeficiente de altura [1];

Q_b – vazão da bomba que será utilizada como turbina [m];

Q_t – vazão disponível no aproveitamento (da BFT) [m^3/s];

c_Q – coeficiente de vazão [1].

Diferente do método proposto por (VIANA, 1987), (CHAPALLAZ et al, 1992) apresentam resultados desde as bombas radiais ou centrífugas, mistas e axiais abrangendo toda a faixa de rotação específica. Além disso, consideram também as bombas de vários estágios e as de rotor gêmeo ou duplo.

A figura 2.5 mostra a faixa de vazão e altura das bombas que poderão ser utilizadas como turbinas e acrescenta a potência hidráulica desde 1kW até 1000kW, diferentemente de (VIANA, 1987) que limita a potência em 50kW, que corresponde à potência de uma microcentral hidroelétrica.

Baseando-se na altura e na vazão disponíveis no aproveitamento, seleciona-se o tipo de bomba a ser utilizado, através da figura 2.5.

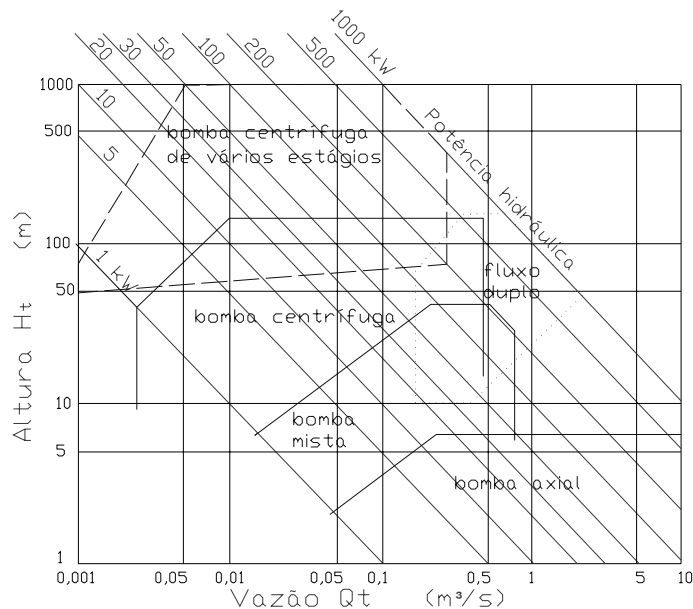


Figura 2.5 – Pré-seleção da BFT, (CHAPALLAZ et al, 1992)

Selecionado o tipo de bomba, calcula-se a rotação específica da BFT através da equação (2.8).

$$n_{qt} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{3/4}} \quad (2.8)$$

Onde:

n_{qt} – rotação específica da BFT no Sistema Técnico;

n_t – rotação da BFT [rpm];

Q_t – vazão da BFT [m^3/s];

H_t – altura da BFT [m].

Outra diferença neste método consiste no cálculo da rotação específica da bomba, baseando-se na rotação específica da BFT. A equação (2.9), obtida experimentalmente, permite tal cálculo.

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (2.9)$$

Onde:

n_{qb} – rotação específica da bomba;

n_{qt} – rotação específica da BFT, calculada de acordo com a equação (2.8).

Feito isso, estima-se a vazão da bomba, através da equação (2.10), que oferece uma boa aproximação para fins práticos.

$$Q_b = \frac{Q_t}{1,3} \quad (2.10)$$

Onde:

Q_b – vazão da bomba [m^3/s];

Q_t – vazão da BFT [m^3/s].

Deve se salientar que, esta equação é apenas uma estimativa da vazão da bomba (CHAPALLAZ et al, 1992), para que seja feita uma pré-seleção da máquina. Esta estimativa da vazão será útil, como se verá adiante, na determinação do

rendimento da bomba. O coeficiente 1,3 é chamado de fator de conversão médio, (CHAPALLAZ et al, 1992).

Com base na rotação específica e na vazão da bomba estima-se o rendimento da bomba por meio da figura 2.6.

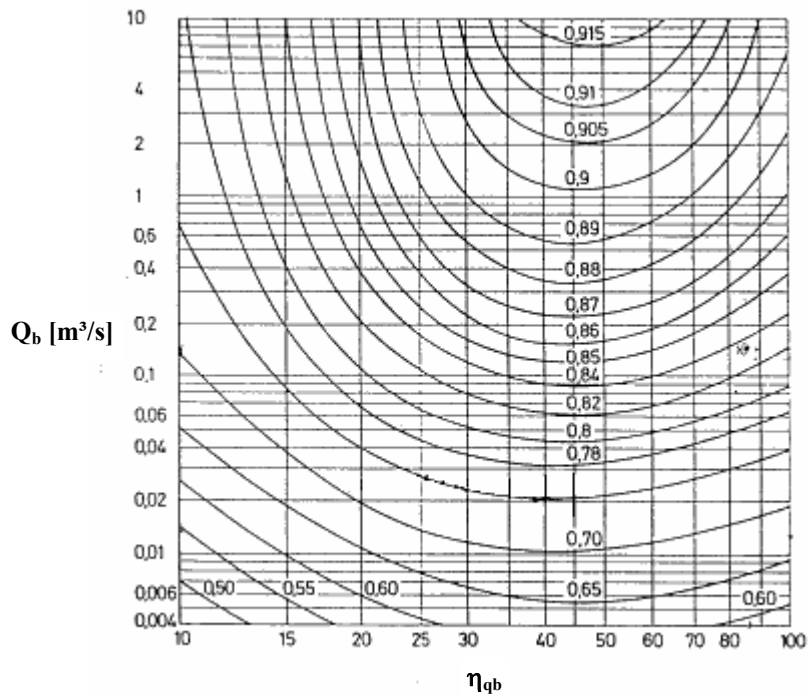


Figura 2.6 – Máximo rendimento da bomba em função da rotação específica e da vazão, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)

Conhecendo-se a rotação específica e o rendimento da bomba, que será igual ao da BFT, determinam-se os coeficientes de altura e vazão através das figuras 2.7 e 2.8.

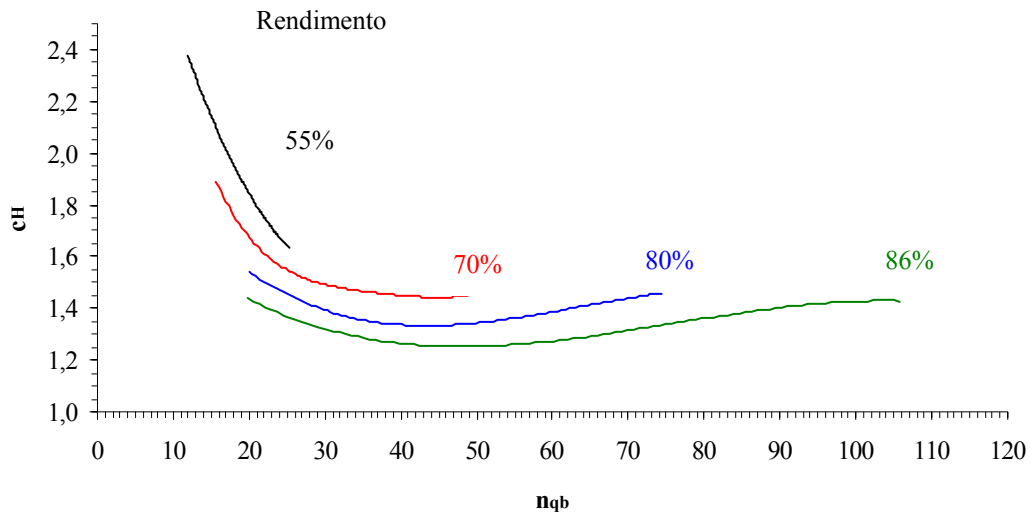


Figura 2.7 – Coeficiente de altura, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)

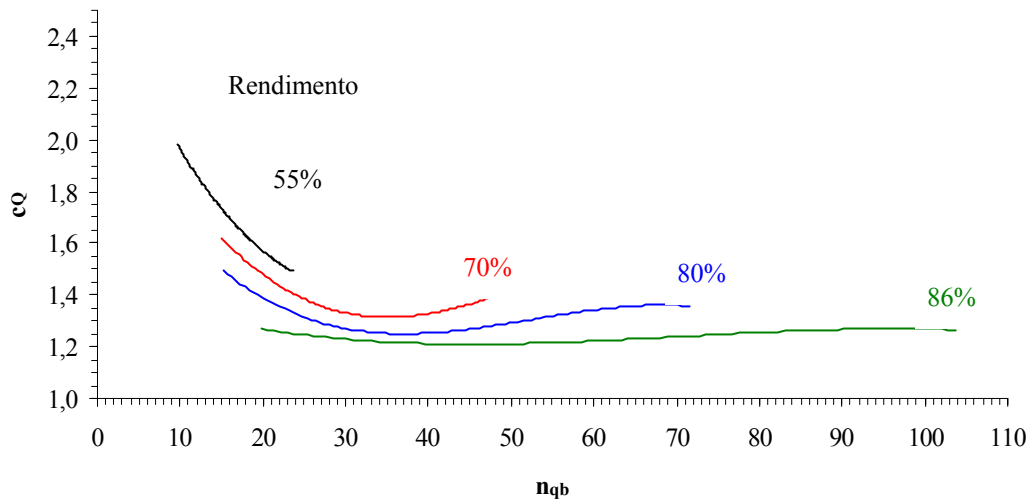


Figura 2.8 – Coeficiente de vazão, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)

Tal como o método de (VIANA, 1987), determinados os coeficientes e , conhecendo-se a altura e a vazão do aproveitamento e calcula-se a altura e a vazão da bomba, através das equações (2.6) e (2.7). Através das Leis de Semelhança ajusta-se a rotação e seleciona-se a bomba que oferece melhor rendimento possível, nos catálogos dos fabricantes.

2.2.3 – Comparação entre os Métodos de Viana e de Chapallaz

Nesta seção será mostrado um exemplo, onde será selecionada uma bomba, utilizando-se os Métodos de Viana e de Chapallaz, a fim de se fazer uma comparação entre os resultados obtidos.

Supondo que a altura de um determinado aproveitamento seja $H_t = 20\text{m}$, que a vazão seja $Q_t = 0,100\text{m}^3/\text{s}$ e que a rotação da BFT seja 1800rpm (30rps), a rotação específica será, através da equação (2.3):

$$n_{q_A} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{3/4}} \cdot 10^3 \quad (2.3)$$

$$n_{q_A} = 181$$

Da figura 2.4:

$$c_H = 0,74$$

$$c_Q = 0,60$$

Logo, a altura e a vazão da bomba serão, através das equações (2.1) e (2.2):

$$H_b = c_H \cdot H_t \quad (2.1)$$

$$H_b = 14,8\text{m}$$

$$Q_b = c_Q \cdot Q_t \quad (2.2)$$

$$Q_b = 0,06\text{m}^3/\text{s}$$

A altura e vazão calculadas através das equações (2.1) e (2.2) referem-se à rotação de 1800rpm, portanto devem ser corrigidas para a rotação que consta no

catálogo do fabricante, através das equações (2.4) e (2.5). Supondo que a rotação do fabricante seja 1750rpm, vem:

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot H_b \quad (2.4)$$

$$H_{ob} = 14m$$

$$Q_{ob} = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b \quad (2.5)$$

$$Q_{ob} = 0,058m^3/s$$

Com a altura e a vazão da bomba escolhe-se no catálogo do fabricante, a bomba que oferece o melhor rendimento.

Supondo a mesma altura, a mesma vazão e a mesma rotação utilizadas no Método de Viana, ou seja, $H_t = 20m$, $Q_t = 0,100m^3/s$, pelo método de Chapallaz, deve-se fazer a seleção do tipo de bomba a ser utilizada. Através da figura 2.5, conclui-se que a bomba será do tipo mista.

Determinado o tipo de bomba e adotando-se a rotação da bomba igual à 1800rpm, calcula-se a rotação específica da BFT, através da equação (2.8).

$$n_{qt} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{3/4}} \quad (2.8)$$

$$n_{qt} = 60$$

Logo, a rotação específica da bomba será, através da equação (2.9):

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (2.9)$$

$$n_{qb} = 67$$

A estimativa da vazão da bomba será:

$$Q_b = \frac{Q_t}{1,3} \quad (2.10)$$

$$Q_b = 0,08\text{m}^3/\text{s}$$

Com base na rotação específica e na estimativa da vazão da bomba, determina-se seu rendimento através da figura 2.6. Logo:

$$\eta_b = 0,82$$

Conhecida a rotação específica da bomba e seu rendimento determinam-se os coeficientes de altura e de vazão através das figuras 2.7 e 2.8. Assim:

$$c_H = 1,35$$

$$c_Q = 1,30$$

Logo, a altura e vazão da bomba para a rotação de 1800rpm, são, através das equações (2.6) e (2.7):

$$H_b = \frac{H_t}{c_H} \quad (2.6)$$

$$H_b = 14,8\text{m}$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{c_Q} \quad (2.7)$$

$$Q_b = 0,077\text{m}^3/\text{s}$$

Para a rotação do fabricante, ou seja, 1750rpm, tem-se, através das equações (2.4) e (2.5):

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot H_b \quad (2.4)$$

$$H_{ob} = 14\text{m}$$

$$Q_{ob} = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b \quad (2.5)$$

$$Q_{ob} = 0,078\text{m}^3/\text{s}$$

A tabela 2.1 a seguir compara os resultados obtidos através dos dois métodos.

Tabela 2.1 – Comparação entre os Métodos de Viana e de Chapallaz

Método	n_{qA}	n_{qt}	n_{qb}	H_{ob} [m]	Q_{ob} [m ³ /s]
Viana	181	-	-	14	0,058
Chapallaz	-	60	67	14	0,078

Da tabela 2.1 verifica-se que os resultados para a altura são idênticos para ambos os métodos, tendo apenas uma diferença para o valor da vazão.

2.3 – Modificações a serem realizadas na BFT

Como o sentido de rotação é invertido e a altura é elevada na BFT, surge a necessidade de realizar algumas verificações antes de colocar a máquina em funcionamento.

O primeiro item a ser verificado é pressão que a voluta da bomba vai ser submetida devido ao aumento da altura. Segundo (VIANA, 2002), A máxima pressão da BFT deve obedecer a inequação (2.11).

$$P_{\max t} \leq 1,5 \cdot P_{\max b} \quad (2.11)$$

Onde:

$P_{\max t}$ – pressão máxima admissível na BFT [m];

$P_{\max b}$ – pressão máxima da bomba [m].

Deve ser verificada também, a rotação de disparo da BFT, pois a bomba é projetada para operar numa determinada rotação, que, se for superada, poderá causar danos no equipamento girante. A equação (2.12), que foi obtida experimentalmente, (VIANA, 1987), permite o cálculo da rotação de disparo.

$$n_{dt} \leq 1,53 \cdot n_{nb} \quad (2.12)$$

Onde:

n_{dt} – rotação de disparo da BFT [rpm];

n_{nb} – rotação nominal da bomba [rpm].

Outra verificação que deve ser feita é a tensão aplicada no eixo da bomba, pois sabe-se que, a potência de eixo quando a máquina estiver operando como turbina, é superior àquela quando a máquina estiver operando como bomba (Figura 2.3). A equação (2.9) pode ser utilizada para calcular a tensão que o material do eixo vai ser submetido devido ao aumento da potência.

$$\tau_t = 0,81 \cdot \left(\frac{P_{et}}{n_t \cdot d^3} \right) \quad (2.13)$$

Onde:

τ_t - tensão no eixo da bomba [N/m²];

P_{et} – potência de eixo da BFT [W];

n_t – rotação da BFT [rps];

d – diâmetro do eixo [m].

A tensão no eixo deve ser menor do que aquela admissível para o material em questão. A tensão admissível do material pode ser encontrada em tabelas específicas. Deve ser verificada também, a necessidade de pinagem ou chavetamento, na rosca que fixa o rotor ao eixo, devido à inversão de rotação. Esta verificação é muito importante, pois o rotor pode se soltar e causar danos irreparáveis à bomba.

2.4 – Cálculo da altura geométrica de sucção

O tubo de sucção é um elemento mecânico montado na saída de máquinas de reação. Sua finalidade é permitir um ganho na altura total da turbina, e, conseqüentemente, um aumento na potência da máquina. A figura 2.9 mostra o tubo de sucção montado na saída da BFT.

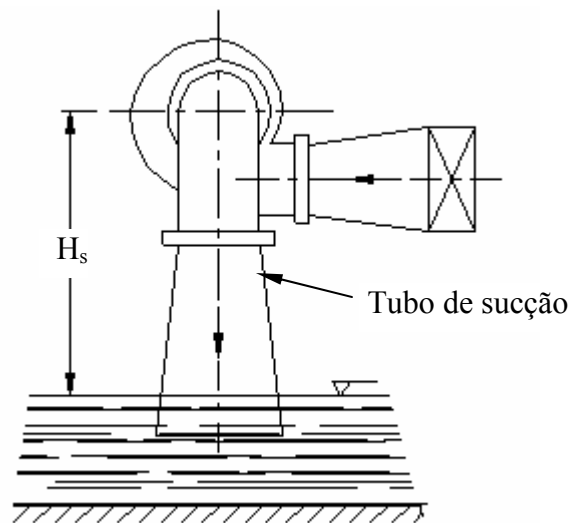


Figura 2.9 – Tubo de sucção montado na saída da BFT, (VIANA, 2002)

Tal como a turbina Francis é interessante prever um tubo de sucção na saída da BFT, com a finalidade de se aproveitar a energia disponível entre o rotor e o nível d'água a jusante. No entanto, é necessário tomar o devido cuidado quanto ao efeito da cavitação, que é extremamente prejudicial às máquinas de fluxo, cuja conseqüência, é a avaria dos elementos mecânicos em contato com a água, o que repercute numa gradual queda do rendimento da máquina ao longo do tempo.

Portanto, a determinação correta da altura geométrica de sucção é interessante no sentido de se prevenir tal efeito indesejável. Para isso, utiliza-se a equação (2.14) apresentada no trabalho de (VIANA, 1987):

$$H_s = 10 - 0,00122 \cdot A - 0,025 \cdot \left(1 + 10^{-4} \cdot n_{qAt}^2\right) \cdot H_t \quad (2.14)$$

Onde:

H_s – altura geométrica de sucção [m];

A – altitude local [m];

n_{qAt} – rotação específica da BFT no Sistema Internacional [1];

H_t – altura da BFT.

A equação (2.14) também é conhecida como equação para turbinas Francis (SOUZA, 1983), que pode ser usada neste caso devido à semelhança existente entre o rotor da BFT e a turbina Francis lenta, (NOGUEIRA, 1990).

A altura geométrica de sucção também pode ser calculada segundo a equação (2.15), proposta no trabalho de (CHAPALLAZ et al, 1992).

$$H_s = \sigma_t \cdot H_t \quad (2.15)$$

Onde:

H_s – altura geométrica de sucção [m];

σ_t – coeficiente de cavitação de Thoma [1];

H_t – altura da BFT [m].

O coeficiente de cavitação de Thoma pode ser determinado através da figura 2.10.

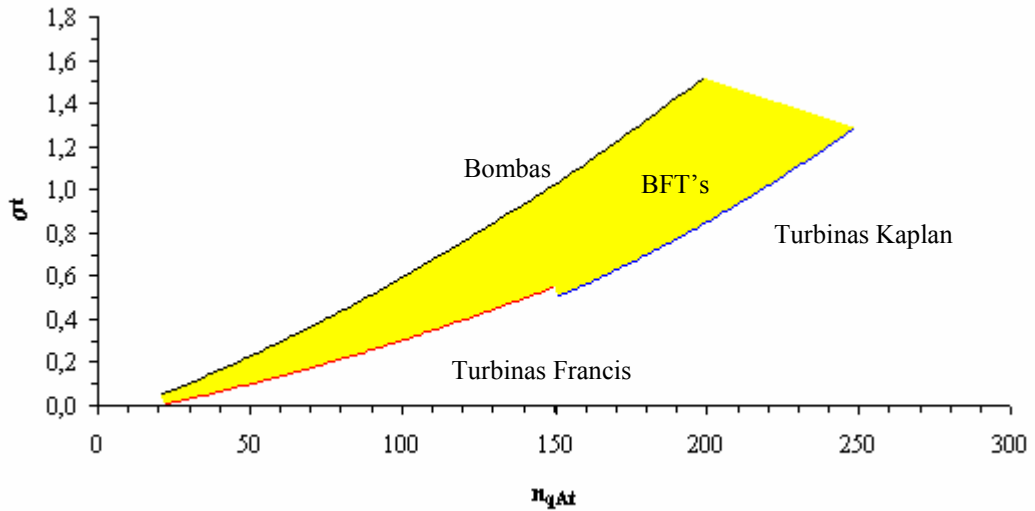


Figura 2.10 – Coeficiente de cavitação de Thoma, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)

A figura 2.10 permite a determinação do coeficiente de cavitação de Thoma para bombas (curva preta), BFT's (região amarela), turbinas Francis (curva vermelha) e Kaplan (curva azul). Da figura 2.10, observa-se que existe uma incerteza na determinação do coeficiente para as BFT's. Visto que existe uma semelhança entre o rotor de uma bomba e um rotor Francis lento (NOGUEIRA, 1990), recomenda-se utilizar a curva para as turbinas Francis no cálculo do coeficiente de Thoma para BFT's.

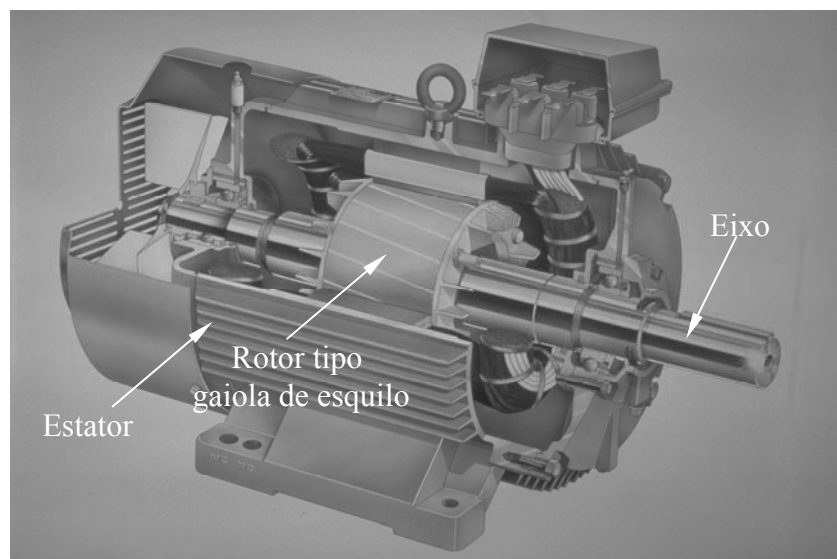
CAPÍTULO 3

GERADORES DE INDUÇÃO

3.1 – Introdução

A principal motivação para o estudo do motor de indução na geração de energia elétrica é seu baixo custo, sua simplicidade e sua robustez, se comparado ao gerador síncrono, (CHAPALLAZ et al, 1990). A sua utilização na geração de energia elétrica já é bem conhecida no meio científico desde a década de 30, onde surgiram os primeiros trabalhos descrevendo seu funcionamento, (BASSET e POTTER, 1935), (WAGNER, 1939).

Basicamente existem dois tipos de motores de indução que podem ser usados como gerador. Um possui um rotor tipo gaiola de esquilo de construção mais simples e mais robusta. O outro tipo possui um rotor bobinado, escovas e anéis coletores. O primeiro possui custo inferior e é menos sujeito a manutenção, sendo mais indicado para a geração de energia elétrica (CHAPALLAZ et al, 1990). A figura 3.1 ilustra um motor de indução em gaiola de esquilo em corte e suas principais partes.



Fonte: www.ieee-kc.org

Figura 3.1 – Motor de indução com rotor tipo gaiola de esquilo

3.2 – Princípio de funcionamento do motor e do gerador de indução

O funcionamento do motor de indução baseia-se no princípio da indução eletromagnética, daí a origem do seu nome. Para que o motor de indução trifásico opere é necessário alimentar seu estator com correntes trifásicas defasadas de 120° elétricos entre si. O resultado disso é o aparecimento de um campo magnético girante conforme mostra a figura 3.2.

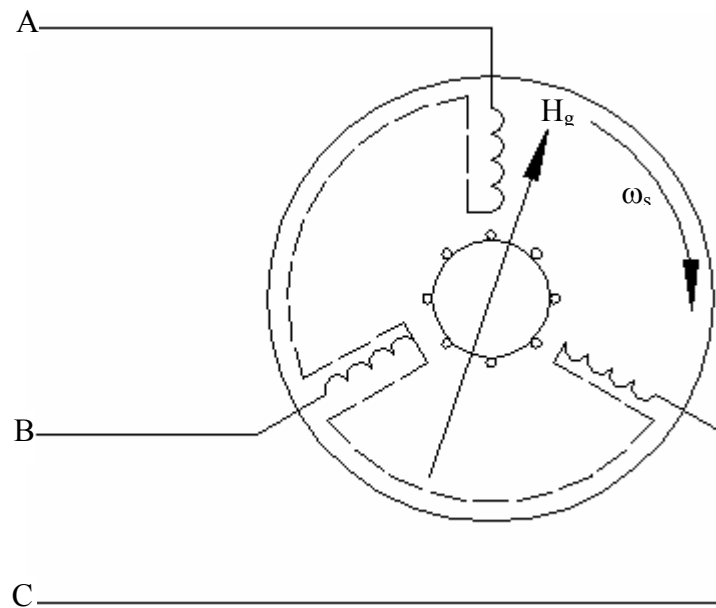


Figura 3.2 – Campo magnético girante, adaptado de (COGO et al, 1984)

O campo magnético girante (H_g), por sua vez, corta as barras curto-circuitadas do rotor, fazendo aparecer uma corrente induzida. Esta corrente faz aparecer um campo magnético no circuito do estator que reage com aquele campo magnético girante, originando dessa forma, um torque induzido que faz o eixo girar.

É importante observar que sempre deve haver uma velocidade relativa entre o campo magnético girante e o campo originado pela corrente induzida no rotor, para que a máquina produza torque. Esta velocidade relativa é denominada escorregamento e pode ser descrita pela equação (3.1) a seguir:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.1)$$

Onde:

s – escorregamento [1];

n_s – velocidade do campo magnético girante ou velocidade síncrona [rpm];

n_r – velocidade do rotor [rpm].

Observando a equação (3.1), verifica-se que o escorregamento do motor de indução é um número positivo.

Para que o motor de indução opere como gerador num sistema interligado é necessário aumentar a velocidade do eixo até que esta supere a velocidade síncrona do motor, que depende do seu número de pólos. A tabela 3.1 mostra a relação entre o número de pólos e a velocidade síncrona da máquina de indução.

Tabela 3.1 – Relação entre o número de pólos do motor de indução e sua velocidade síncrona

Número de pólos	Velocidade síncrona [rpm]
2	3600
4	1800
6	1200
8	900

Da equação (3.1) observa-se que se a velocidade do rotor for superior à velocidade síncrona, o escorregamento será negativo. Esta característica define o funcionamento da máquina de indução como gerador.

A partir deste ponto a máquina de indução não consome mais potência ativa do sistema a qual está ligada, mas a fornece. Portanto, o torque deixa de ser negativo e passa a ser positivo. A figura 3.3 mostra a relação entre o torque e o escorregamento da máquina de indução operando tanto como motor como gerador.

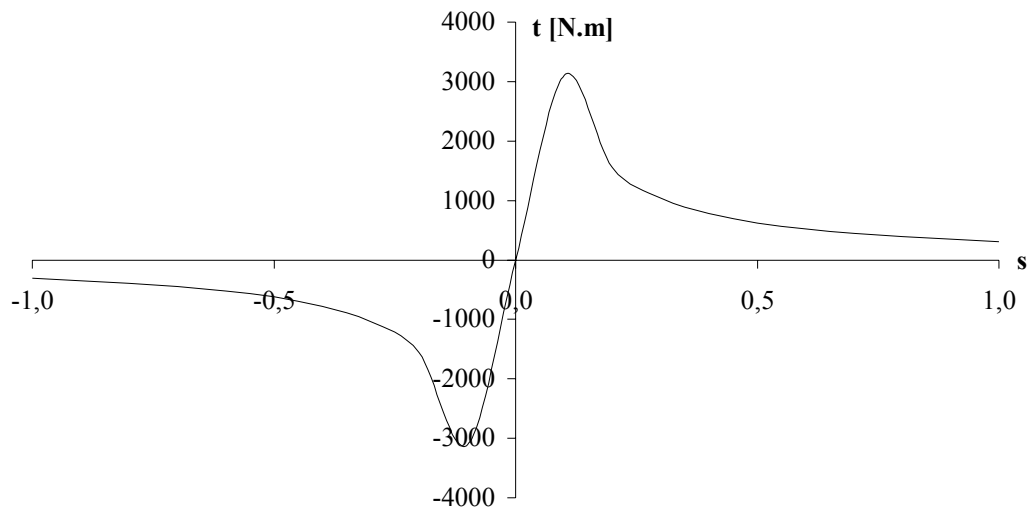


Figura 3.3 – Características operacionais do motor e do gerador de indução, adaptado de (CHAPMAN, 1991)

O problema do gerador de indução é que ele não é capaz de fornecer energia reativa para uma carga indutiva, tal como um motor ou um transformador, nem para si próprio. Quando o gerador está operando num sistema interligado, a energia reativa é proveniente do próprio sistema, mas a máquina está operando num sistema isolado, é necessário um banco de capacitores tanto para si como para uma carga que assim o exija.

Neste trabalho foram realizados experimentos num gerador de indução operando isoladamente. Neste caso tem-se um gerador de indução auto-excitado. Portanto será dada mais atenção ao processo de auto-excitação da máquina num sistema isolado.

3.3 – Auto-excitação do gerador

Do exposto na seção anterior, observou-se que, para o gerador de indução, a energia reativa é fundamental no processo de auto-excitação e geração de energia elétrica. No caso onde a máquina opera isoladamente, faz-se necessário a utilização de um banco de capacitores ligado em paralelo conforme mostra a figura 3.4.

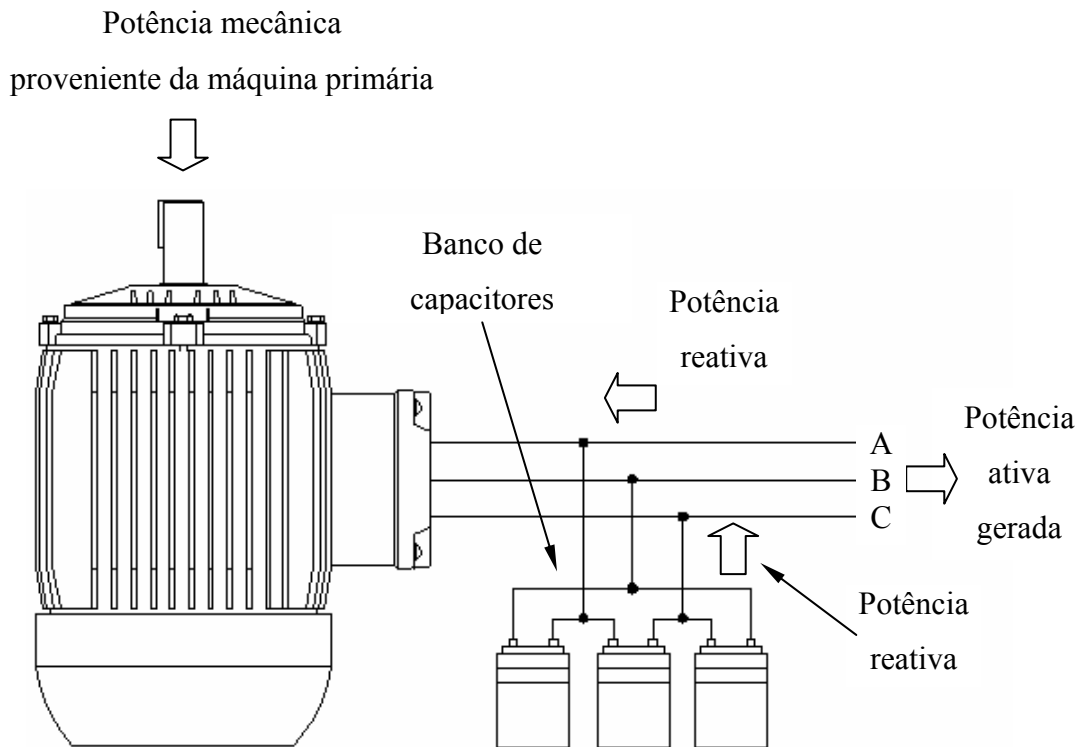


Figura 3.4 – Gerador assíncrono auto-excitado

Para que o gerador inicie o processo de auto-excitação, é necessário que exista um magnetismo residual ou remanescente presente no núcleo de ferro da máquina. Existindo tal magnetismo, o processo ocorre da seguinte maneira: quando o rotor da máquina gira, as linhas do fluxo magnético são cortadas pelas bobinas e uma pequena tensão é gerada na máquina. A esta se denomina tensão remanescente que, aplicada aos terminais do banco de capacitores, faz circular pelas bobinas uma corrente adiantada em relação à tensão. Esta, por sua vez, circulando pelos enrolamentos do gerador, aumenta a intensidade do campo magnético e induz uma tensão maior no gerador. Esta tensão novamente é aplicada nos terminais do banco de capacitores, que, conseqüentemente, faz circular uma corrente de maior intensidade nos enrolamentos da máquina. O processo segue até que a curva característica do capacitor intercepte a curva de magnetização da máquina de indução, como é mostrado na figura 3.5.

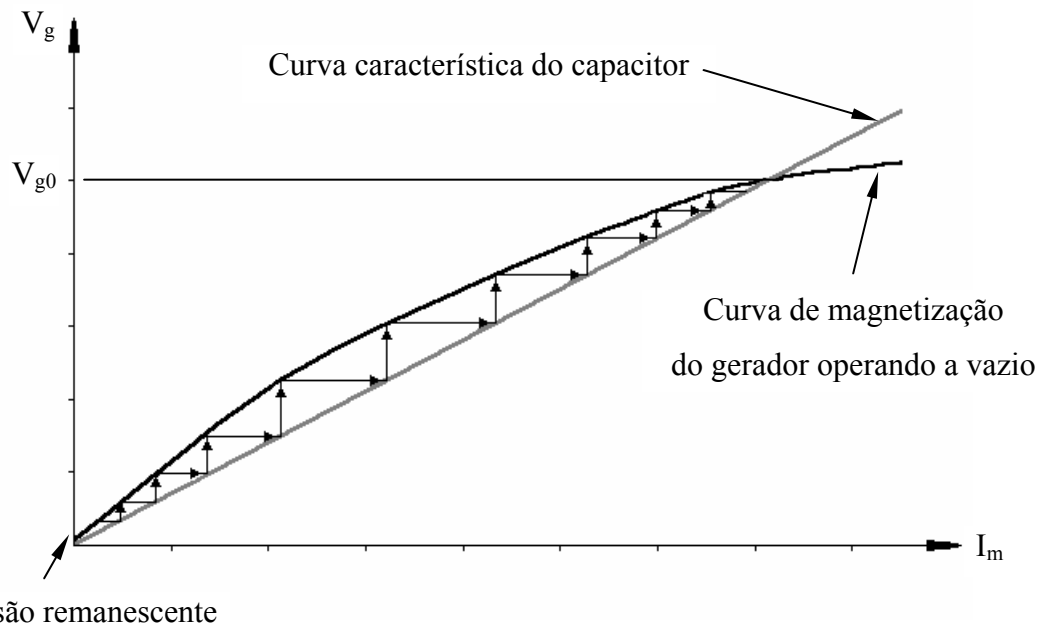


Figura. 3.5 – Processo de auto-excitação do gerador assíncrono, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1990)

A tensão V_{g0} da figura 3.5 é aquela obtida quando a máquina está operando a vazio. Mas quando uma carga é conectada aos terminais do gerador, essa tensão sofre uma queda, pois o aumento da carga causa um aumento na corrente, que, conseqüentemente, aumenta a queda de tensão interna da máquina. Dessa maneira, o gerador precisa de mais energia reativa proveniente dos capacitores para manter a tensão no valor desejado. Se a carga for retirada, a tensão aumenta, devido ao excesso de energia reativa na máquina. Portanto os capacitores excedentes devem ser retirados do sistema. A seção 3.7 descreve os principais métodos para o controle da tensão gerada pela máquina de indução.

Outra conseqüência do aumento da carga é a queda na freqüência gerada pela máquina. Para uma máquina de 4 pólos, a freqüência gerada com máquina operando a vazio é 60Hz, desde de que a velocidade seja um pouco superior a 1800rpm. Mas quando o gerador está funcionando a plena carga, esta freqüência assume um valor menor. Daí a necessidade de operar a máquina numa velocidade muito superior à velocidade síncrona, a fim de se obter a freqüência nominal do sistema, ou seja, 60Hz, num sistema isolado.

Esta afirmação pode ser provada matematicamente considerando inicialmente o escorregamento do gerador de indução, que é dado pela equação (3.2) a seguir, mostrada no trabalho de (BURIAN, 1982).

$$s = 1 - \frac{\omega_{eg}}{\frac{2}{P} \cdot \omega_{cg}} \quad (3.2)$$

Onde:

s – escorregamento do gerador de indução [1];

ω_g – velocidade angular do eixo do gerador [rad/s];

ω_{cg} – velocidade angular do campo magnético girante do gerador [rad/s];

P – número de pólos do gerador.

A velocidade angular do gerador é dada pela equação (3.3), (BURIAN, 1982).

$$\omega_{cg} = 2 \cdot \pi \cdot f_g \quad (3.3)$$

Onde:

ω_{cg} – velocidade angular do campo magnético girante do gerador [rad/s];

f_g – frequência elétrica gerada pela máquina [Hz].

Considerando o escorregamento do gerador de indução alimentando uma carga resistiva, (BURIAN, 1982), vem:

$$s = -\frac{R_r}{R_c} \quad (3.4)$$

Onde:

s – escorregamento do gerador de indução [1];

R_r – resistência do circuito do rotor [Ω];

R_c – resistência da carga [Ω].

Substituindo as equações (3.3) e (3.4) na equação (3.5) e realizando algumas manipulações algébricas, obtém-se, para o gerador de indução com carga:

$$f_g = \frac{\omega_g}{\frac{4 \cdot \pi}{P} \cdot \left(1 + \frac{R_r}{R_c}\right)} \quad (3.5)$$

Onde:

f_g – frequência elétrica gerada pela máquina [Hz];

ω_g – velocidade angular do eixo do gerador [rad/s];

P – número de pólos do gerador;

R_r – resistência do circuito do rotor [Ω];

R_c – resistência da carga [Ω].

Diminuindo-se o valor de R_c na equação (3.5) (aumento de carga), verifica-se que a segunda parcela do denominador tende a aumentar. A consequência disso é uma queda no valor da frequência.

3.4 – Influência da velocidade no processo de auto-excitação

A influência da velocidade justifica-se pelo fato de alterar a frequência, e, conseqüentemente, a curva de magnetização da máquina. De acordo com os trabalhos de (JABRI e ALOLAH, 1990) e (CHAKRABORTY et al, 1998), existe uma velocidade mínima, abaixo da qual, a máquina não inicia a auto-excitação.

Também mostram que, quanto menor for a velocidade de rotação, maior será a capacitância necessária para excitar o gerador. Portanto, trabalhar com baixas rotações não é conveniente, já que, aumenta-se a necessidade de magnetização, e, conseqüentemente, a potência reativa na máquina, aumentando-se dessa forma, as perdas por efeito Joule, devido ao aumento da corrente de excitação do gerador.

Por outro lado, isto também reflete na capacidade de fornecimento de potência ativa para uma carga qualquer, visto que, quanto maior a potência reativa, menor será a potência ativa, pois a capacidade nominal do motor, depende da potência aparente. Esta é dada pela equação (3.6) a seguir.

$$S = \sqrt{W^2 + Q^2} \quad (3.6)$$

Onde:

S – potência aparente [VA];

W – potência ativa [W];

Q – potência reativa [VAr].

A potência ativa é aquela que efetivamente produz trabalho útil, como, por exemplo, acender uma lâmpada. A potência reativa não produz trabalho útil, mas é necessária para alimentar o campo magnético em motores, geradores e transformadores.

A corrente nominal do motor é função da potência aparente mostrada na equação (3.6). Daí a importância de se respeitar seu valor, a fim de não sobrecarregar a máquina, e, conseqüentemente queimar os enrolamentos do estator, que foram projetados para suportar a corrente nominal.

3.5 – Seleção do gerador e do banco de capacitores para auto-excitação

Antes de se fazer a seleção do banco de capacitores para a auto-excitação da máquina, é necessário realizar uma pré-seleção do motor que será utilizado como gerador. Um método simples foi proposto por (CHAPALLAZ et al, 1990) e se baseia na potência de eixo que a turbina, neste caso uma BFT, irá fornecer ao gerador. Conhecendo-se este parâmetro é possível fazer uma pré-seleção do motor que irá operar como gerador, com base na figura 3.6, que foi obtida experimentalmente, com diversos motores, no trabalho realizado por (CHAPALLAZ et al, 1990).

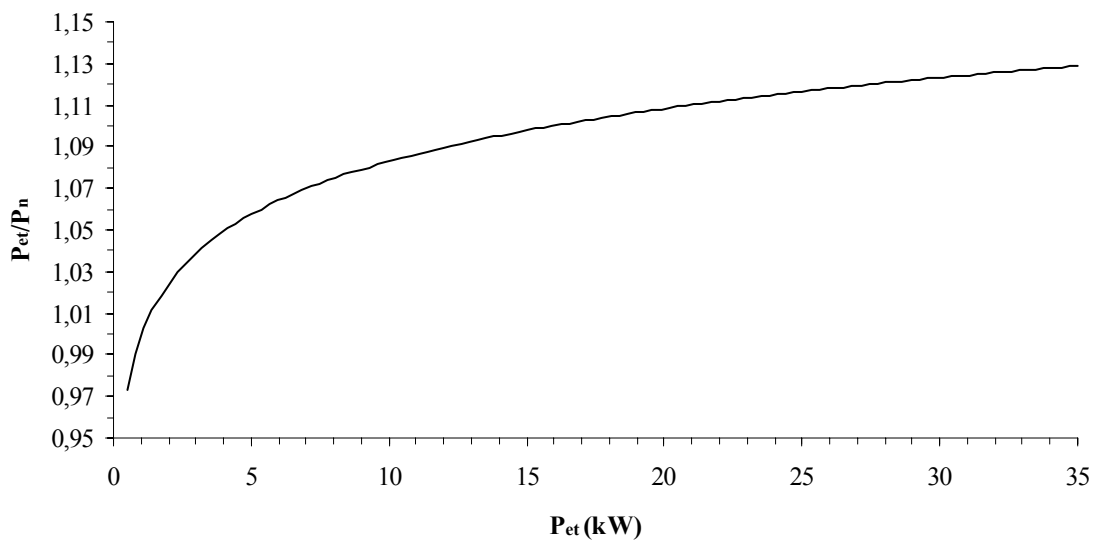


Figura 3.6 – Pré-seleção do motor para ser utilizado como gerador, adaptado (CHAPALLAZ et al, 1990)

Conhecida a relação P_{et}/P_n da figura 3.6, calcula-se a potência nominal do motor assíncrono de acordo com a equação (3.7).

$$P_n = \frac{P_{et}}{\frac{P_{et}}{P_n}} \quad (3.7)$$

Onde:

P_n – potência nominal do motor que será utilizado como gerador [kW];

P_{et} – potência de eixo fornecida pela turbina (BFT) [kW];

P_{et}/P_n – relação experimental obtida da figura 3.4 [1].

Se a potência P_n não coincidir com aquelas encontradas nos catálogos de motores, deve-se escolher aquele cuja potência nominal é imediatamente superior à calculada pela equação (3.7).

Conhecido o motor que será utilizado como gerador, o próximo passo é calcular a capacitância necessária à sua auto-excitação. Esta capacitância pode ser determinada com base nos parâmetros do circuito equivalente do motor, (JABRI e ALOLAH, 1990), (CHAN, 1995). A figura 3.7 mostra o circuito equivalente de um motor de indução.

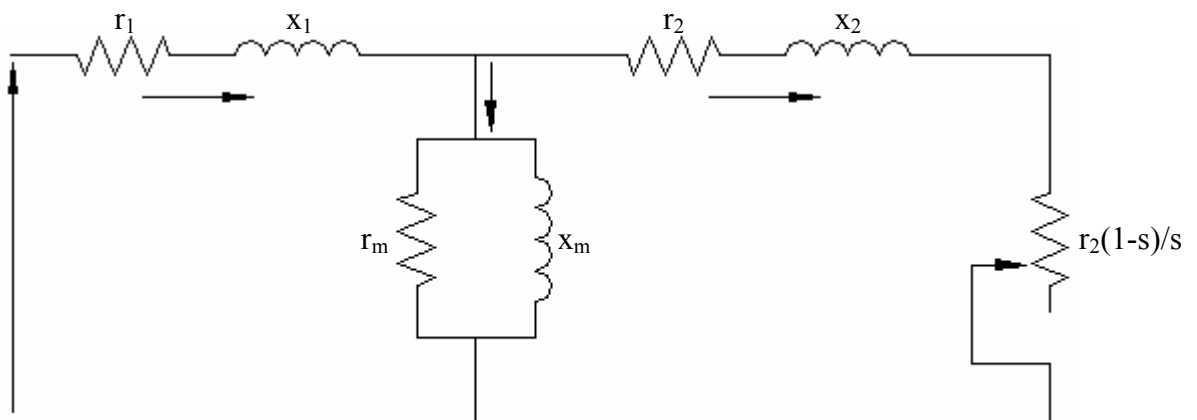


Figura 3.7 – Circuito equivalente do motor de indução

Onde:

r_1 – resistência do circuito do estator [Ω /fase];

r_2 – resistência do circuito do rotor [Ω /fase];

r_m – resistência do circuito magnético [Ω /fase];

x_1 – reatância do circuito do estator [Ω /fase];

x_2 – reatância do circuito do rotor [Ω /fase];

x_m – reatância do circuito magnético [Ω /fase];

A finalidade deste circuito é representar o funcionamento da máquina de indução em quaisquer condições de funcionamento, tanto como motor como gerador. O inconveniente de se utilizar tal método é a necessidade de se realizar ensaios no motor de indução, a fim de determinar tais parâmetros, já que estes não são informados pelos fabricantes.

No entanto, um método interessante foi proposto por (CHAPALLAZ et al, 1990) onde a capacitância para a auto-excitação do gerador pode ser estimada com base nas informações contidas na placa do motor. É importante salientar que o método foi proposto para máquinas de quatro pólos e 50 Hz, mas mostrou-se satisfatório para a máquina utilizada neste trabalho, cuja frequência era de 60 Hz.

Conhecida a potência nominal do motor que será utilizado como gerador, determina-se a relação $\text{sen}(\phi_g)/\text{sen}(\phi_m)$ da figura 3.8, que foi obtida experimentalmente para máquinas de 50Hz.

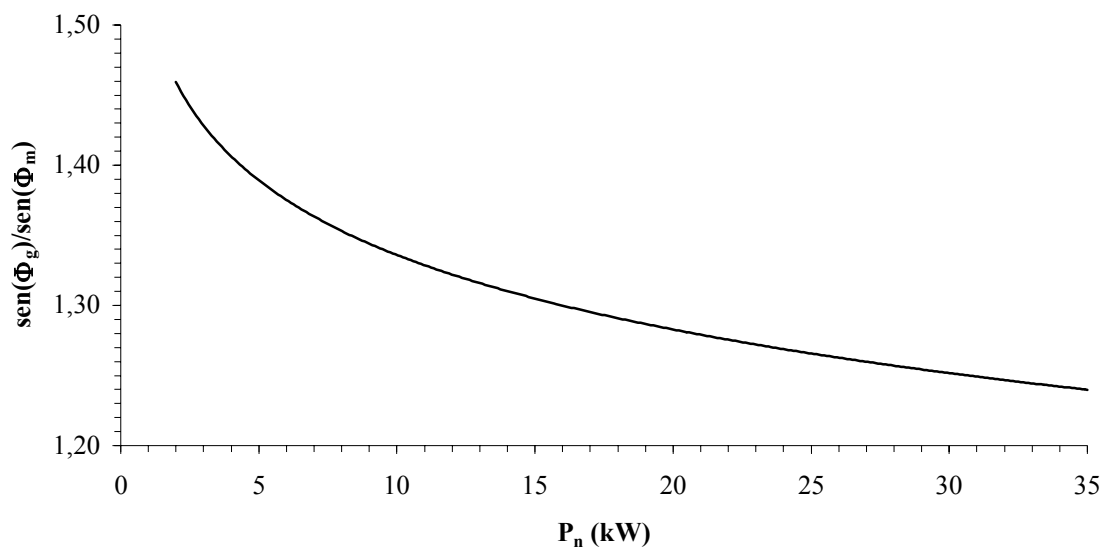


Figura 3.8 - Relação experimental entre $\text{sen}(\phi_g)$ do gerador e $\text{sen}(\phi_m)$ do motor em função da potência nominal, adaptado de CHAPALLAZ et al (1990)

Conhecida esta relação, calcula-se a potência elétrica do motor de indução, utilizando a equação (3.8) a seguir:

$$P_{\text{elm}} = \frac{P_n}{\eta_m} \quad (3.8)$$

Onde:

P_{elm} – potência elétrica absorvida pelo motor de indução [kW];

P_n – potência nominal do motor [kW];

η_m - rendimento do motor a plena carga [1].

Então, calcula-se a energia reativa absorvida pelo motor de indução através da equação (3.9).

$$Q_m = P_{\text{elm}} \cdot \tan(\phi_m) \quad (3.9)$$

Onde:

Q_m – potência reativa absorvida pela máquina operando como motor [kVAr];

ϕ_m – ângulo de fase do motor, que pode ser determinado com base no fator de potência [°];

P_{elm} – potência elétrica absorvida pela máquina operando como motor [kW].

A energia reativa necessária para excitar a máquina quando estiver operando como gerador pode ser calculada pela equação (3.10).

$$Q_g = \frac{\sin(\phi_g)}{\sin(\phi_m)} \cdot Q_m \quad (3.10)$$

Onde:

Q_g – energia reativa necessária à auto-excitação da máquina operando como gerador [kVAr];

$\frac{\sin(\phi_g)}{\sin(\phi_m)}$ – relação experimental da figura 3.8 [1];

Q_m – energia reativa absorvida pela máquina operando como motor [kVAr].

Assim, para um banco de capacitores ligado em triângulo, a capacitância necessária à auto-excitação do gerador operando a plena carga, poderá ser determinada através da equação (3.11).

$$C = \frac{Q_g}{3 \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \cdot 10^9 \quad (3.11)$$

Onde:

C – capacitância necessária à auto-excitação do gerador [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

Q_g – energia reativa necessária à auto-excitação do gerador [kVAr];

V – tensão de linha [V];

f – frequência [Hz].

A frequência da equação (3.11) deve ser igual à 50Hz, pois, como já foi dito antes, a curva da figura 3.8 foi obtida experimentalmente, para máquinas de quatro pólos e 50Hz. Portanto, inicialmente deve-se calcular a capacitância considerando-se aquela frequência. Determinada a capacitância nesta frequência, ajusta-se seu valor para $f = 60\text{Hz}$, através da equação (3.12).

$$C_{60} = C_{50} \cdot \left(\frac{50}{60}\right)^2 \quad (3.12)$$

Onde:

C_{60} – capacitância a 60Hz [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

C_{50} – capacitância a 50Hz [$\mu\text{F}/\text{fase}$].

Obtida a capacitância por meio da equação (3.12), seleciona-se os capacitores com base nos catálogos de fabricantes.

Deve-se salientar que, estes capacitores serão utilizados apenas para a auto-excitação do gerador, portanto, se for considerada uma carga indutiva, deve-se prever mais um banco de capacitores adequado àquela carga.

3.6 – Determinação da potência elétrica e do rendimento do gerador de indução

A potência elétrica gerada pela máquina de indução pode ser calculada pela equação (3.13) a seguir:

$$P_{elg} = \frac{\cos(\phi_g)}{\eta_g \cdot \cos(\phi_m)} \cdot P_n \quad (3.13)$$

Onde:

P_{elg} – potência elétrica gerada pela máquina de indução [kW];

$\cos(\phi_g)$ – fator de potência do gerador de indução [1];

η_m – rendimento do motor de indução [1];

$\cos(\phi_m)$ – fator de potência do motor de indução [1];

P_n – potência nominal do motor de indução [kW].

O fator de potência do motor de indução pode ser calculado em função da relação $\sin(\phi_g)/\sin(\phi_m)$ determinada através da figura 3.8.

De posse da potência elétrica do gerador, da potência nominal e do rendimento do motor de indução, calcula-se a potência de eixo necessária para acionar a máquina de indução, através da equação (3.14).

$$P_{eg} = P_{elg} + P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (3.14)$$

Onde:

P_{eg} – potência de eixo do gerador [kW];

P_{elg} – potência elétrica gerada pela máquina de indução [kW];

P_n – potência nominal do motor de indução [kW];

η_m – rendimento do motor de indução [1].

Conhecida as potências elétrica e de eixo, calcula-se o rendimento do gerador de indução, através da equação (3.15) a seguir:

$$\eta_g = \frac{P_{elg}}{P_{eg}} \quad (3.15)$$

Onde:

η_g – rendimento do gerador de indução [1];

P_{elg} – potência elétrica do gerador de indução [kW];

P_{eg} – potência de eixo do gerador de indução [kW].

3.7 – Controle da tensão no gerador de indução

Uma característica conhecida do gerador de indução é a sua má regulação de tensão quando da variação da carga. A figura 3.9 mostra a curva de regulação de tensão típica de um gerador de indução.

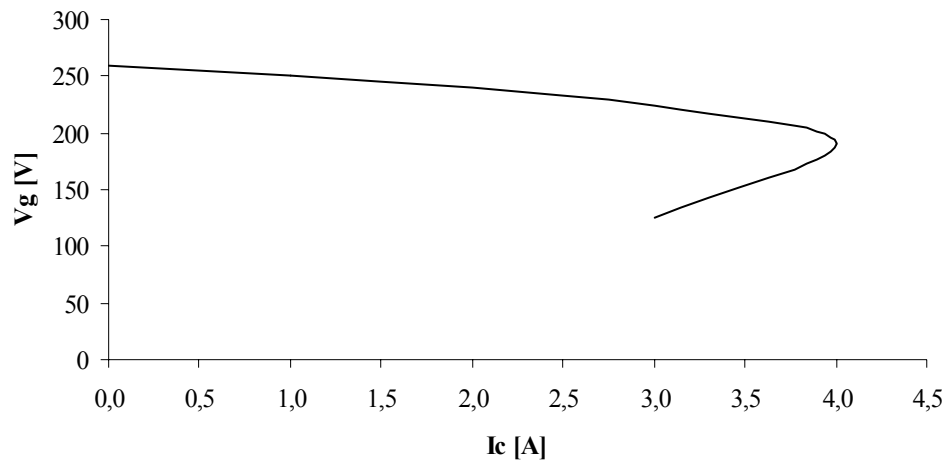


Figura. 3.9 – Regulação de tensão do gerador de indução, adaptado de (REZEK e RESENDE, 1994)

Onde:

V_g – tensão gerada pela máquina de indução [V];

I_c – corrente da carga [A].

A figura 3.9 mostra que a tensão do gerador decresce conforme a carga aumenta. Isto é razoável, pois um aumento na carga provoca um aumento na corrente, que, conseqüentemente aumenta a queda de tensão nas impedâncias dos circuitos do estator e do rotor (figura 3.7). Esta queda é dada pela equação (3.16) a seguir.

$$\Delta V = Z \cdot I \quad (3.16)$$

Onde:

ΔV – queda de tensão sobre a impedância [V];

Z – impedância [Ω];

I – corrente [A].

A regulação de tensão do gerador de indução pode ser melhorada utilizando-se técnicas adequadas, segundo a natureza da carga que a máquina está alimentando. Estas técnicas são descritas nas seções a seguir.

3.8 – Métodos de controle da tensão gerada

O controle da tensão nos terminais do gerador de indução quando da variação da carga é objeto de estudo de vários pesquisadores a muitos anos. Nos trabalhos de (BASSET e POTTER, 1935), (WAGNER, 1939) já se identificam esforços com a finalidade de se propor um método de controle da tensão gerada pela máquina de indução. Existem, basicamente, quatro métodos para o controle da tensão, que podem ser resumidos em:

- método do capacitor série;
- método dos capacitores chaveados;
- método do controlador de carga;
- método do reator saturado;
- método do indutor controlado por tiristores.

Todos estes métodos, exceto o do controlador de carga, levam em consideração a variação da carga sendo ela de natureza resistiva ou indutiva. A descrição de cada um deles será feita nas seções que se seguem.

3.8.1 – Método do capacitor série

Este método foi estudado nos primeiros trabalhos que surgiram sobre o gerador de indução como pode ser visto nos trabalhos de (BASSET e POTTER, 1935), (WAGNER, 1939), e consiste na inserção de um capacitor em série com a carga conforme mostra a figura 3.10.

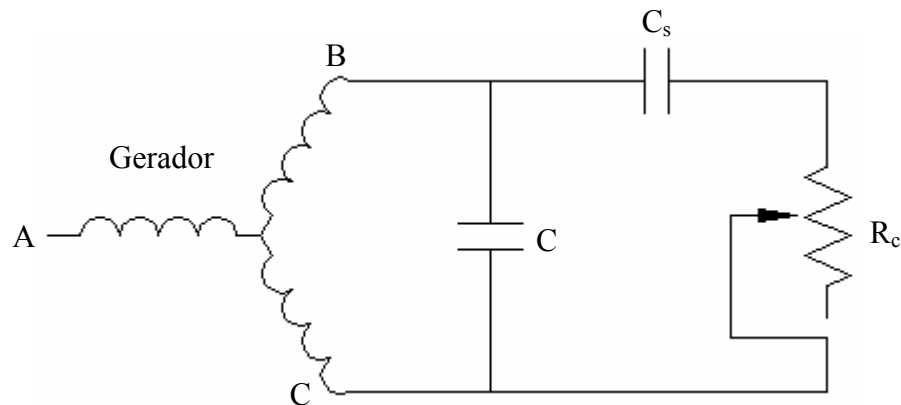


Figura 3.10 – Regulação de tensão do gerador de indução através de um capacitor em série, adaptado de (BASSET e POTTER, 1935)

Onde:

C – capacitor para auto-excitação do gerador de indução [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

C_s – capacitor série [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

R_c – resistência da carga [Ω/fase].

Da figura 3.8 verifica-se que, na operação a vazio, a capacitância vista dos terminais do gerador é aquela devido aos capacitores em paralelo. Mas quando da operação com carga, a capacitância equivalente vista dos terminais do gerador é dada por:

$$C_{\text{eq}} = C + C_s \quad (3.17)$$

Onde:

C_{eq} – capacitância equivalente “vista” pelos terminais do gerador [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

C – capacitância em paralelo com os terminais [$\mu\text{F}/\text{fase}$];

C_s – capacitância série [$\mu\text{F}/\text{fase}$].

Portanto, quanto maior for o valor da carga nos terminais do gerador de indução, maior será a capacitância “vista” dos terminais do gerador de indução. Conseqüentemente, um aumento na capacitância causa um aumento na tensão

terminal da máquina. Logo, as quedas de tensão internas devido às perdas nos circuitos do estator e do rotor, podem ser compensadas pelo aumento na tensão devido ao capacitor série.

O trabalho de (CALDAS, 1980) e de (BASSET e POTTER, 1935) mostram que esta técnica de regulação é razoável para cargas resistivas, porém insatisfatório para cargas indutivas, onde o fator de potência varia, como pode ser visualizado na figura 3.11.

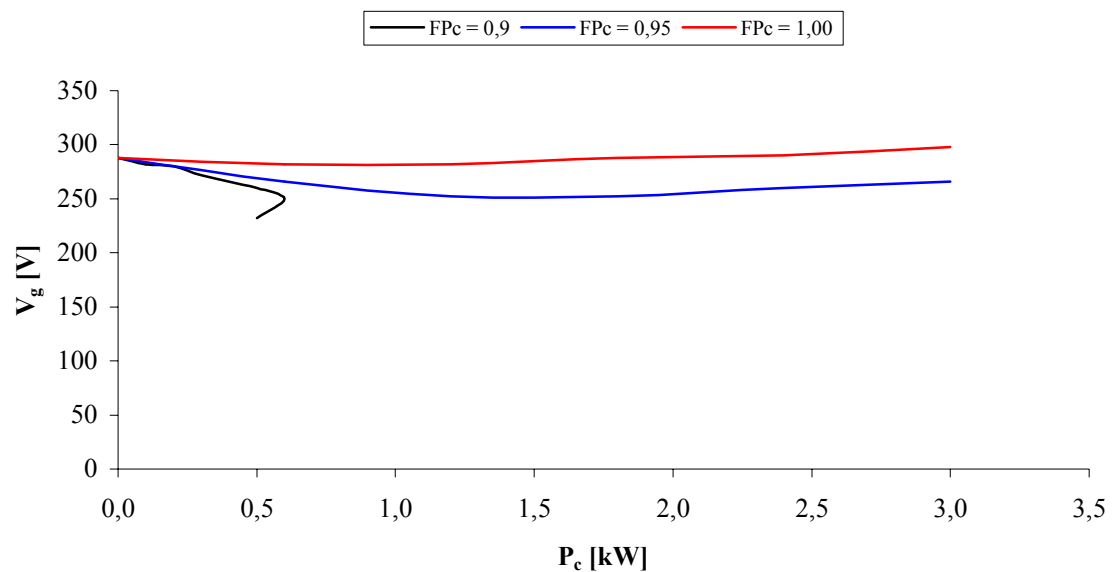


Figura 3.11 – Tensão terminal em função da potência ativa na carga, para diversos fatores de potência, (CALDAS, 1980)

3.8.2 – Método dos capacitores chaveados

Este método consiste no chaveamento de capacitores a medida que a necessidade de excitação do gerador e de energia reativa da carga aumentam. A figura 3.12 mostra um esquema proposto por (CHAPALLAZ et al, 1990) utilizando capacitores conectados em paralelo com o gerador.

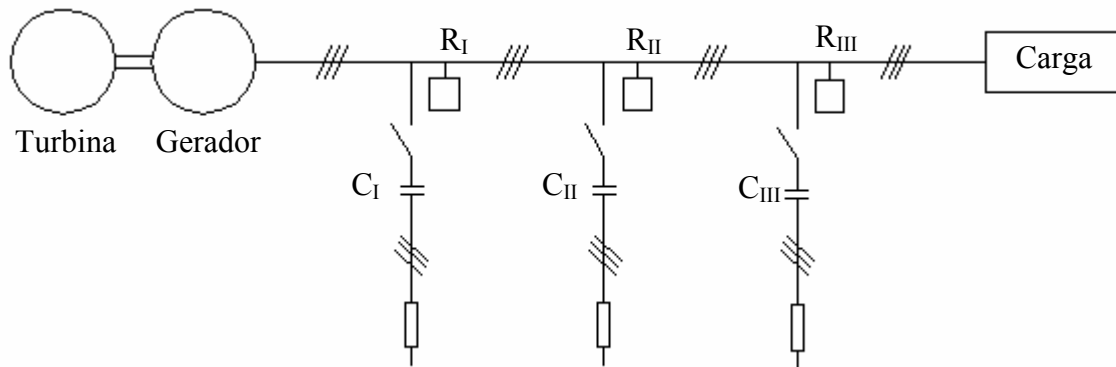


Figura 3.12 – Esquema para controle da tensão por meio de capacitores chaveados, (CHAPALLAZ et al, 1990)

À medida que a carga aumenta ou diminui, os bancos de capacitores C_I , C_{II} e C_{III} são inseridos ou retirados do circuito, através dos relés R_I , R_{II} e R_{III} que monitoram a tensão, a fim de atender às necessidades de magnetização tanto do gerador como da carga e manter a tensão dentro de limites considerados satisfatórios. A figura 3.13 ilustra a variação da tensão em função da carga acoplada aos terminais do gerador utilizando este método.

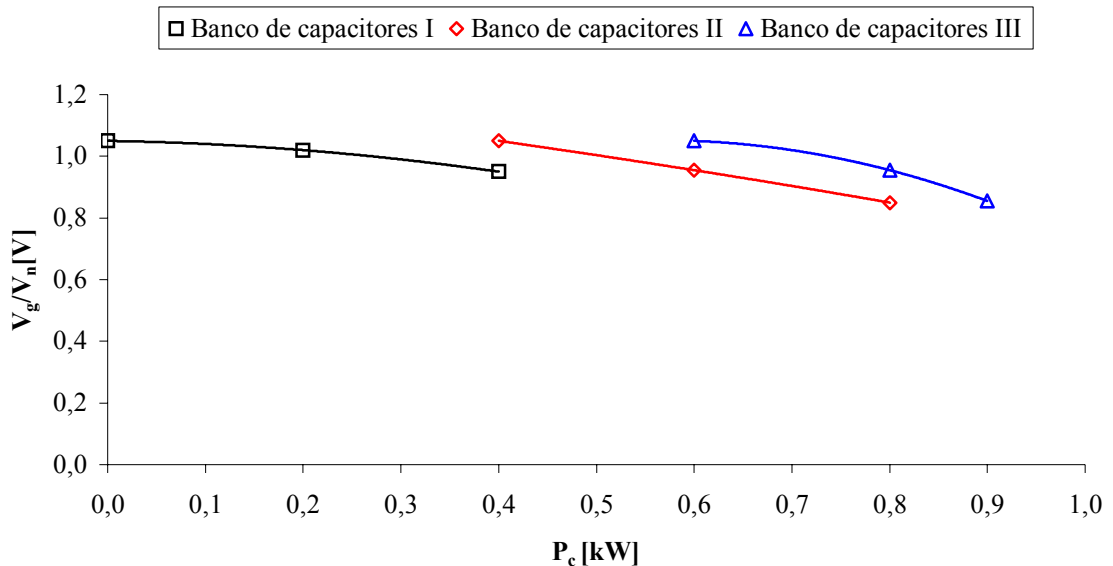


Figura 3.13 – Variação da tensão em função da carga, (CHAPALLAZ et al, 1990)

Observando a figura 3.13, verifica-se que a regulação não é satisfatória, o que constitui uma desvantagem desta técnica. Outra desvantagem é a necessidade de controle da velocidade da turbina através da válvula, sem o qual a regulação de tensão torna-se pior do que aquela mostrada na figura 3.13.

3.8.3 – Método do controlador eletrônico de carga

Neste método, o gerador opera com sua máxima capacidade, ou seja, fornece toda a potência ativa para o sistema. Desta forma a máquina sempre vai trabalhar sempre no seu ponto nominal de funcionamento, operando com máximo rendimento, já que este aumenta com a carga do gerador.

Com este método é possível manter a rotação da máquina constante, pois o gerador “enxerga” sempre a mesma carga, mesmo quando o consumidor ligue ou desligue algum equipamento elétrico. Isto só é possível, graças a dois elementos fundamentais:

- a carga de lastro ou lastro térmico;
- o controlador eletrônico de carga.

A carga de lastro é constituída por um grupo de resistências cuja função é consumir o excedente de energia gerado pelo gerador de indução. Se uma lâmpada for desligada, por exemplo, a rotação do gerador tende a aumentar, mas só não aumenta por que uma “resistência equivalente” à potência da lâmpada é inserida no circuito. A situação contrária também pode ocorrer, ou seja, uma lâmpada pode ser ligada. Neste caso, a rotação do gerador tende a diminuir, mas não ocorre porque uma “resistência equivalente” à potência da lâmpada é retirada do lastro térmico. Dessa maneira, a velocidade e a tensão do gerador são mantidas constantes. Todo o fluxo de carga é controlado pelo controlador eletrônico de carga. Um esquema simplificado do controlador e das cargas de lastro é mostrado na figura 3.14.

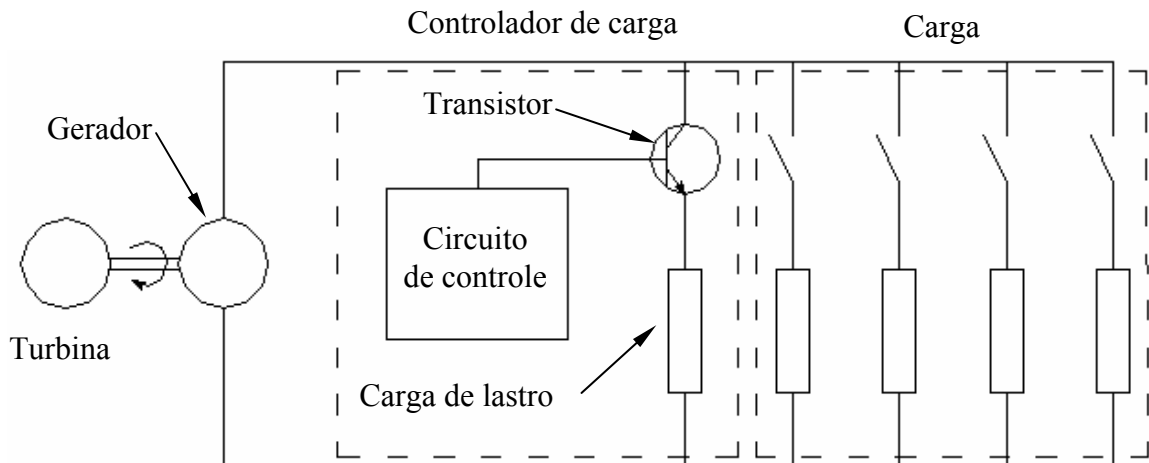


Fig. 3.14 – Diagrama simplificado do circuito de um controlador eletrônico de carga (CHAPALLAZ et al, 1992).

Este método é vantajoso, pois de um lado elimina a necessidade de regulação de velocidade atuando na válvula de controle na entrada da turbina, o que é bom caso a máquina primária seja uma BFT, pois esta não possui distribuidor, e, por outro lado, elimina a necessidade de regulação de tensão por meio do chaveamento de capacitores, que não é satisfatória. Também permite a operação da máquina sempre no seu ponto de máximo rendimento. Outra vantagem é que a energia consumida pela carga de lastro pode ser utilizada para aquecimento de água. Porém esta técnica não permite regularização de vazão, o que constitui uma desvantagem onde há necessidade de se diminuir a vazão através da BFT.

3.8.4 – Método do reator saturado

Este método consiste na ligação de reatores com características de magnetização saturadas. Assim os capacitores para excitação enxergam uma curva de magnetização mais plana, o que melhora a regulação de tensão, (CALDAS, 1980).

Este método apresenta boa regulação de tensão, mas também possui o inconveniente do alto custo dos reatores e da geração de correntes harmônicas. Estas podem ser minimizadas conectando-se os reatores em delta-estrela, (CALDAS, 1980). A figura 3.15 mostra o esquema de ligação.

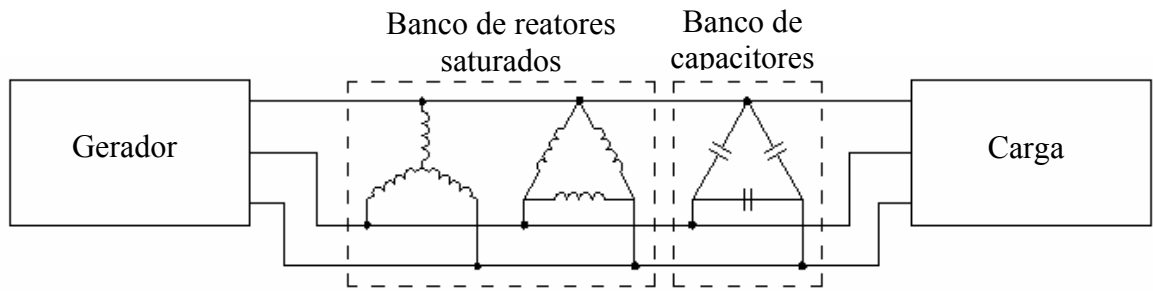


Fig. 3.15 – Reatores saturados ligados em delta-estrela, (CALDAS, 1980)

3.8.5 – Método do indutor controlado

Este método foi proposto por (BRENNEN e ABBONDANTI, 1977) e consiste na utilização de indutores controlados por meio de tiristores e de capacitores. A figura 3.16 mostra um esquema utilizando indutores e capacitores.

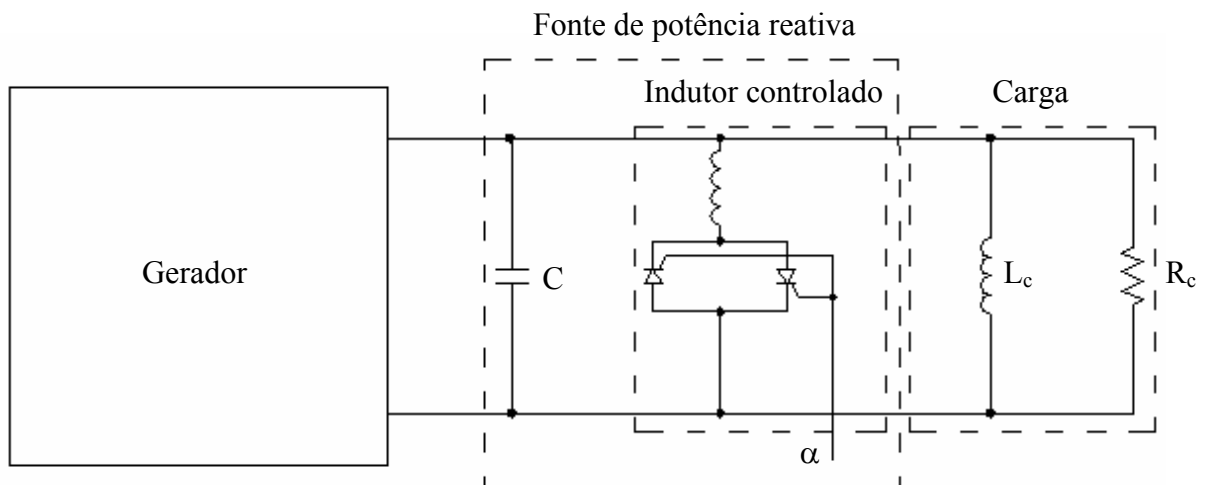


Fig. 3.16 – Método do indutor controlado (uma fase), (CALDAS, 1980)

Os capacitores mostrados na figura 3.16 têm a finalidade de alimentar o gerador de indução e as cargas indutivas, tais como motores, com energia reativa. Quando há variação na carga, como por exemplo, o desligamento de um motor, a tensão tende a crescer, pois há excesso de energia reativa circulando pelo circuito. É neste momento que os indutores são inseridos no sistema, cuja finalidade é consumir

a energia reativa excedente gerada pelo banco de capacitores. Este excedente é controlado por meio da ponte de tiristores que controla a quantidade necessária de potência reativa para manter a tensão no valor desejado.

O aparato mostrado na figura 3.16 também é conhecido como fonte estática de compensação de reativos. A utilização desta técnica é vantajosa no sentido de obter uma ótima regulação de tensão, já que o fluxo de energia reativa é controlado por meio de uma ponte de tiristores. A desvantagem é que o gerador trabalha fora do seu ponto de operação nominal prejudicando, dessa forma, o seu rendimento.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 – Introdução

Neste capítulo serão mostradas as análises experimentais feitas na bomba funcionando como bomba e no grupo gerador assíncrono utilizando uma BFT. O primeiro ensaio foi realizado na bomba, utilizando o circuito do laboratório de etiquetagem de bombas do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá (LEB-IRN-UNIFEI) com a finalidade de levantar as curvas características.

O segundo ensaio foi realizado no motor de indução, cujo objetivo foi fazer o levantamento das perdas, para posteriormente se determinar seu rendimento como gerador.

Finalmente, para o terceiro ensaio foi utilizado o Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas da Universidade Federal de Itajubá (LHPCH-UNIFEI), onde se montou o grupo gerador e levantou-se dos dados que permitiram a construção das curvas que caracterizam o funcionamento da BFT e do gerador de indução. Foram plotadas curvas que relacionam o rendimento do grupo gerador e a altura da BFT à vazão. Também construiu-se curvas que relacionam a tensão, a frequência e o fator de potência do gerador à potência gerada por ele, para as rotações de 1740, 1800, 1840 e 1860rpm.

4.2 – Ensaio no grupo moto-bomba

4.2.1- Características da bomba utilizada

A bomba que foi utilizada neste trabalho é do tipo centrífuga, de fabricação nacional e foi adquirida à aproximadamente 17 anos atrás, onde foi utilizada em outro trabalho.

Como a máquina ficou em desuso durante um longo período, achou-se conveniente desmontá-la, para verificar o estado de conservação de todos os seus componentes. Estes foram separados, avaliados e foi verificado se havia necessidade de reparo ou reposição em alguns deles. Depois de tudo verificado, a bomba foi montada e lubrificada. As figuras que ilustram os componentes internos da bomba encontram-se no Anexo II.

Os dados que caracterizam o funcionamento da bomba, segundo o fabricante, são mostrados a seguir:

- Rotação: $n_b = 1740\text{rpm}$;
- Altura: $H_b = 5,6\text{m}$;
- Vazão: $Q_b = 0,0146\text{m}^3/\text{s}$;
- Rendimento: $\eta_b = 76\%$;
- Potência de eixo: $P_{eb} = 1,053\text{kW}$;
- Cavitação: $NPSH_{req.} = 2\text{m}$.

4.2.2 – Características do laboratório de ensaios

A realização do ensaio foi no Laboratório de Etiquetagem de Bombas Centrífugas da Universidade Federal de Itajubá (LEB-UNIFEI), para a obtenção das curvas características do grupo moto-bomba e da bomba na rotação constante igual à nominal. O ensaio tem como finalidade verificar as condições reais de funcionamento do conjunto moto-bomba e da bomba com o propósito de etiquetagem do equipamento. A norma brasileira para este tipo de ensaio é a NB 6397/80.

A figura 4.1 mostra o esquema utilizado no laboratório para a realização do ensaio.

O circuito consiste de um reservatório **R** abaixo do nível do piso, onde a bomba a ser ensaiada succiona água através da linha **s_u**. A linha **s_u** possui uma válvula de pé **V_p**. O ponto 1 representa o anel piezométrico **Ap₁**, cujo local está instalado um transdutor de pressão. No ponto 2 localiza-se o flange de saída da

bomba, onde um anel piezométrico Ap_2 está instalado para medir a pressão através de um transdutor. A linha r de recalque alimenta quatro tubos de diâmetros diferentes. Em cada linha possui uma válvula esfera Ve , um medidor de vazão eletromagnético E e uma válvula globo Vgo . Todos os quatro tubos estão ligados à linha de retorno r_o , que por sua vez alimenta o reservatório R .

Os medidores de vazão medem desde poucos litros de água por segundo até 100 litros por segundo.

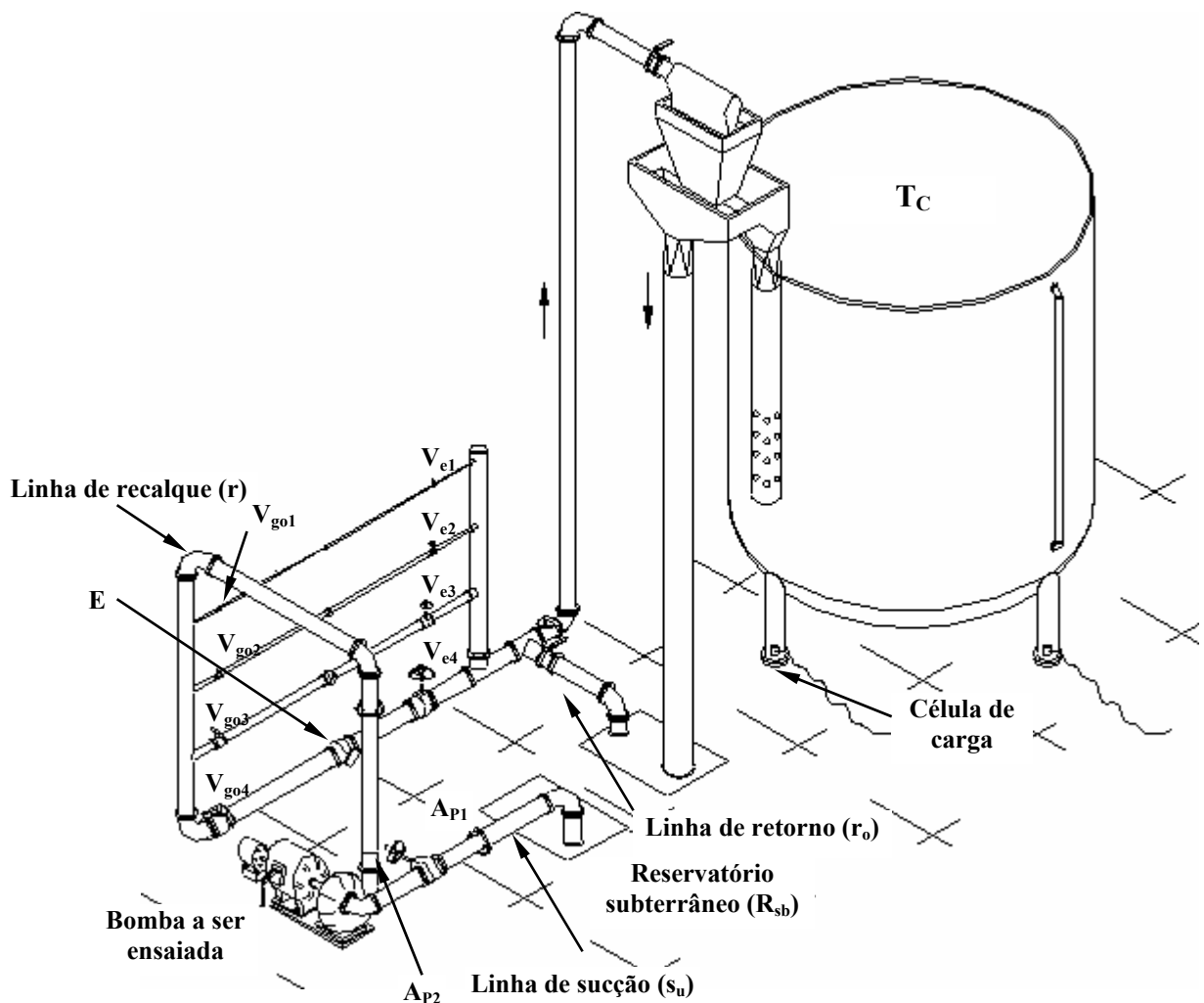


Figura 4.1 – Esquema utilizado no LEB para o ensaio na bomba

O tanque de calibração T_c é utilizado para fazer a calibração dos medidores de vazão eletromagnéticos.

4.2.3 – Procedimento operacional para o ensaio do grupo moto-bomba

O procedimento operacional descrito a seguir representa o ensaio de um grupo moto-bomba e de uma bomba com rotação constante selecionando uma das quatro linhas que ligam a tubulação de retorno r_0 .

- Fechar as válvulas esféricas V_{e1} , V_{e2} , V_{e3} , V_{e4} e as válvulas globo V_{g01} , V_{g02} , V_{g03} , V_{g04} ;
- Escorvar a bomba (preencher o corpo da bomba com água);
- Partir o conjunto moto-bomba no quadro de comando, deixando um tempo de estabilização;
- Fazer as medidas (aquisição), com as válvulas esféricas e as válvulas globo fechadas (shut-off), da temperatura da água (t), da rotação (n), das pressões nos pontos 1 e 2 e da potência elétrica (P_{elm});
- Selecionar uma das quatro linhas (por exemplo, a linha 1).
- Abrir a válvula V_{e1} totalmente;
- Variar a abertura da válvula V_{g01} , desde a abertura mínima até a máxima permitida (verificar a corrente do motor);
- Para cada abertura da válvula V_{g01} , medir a temperatura da água (t), a rotação (n), as pressões nos pontos 1 e 2, a vazão (Q_b) e a potência elétrica (P_{elm});
- Com os valores lidos, determinam-se os valores da altura total de elevação (H_b) da bomba, da potência hidráulica da bomba (P_{hb}), do rendimento do conjunto moto-bomba (η_{cb}), da potência de eixo (P_{eb}) da bomba (através do rendimento do motor elétrico) e rendimento total (η_b) da bomba;
- Com os valores calculados, levantam-se as curvas da altura total de elevação da bomba (H_b), rendimento do conjunto moto-bomba e rendimento total da bomba (η_b) versus vazão (Q_b), para a rotação constante.

4.2.4 – Equacionamento básico para o ensaio da bomba

A figura 4.2 apresenta em detalhes uma das linhas de ensaios, mostrando os medidores de pressão, de vazão e as válvulas do circuito.

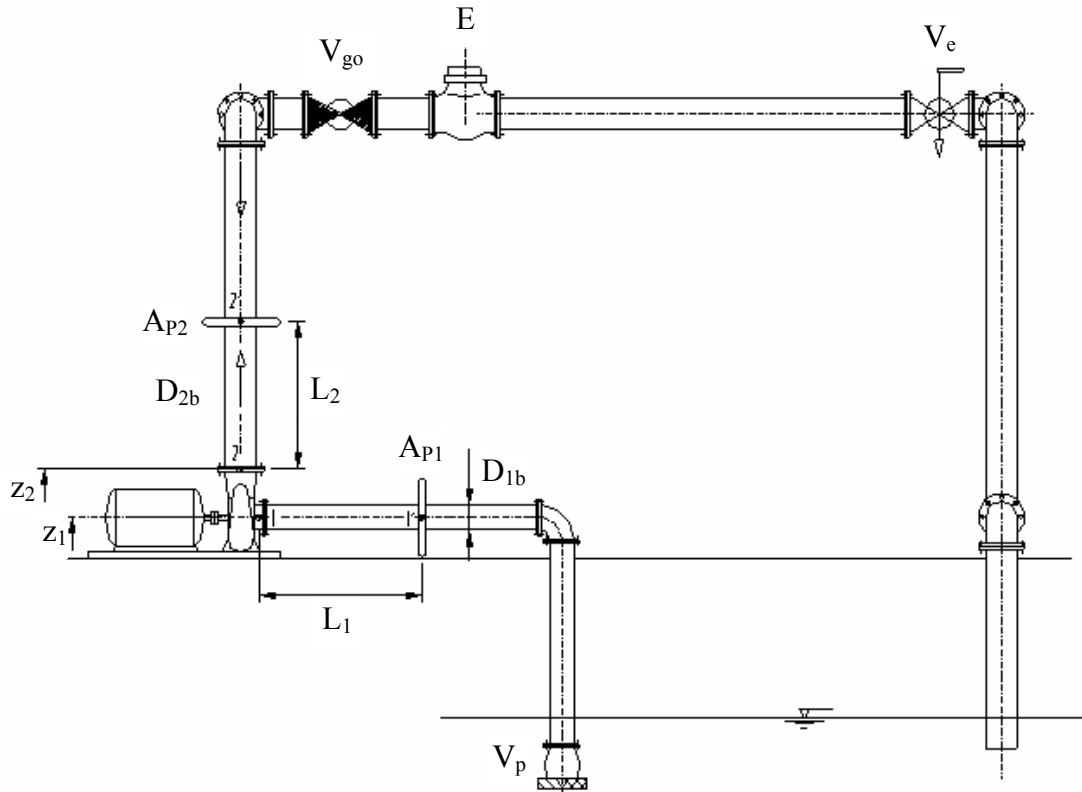


Figura 4.2 – Circuito de ensaios de uma das linhas

4.2.4.1 – Vazão da bomba

A vazão (Q_b) é obtida no medidor eletromagnético de vazão (calibrado), em m^3/s , podendo ser lida no display do painel ou aquisitada via computador. No caso da aquisição via computador, há necessidade da curva de calibração do medidor, que é representada pela equação (4.1).

$$Q_b = a \cdot I_m + b \quad (4.1)$$

Onde:

Q_b – vazão da bomba [m^3/s];

I_m – corrente de saída do medidor de vazão eletromagnético [mA];

a e b – constantes obtidas na calibração do medidor [1].

4.2.4.2 - Velocidade média na entrada e na saída da bomba

A velocidade média na entrada (ponto 1) e na saída (ponto 2), conforme a figura 4.2, são calculadas através das equações (4.2).

$$v_{1b} = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot D_{1b}^2}; \quad v_{2b} = \frac{4 \cdot Q_b}{\pi \cdot D_{2b}^2} \quad (4.2)$$

Onde:

v_{1b} , v_{2b} – velocidades médias do escoamento na entrada e na saída da bomba, respectivamente [m/s];

Q_b – vazão da bomba [m^3/s];

D_{1b} , D_{2b} – diâmetros internos na entrada e na saída da bomba, respectivamente [m].

4.2.4.3 - Altura total de elevação da bomba

Aplicando a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 da figura 4.2, obtém-se:

$$H_b = \frac{p_{2b} - p_{1b}}{\rho \cdot g} + \left(\frac{v_{2b}^2 - v_{1b}^2}{2 \cdot g} \right) + z_{2b} - z_{1b} \quad (4.3)$$

Onde:

H_b – altura total de elevação da bomba [m];

$\frac{p_{2b} - p_{1b}}{\rho \cdot g}$ – altura referente às pressões nos pontos 2 e 1, medidas nos transdutores

de pressão 2 e 1, respectivamente [m];

$\frac{v_{2b}^2 - v_{1b}^2}{2 \cdot g}$ – altura referente a variação de energia cinética entre os pontos 2 e 1,

respectivamente [m];

$z_{2b} - z_{1b}$ – diferença entre as cotas dos pontos 1 e 2, respectivamente [m].

A calibração dos transdutores de pressão é feita através das equações (4.4), mostradas a seguir:

$$\frac{p_{1b}}{\rho \cdot g} = c \cdot I_1 + d; \quad \frac{p_{2b}}{\rho \cdot g} = e \cdot I_2 + f \quad (4.4)$$

Onde:

$\frac{p_{1b}}{\rho \cdot g}, \frac{p_{2b}}{\rho \cdot g}$ – pressões lidas nos pontos 1 e 2, respectivamente [m];

I_1, I_2 – correntes dos transdutores 1 e 2, respectivamente [mA];

c, d, e, f – constantes de calibração dos transdutores [1].

4.2.4.4 - Potência Hidráulica da bomba

A potência hidráulica da bomba é dada pela equação (4.5).

$$P_{hb} = \rho \cdot g \cdot Q_b \cdot H_b \cdot 10^{-3} \quad (4.5)$$

Onde:

P_{hb} – potência hidráulica da bomba [kW];

ρ – massa específica da água [kg/m³];

g – aceleração local da gravidade [m/s²];

Q_b – vazão da bomba [m³/s];

H_b – altura total de elevação da bomba [m].

Segundo a norma IEC 41, a massa específica e a aceleração da gravidade podem ser calculadas, respectivamente, através das equações (4.6) e (4.7):

$$\rho = 1000,14 + 0,0094 \cdot t - 0,0053 \cdot t^2 \quad (4.6)$$

Onde:

ρ – massa específica da água [kg/m³];

t – temperatura da água [°C].

$$g = 9,7803 \cdot (1 + 0,0053 \cdot \text{sen}^2 \varphi) - 3 \cdot 10^6 \cdot A \quad (4.7)$$

Onde:

g – aceleração da gravidade [m/s²];

φ – latitude local [°];

A – altitude local [m].

4.2.4.5 - Potência elétrica do motor

A potência elétrica medida pelo transdutor de Watt é aquisitada e supervisionada no computador.

4.2.4.6 – Rendimento do conjunto moto-bomba

O rendimento do grupo moto-bomba é obtido através da equação (4.8), mostrada a seguir.

$$\eta_{mb} = \frac{P_{hb}}{P_{elm}} \quad (4.8)$$

Onde:

η_{mb} – rendimento do conjunto moto-bomba [1];

P_h – potência hidráulica da bomba [kW];

P_{elm} – potência elétrica ativa absorvida pelo motor [kW].

4.2.4.7. - Potência de eixo da bomba

A potência de eixo da bomba é dada pela equação (4.9).

$$P_{eb} = P_{elm} \cdot \eta_m \quad (4.9)$$

Onde:

P_{eb} – potência de eixo da bomba [kW];

P_{elm} – potência elétrica ativa absorvida pelo motor, aquisitada no transdutor de potência ativa [kW];

η_m – rendimento do motor dado por ensaio do motor, fornecido pelo fabricante [1].

O rendimento do motor deverá ser fornecido pelo fabricante do motor ou da etiquetagem do mesmo.

4.2.4.8 - Rendimento total da bomba

O rendimento total da bomba é dado pela equação (4.10), mostrada a seguir:

$$\eta_b = \frac{P_{hb}}{P_{eb}} \quad (4.10)$$

Onde:

η_b – rendimento total da bomba [1];

P_{hb} – potência hidráulica da bomba [kW];

P_{eb} – potência de eixo da bomba [kW].

4.2.5 – Resultados obtidos nos ensaios do grupo moto-bomba

Realizados os ensaios e obtidos os resultados, foram levantadas as curvas de recepção da bomba, que relacionam o rendimento do grupo motobomba e a altura, à sua vazão, para a rotação de 1740 rpm. De posse destes valores, calculou-se a altura e vazão da bomba para as rotações de 1800 e 1840rpm, utilizando-se as Leis de Afinidade, através das equações (2.4) e (2.5). Para pequenas variações na velocidade, como neste caso, o rendimento é considerado constante. Os ensaios nestas rotações não foram realizados devido à limitações técnicas.

$$H_{2b} = \left(\frac{n_{2b}}{n_{nb}} \right)^2 \cdot H_{nb} \quad (2.4)$$

$$Q_{2b} = \frac{n_{2b}}{n_{nb}} \cdot Q_{nb} \quad (2.5)$$

Onde:

H_{2b} – altura da bomba para uma velocidade qualquer [m];

n_{2b} – velocidade da bomba diferente da nominal [rpm];

n_{nb} – velocidade nominal da bomba [1740rpm];

H_{nb} – altura referente à velocidade nominal da bomba [m];

Q_{2b} – vazão da bomba para uma velocidade diferente da nominal [m^3/s];

Q_{nb} – vazão referente à velocidade nominal da bomba [m^3/s].

As figuras 4.3 e 4.4 mostram as curvas características do grupo moto-bomba.

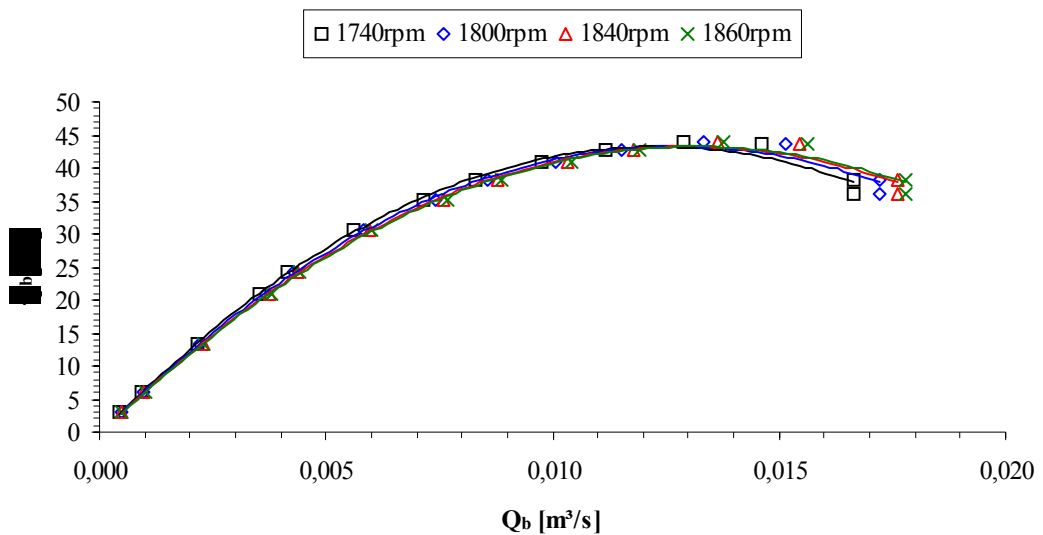


Figura 4.3 – Rendimento em função da vazão para as rotações de 1740, 1800, 1840 e 1860rpm

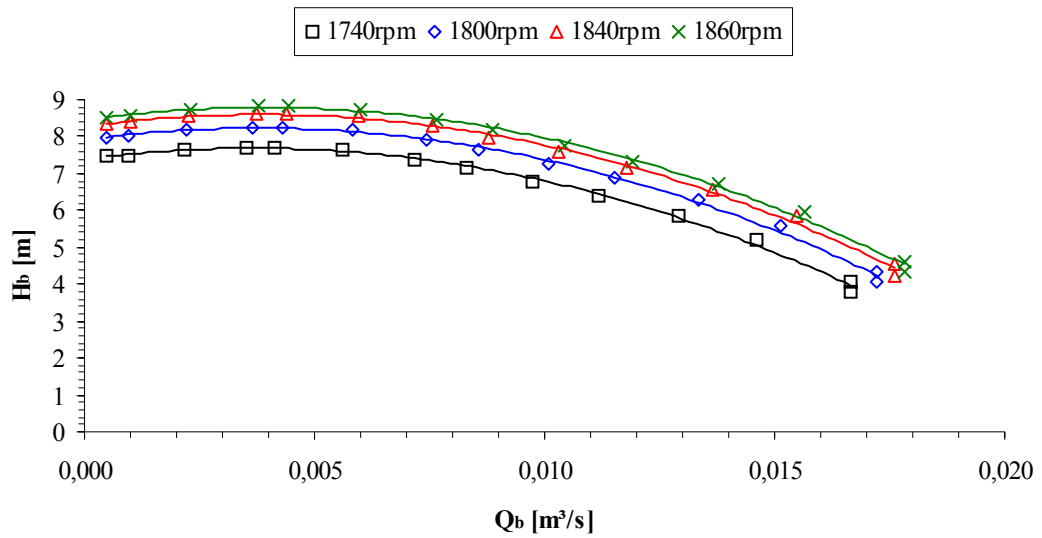


Figura 4.4 – Altura em função da vazão para as rotações de 1740, 1800, e 1840 e 1860rpm

A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para o ponto de melhor rendimento. Os resultados do ensaio da bomba encontram-se no Anexo I.

Tabela 4.1 – Resultados do ensaio da bomba para o ponto de melhor rendimento

n_b [rpm]	η_{mb} [%]	Q_b [m³/s]	H_b [m]	P_{hb} [kW]
1740	0,43	0,0124	6,0	0,73
1800	0,43	0,0127	6,5	0,81
1840	0,43	0,0131	6,8	0,87
1860	0,43	0,0133	6,9	0,90

As figuras que mostram os instrumentos e equipamentos utilizados no ensaio encontram-se no Anexo III.

4.3 – Ensaio no motor de indução

4.3.1 – Características do motor

As características do motor de indução utilizado, segundo o fabricante, são apresentadas a seguir:

- Potência nominal: $P_n = 2,2\text{kW}$;
- Tensão nominal: $V_n = 220\text{V} (\Delta)/380\text{V} (Y)$;
- Corrente nominal: $I_n = 9\text{A} (\Delta)/ 5,2\text{A} (Y)$;
- Rendimento a plena carga: 0,77;
- Fator de potência a plena carga: 0,85.

4.3.2 – Ensaio a vazio e com o rotor travado

A finalidade dos ensaios a vazio e com o rotor travado é determinar as perdas nos circuitos do estator, do rotor e as perdas devido ao atrito e ventilação no motor. A figura 4.5 mostra a bancada de instrumentos utilizada no ensaio do motor de indução.

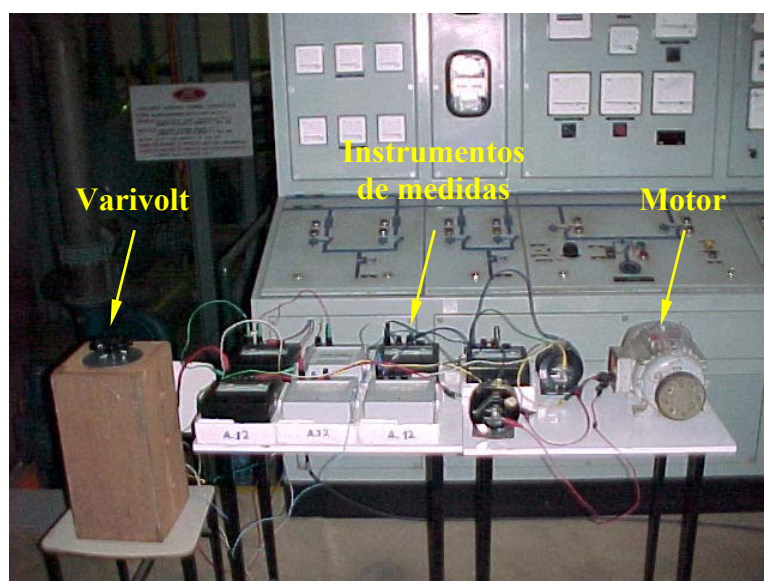


Figura 4.5 – Bancada de ensaios do motor de indução

A figura 4.6 mostra o esquema utilizado para a montagem dos instrumentos e equipamentos utilizados no ensaio do motor de indução.

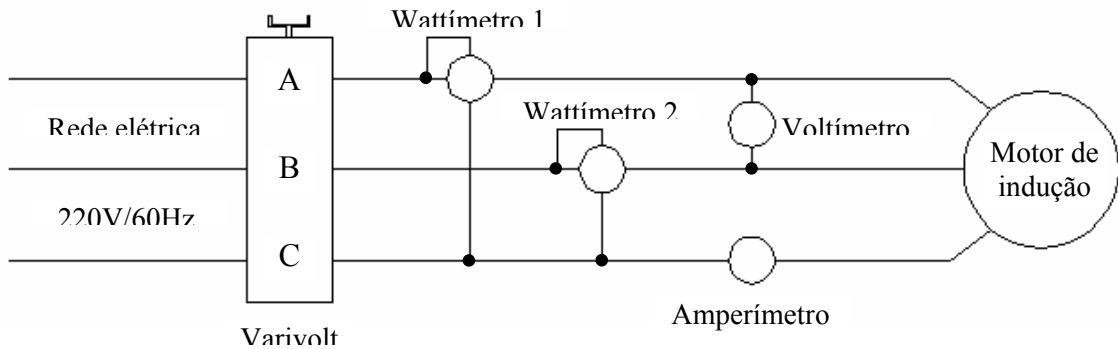


Figura 4.6 – Esquema de montagem dos instrumentos e equipamentos

Depois da montagem dos instrumentos, equipamentos e medida a resistência, o próximo passo foi ensaiar a máquina a vazio e com o rotor travado, com a finalidade de se determinar as perdas no núcleo de ferro, as perdas por atrito e ventilação e as perdas no enrolamento do estator e do rotor, de acordo com a metodologia proposta no trabalho de (COGO et al, 1984).

O procedimento operacional a seguir descreve a maneira como devem ser feitos os ensaios a vazio e com o rotor bloqueado:

- medir a resistência entre as fases com a finalidade de se determinar a resistência do circuito do rotor, que é dada pela equação (4.11).

$$r_{1Y} = \frac{3}{2} \cdot r_{\text{medido}} \quad (4.11)$$

Onde:

r_{1Y} – resistência equivalente (estrela) do circuito do estator [Ω /fase];

r_{medido} – resistência medida entre duas fases quaisquer motor [Ω].

- medir a temperatura ambiente;

- através do varivolt, alimentar o motor com uma tensão de 120% da nominal. Neste caso, como a tensão nominal era 220V, o motor foi alimentado como 240V;
- registrar o valor da tensão, da corrente nas três fases e dos wattímetros 1 e 2. A potência total consumida pelo motor operando a vazio é dada pela equação (4.12) e seguir:

$$W_0 = W_1 + W_2 \quad (4.12)$$

Onde:

W_0 – potência total consumida a vazio [W];

W_1 – potência lida no wattímetro 1 [W];

W_2 – potência lida no wattímetro 2 [W].

Obs.: se a leitura em um dos wattímetros for negativa, ou seja, se o ponteiro do instrumento se deslocar no sentido anti-horário, deve-se inverter os bornes da bobina de tensão e registrar um valor negativo de potência.

- reduzir o valor da tensão de alimentação até que a redução da tensão cause um aumento na corrente do motor. A cada redução na tensão, deve-se registrar os valores da corrente, das potências lidas nos wattímetros 1 e 2 e da própria tensão;
- aguardar o motor adquirir a temperatura ambiente novamente para a realização do ensaio com o rotor bloqueado;
- travar o rotor da motor com uma ferramenta adequada;
- aumentar a tensão, através do varivolt, até que a corrente atinja o valor nominal. Neste caso a corrente nominal é 9A;
- registrar o valor da tensão, dos wattímetros 1 e 2 e da própria corrente.

4.3.3 – Resultados dos ensaios no motor de indução

Realizados os ensaios, o próximo passo é a determinação das perdas do gerador, que, para fins práticos, podem ser consideradas iguais às perdas do motor.

Estas perdas podem ser determinadas somando-se a potência obtida no ensaio a vazio, para a tensão nominal, que neste caso é 220V, e aquela obtida no ensaio com o rotor travado. As perdas do motor de indução são dadas pela equação (4.13).

$$W_{\text{perdas}} = W_0 + W_{\text{travado}} \quad (4.13)$$

Onde:

W_{perdas} – perdas totais da máquina de indução [W];

W_0 – perdas no núcleo de ferro da máquina e perdas devido ao atrito e à ventilação, obtidas no ensaio a vazio, para $V_m = 220V$ [W];

W_{travado} – perdas nos circuitos do estator e do rotor, obtidas no ensaio com o rotor travado [W].

Observando-se os resultados no Anexo I obtém-se:

$$W_0 = 280W$$

$$W_{\text{travado}} = 440W$$

Logo:

$$W_{\text{perdas}} = 720W$$

4.4 – Ensaio na BFT e no gerador de indução

4.4.1 – Características do laboratório de ensaios

O ensaio da BFT e do gerador de indução foi realizado no Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas da Universidade Federal de Itajubá (LHPCH – UNIFEI), para a obtenção das curvas características do grupo-gerador e da BFT operando com rotação constante. O ensaio tem como finalidade verificar as condições de funcionamento do grupo-gerador e da BFT, com a finalidade de se levantar suas curvas características e avaliar seu funcionamento através dos resultados obtidos. A norma utilizada no ensaio do grupo gerador foi a NB – 228/74.

As figuras 4.7a e 4.7b mostra os instrumentos e equipamentos utilizados no ensaio da BFT.



Figura 4.7 – Equipamentos e instrumentos utilizados no ensaio da BFT e do gerador de indução

O circuito funciona da seguinte maneira: a bomba **B**, utilizada para simular a queda e a vazão, succiona água do reservatório R_{st} e recalca para o vaso de pressão V_{pr} . Então, a água passa pelo medidor Venturi V para que a vazão possa ser calculada em função da diferença de altura observada no manômetro de mercúrio M_1 . Daí a água passa pela válvula de controle V_C e entra na BFT. Na entrada desta foi montado um anel piezométrico, que permite a determinação da altura neste ponto,

em função das alturas lidas no manômetro de mercúrio M_2 . Finalmente, água retorna ao reservatório R_s e o seu nível é medido no piezômetro P_z .

No caso da BFT, além do ensaio a 1740rpm, também foram realizados ensaios a 1800, 1840 e 1860rpm. A razão de se obter as curvas características para a rotação de 1740rpm, justifica-se no sentido de se comparar a relação entre a altura e a vazão da BFT com aquelas quando a máquina estiver operando como bomba. O ensaio à 1800rpm foi realizado com o intuito de se verificar a variação da frequência desde a condição à vazio até àquela onde o gerador opera a carga nominal. O ensaio a 1840rpm justificou-se, pois, esta foi a rotação onde o grupo gerador operou à aproximadamente 60 Hz no ponto onde o rendimento foi máximo, mas o gerador não estava operando a plena capacidade. À 1860rpm o gerador de indução operou à plena capacidade (10A) com a frequência de 60Hz, mas o rendimento do grupo-gerador não foi máximo.

As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 mostram a BFT, o gerador de indução, a bancada de instrumentos e o banco de capacitores utilizados para excitar o gerador de indução. As figuras contendo mais detalhes do ensaio encontram-se no Anexo III.



Figura 4.8 – BFT e gerador de indução



Figura 4.9 – Bancada de instrumentos

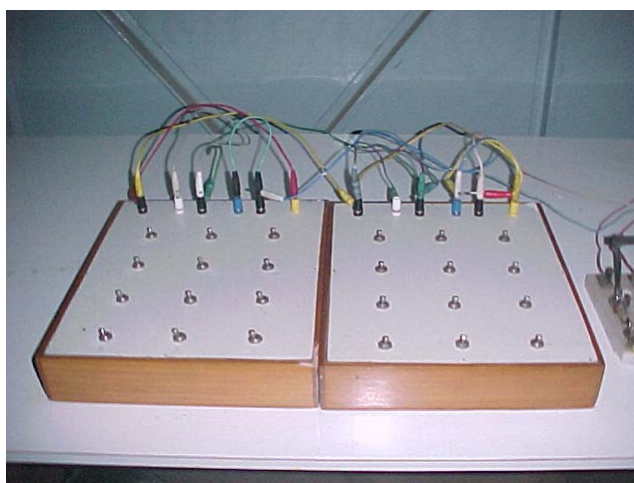


Figura 4.10 – Banco de capacitores para a excitação do gerador

4.4.2 – Determinação da altura manométrica na entrada da BFT

A altura manométrica na entrada da BFT foi determinada utilizando-se os conceitos de manometria. A figura 4.11 mostra a BFT e o manômetro M_2 acoplado à sua entrada.

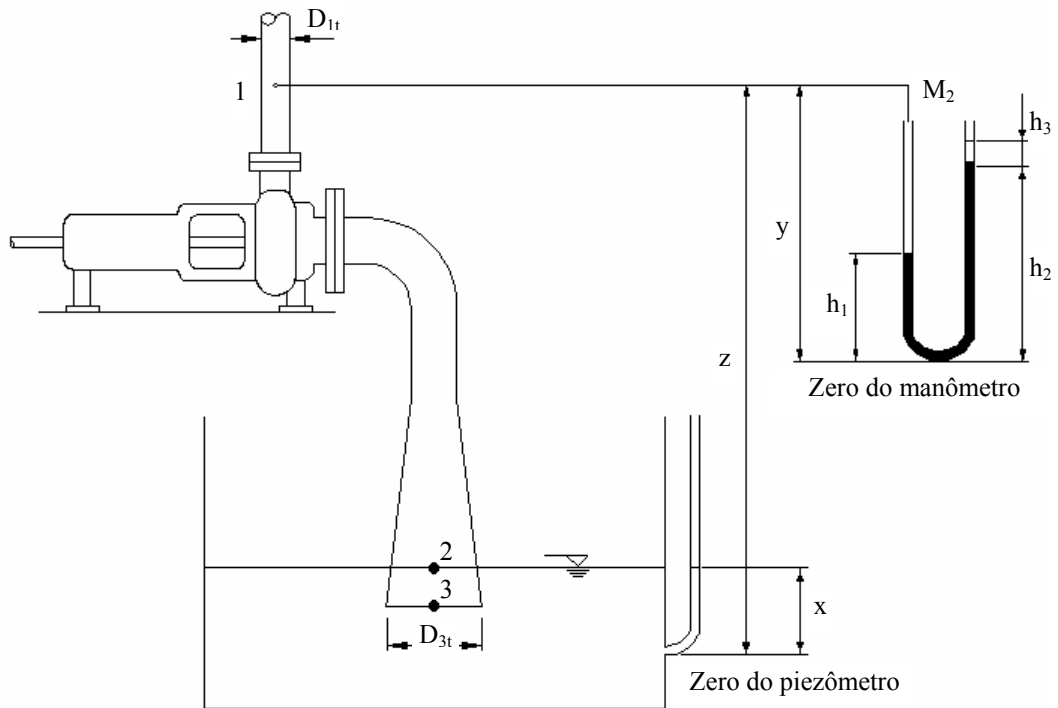


Figura 4.11 – Manômetro de colunas de mercúrio montado na entrada da BFT

Observando a figura 4.11 e aplicando os conceitos de manometria obtém-se:

$$p_{2t} + \rho \cdot g \cdot y - \rho \cdot g \cdot h_1 + \rho_{\text{Hg}} \cdot g \cdot h_1 - \rho \cdot g \cdot h_3 - \rho_{\text{Hg}} \cdot g \cdot h_2 = 0 \quad (4.14)$$

Onde:

p_{2t} – pressão no ponto 2 [Pa];

ρ – densidade da água [kg/m^3];

g – aceleração local da gravidade [m/s^2];

h_1 – altura da coluna de mercúrio do manômetro [m];

ρ_{Hg} – densidade do mercúrio [kg/m^3];

h_3 – altura da coluna d'água no manômetro [m];

h_2 – altura da coluna de mercúrio do manômetro [m].

A densidade relativa do mercúrio é dada por:

$$\frac{\rho_{\text{Hg}}}{\rho} = 13,6 \quad (4.15)$$

Dividindo-se todos os membros da equação (4.14) por ρ e substituindo-se a equação (4.15) em (4.14) vem:

$$\frac{p_{2t}}{\rho \cdot g} = 13,6 \cdot h_2 - 12,6 \cdot h_1 + h_3 - y \quad (4.16)$$

Sabendo-se que:

$$h_3 = 0,012\text{m}$$

$$y = 1,96\text{m}$$

Vem:

$$\frac{p_{2t}}{\rho \cdot g} = 13,6 \cdot h_2 - 12,6 \cdot h_1 - 1,938 \quad (4.17)$$

De acordo com a figura 4.11, a altura referente ao nível do reservatório a jusante é:

$$z_1 - z_3 = z - x$$

Mas:

$$z = 1,52\text{m}$$

Logo:

$$z_1 - z_3 = 1,52 - x \quad (4.18)$$

A equação (4.17) é a altura referente à pressão manométrica na entrada da BFT enquanto que a equação (4.18) é a altura entre o ponto 1 na entrada da BFT e o ponto 2.

4.4.3 – Determinação da equação do medidor Venturi

O medidor Venturi é um instrumento utilizado para se medir vazão. Esta é calculada em função da diferença de altura de um manômetro de coluna d'água, conectado entre dois pontos do medidor. A figura 4.12 mostra o medidor Venturi e o manômetro de colunas d'água.

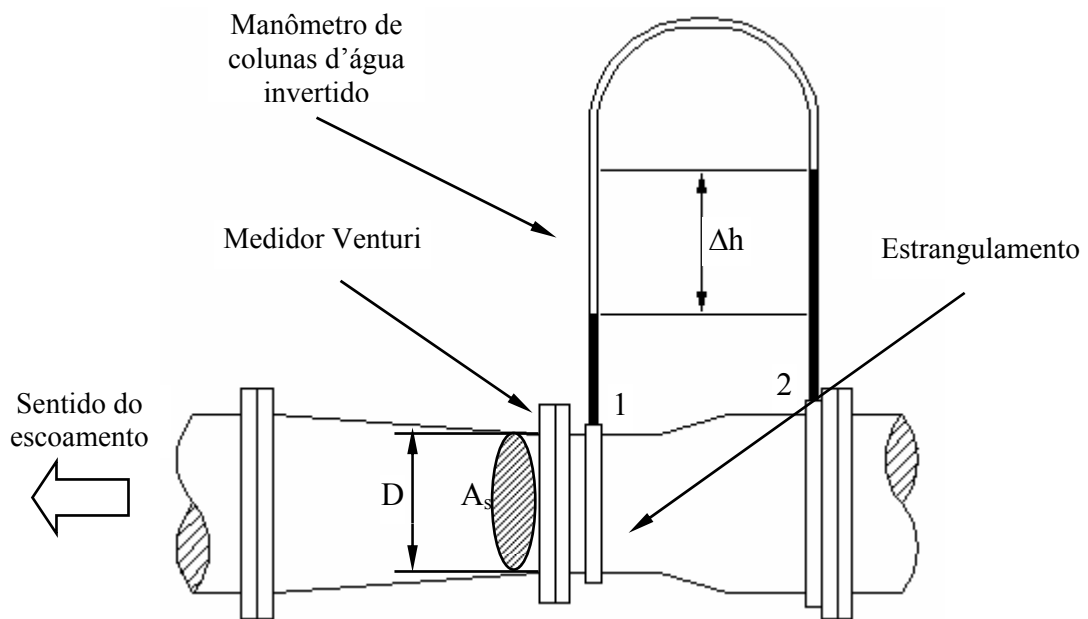


Figura 4.12 – Medidor Venturi

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2 da figura 4.12, obtém-se:

$$Q_t = C_v \cdot A_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (4.19)$$

Onde:

Q_t – vazão da BFT [m^3/s];

C_V – constante do Venturi [1];

A_s – área da seção transversal do estrangulamento do Venturi [m^2];

g – aceleração local da gravidade [m/s^2];

Δh – diferença de altura lida no manômetro de colunas d'água [m].

A área da seção transversal do tubo é dada por:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4.20)$$

Onde:

A – área da seção transversal do Venturi [m^2];

D – diâmetro interno do Venturi [m].

Considerando o diâmetro interno do tubo igual à 0,13943m e a aceleração da gravidade igual à 9,785m/s² e, aplicando-se estes dados nas equações (4.19) e (4.20), vem:

$$Q_t = 0,083257 \cdot \sqrt{\Delta h} \quad (4.21)$$

A equação (4.21) será utilizada para calcular a vazão da BFT em função da diferença de altura lida no manômetro de colunas d'água.

4.4.4 – Determinação altura referente à velocidade da água

A altura que se refere à velocidade da água pode ser calculada através da equação (4.22) a seguir:

$$H = \frac{v_{1t}^2 - v_{3t}^2}{2 \cdot g} \quad (4.22)$$

Onde:

H – altura referente à velocidade da água [m];

v_{1t} – velocidade na entrada da BFT (ponto 1) [m/s];

v_{3t} – velocidade na saída do tubo de sucção (ponto 3) [m/s];

g – aceleração local da gravidade [m/s^2].

Com a finalidade de tornar mais fácil o cálculo desta parcela de energia, desenvolveu-se uma equação específica para este sistema, onde a altura referente à velocidade é função apenas da vazão. A velocidade da água nos pontos 1 e 3 (figura 4.11) é dada pelas equações (4.23).

$$v_{1t} = \frac{4 \cdot Q_t}{\pi \cdot D_{1t}^2}; \quad v_{3t} = \frac{4 \cdot Q_t}{\pi \cdot D_{3t}^2} \quad (4.23)$$

Onde:

v_{1t} , v_{3t} – velocidade nos pontos 1 e 3, respectivamente [m/s];

Q_t – vazão da turbina [m^3/s];

D_{1t} , D_{3t} – diâmetro interno do tubo nos pontos 1 e 3, respectivamente [m].

Sabendo-se que:

$$D_{1t} = 0,0762m; D_{3t} = 0,21m$$

Vem:

$$v_{1t} = \frac{4 \cdot Q_t}{\pi \cdot 0,0762^2} = 219,28 \cdot Q_t^2; \quad v_{3t} = \frac{4 \cdot Q_t}{\pi \cdot 0,21^2} = 28,87 \cdot Q_t^2 \quad (4.24)$$

Substituindo (4.24) em (4.23) e considerando $g = 9,785\text{m/s}^2$, obtém-se:

$$H = \frac{(219,28 \cdot Q_t)^2 - (28,87 \cdot Q_t)^2}{2 \cdot 9,785} = 2414 \cdot Q_t^2 \quad (4.25)$$

4.4.5 – Determinação da altura total da BFT

Conhecida a altura na entrada da BFT, o nível do reservatório R_s e sua vazão, calcula-se a altura do total da BFT, através da equação (4.26).

$$H_t = \frac{p_{2t}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{1t}^2 - v_{3t}^2}{2 \cdot g} + (z_{1t} - z_{3t}) \quad (4.26)$$

Onde:

H_t – altura total da BFT [m];

$\frac{p_{2t}}{\rho \cdot g}$ – altura referente à pressão manométrica na entrada da BFT [m];

$\frac{v_{1t}^2 - v_{3t}^2}{2 \cdot g}$ – altura referente à velocidade da água nos pontos 1 e 3;

$(z_{1t} - z_{3t})$ – altura entre a entrada da BFT e o nível do tanque de sucção [m].

Substituindo as equações (4.16), (4.18) e (4.25) na equação (4.26), obtém-se a equação (4.28).

$$H_t = (13,6 \cdot h_2 - 12,6 \cdot h_1 + h_3 - 1,95) + (2414 \cdot Q_t^2) + (1,52 - x) \quad (4.27)$$

Onde:

H_t – altura da BFT [m];

h_2 – altura da coluna de mercúrio (figura 4.11) [m];

h_1 – altura da coluna de mercúrio (figura 4.11) [m];

h_3 – altura da coluna de água (figura 4.11) [m];

Q_t – vazão da turbina [m^3/s];

x – altura da coluna d'água no piezômetro (figura 4.11) [m].

A equação (4.27) será utilizada para o cálculo da altura da BFT.

4.4.6 – Determinação da potência hidráulica da BFT

Conhecida a altura e a vazão da BFT calcula-se sua potência hidráulica através da equação (4.28) a seguir:

$$P_{ht} = \rho \cdot g \cdot H_t \cdot Q_t \cdot 10^{-3} \quad (4.28)$$

Onde:

P_{ht} – potência hidráulica da BFT [kW];

ρ – densidade da água [kg/m^3];

g – aceleração local da gravidade [m/s^2];

H_t – altura da BFT [m];

Q_t – vazão da BFT [m^3/s].

4.4.7 – Determinação da potência elétrica gerada pela máquina de indução

Conhecida a corrente referente à potência ativa e a tensão gerada pela máquina, medidas durante o ensaio, calcula-se a citada potência com base na equação (4.29) a seguir:

$$P_{elg} = \sqrt{3} \cdot V_g \cdot I_{Ag} \cdot 10^{-3} \quad (4.29)$$

Onde:

P_{elg} – potência ativa gerada pela máquina [kW];

V_g – tensão gerada pela máquina [V];

I_{Ag} – corrente do gerador de indução [A].

4.4.8 – Determinação da potência aparente da máquina de indução

Conhecida a corrente referente à potência aparente e a tensão do gerador, medidas durante o ensaio, calcula-se a citada potência com base na equação (4.30) a seguir:

$$S_g = \sqrt{3} \cdot V_g \cdot I_{Sg} \cdot 10^{-3} \quad (4.30)$$

Onde:

S_g – potência aparente do gerador [kW];

V_g – tensão gerada pela máquina [V];

I_{Sg} – corrente referente à potência aparente do gerador [A].

4.4.9 – Determinação do fator de potência do gerador de indução

De posse dos valores da potência ativa e da potência aparente do gerador de indução, calcula-se o fator de potência da máquina, através da equação (4.31).

$$\cos(\phi_g) = \frac{P_{elg}}{S_g} \quad (4.31)$$

Onde:

$\cos(\phi_g)$ – fator de potência do gerador de indução [1];

P_{elg} – potência ativa gerada pela máquina de indução [kW];

S_g – potência aparente do gerador de indução [kVA].

4.4.10 – Determinação do rendimento do grupo-gerador

De posse dos valores da potência hidráulica da BFT e da potência elétrica gerada pela máquina de indução, determina-se o rendimento do grupo-gerador, através da equação (4.32).

$$\eta_{gg} = \frac{P_{elg}}{P_{ht}} \quad (4.32)$$

Onde:

η_{gg} – rendimento do grupo-gerador [1];

P_{elg} – potência elétrica gerada pela máquina de indução [kW];

P_{ht} – potência hidráulica da BFT [kW].

4.4.11 – Determinação do rendimento do gerador de indução

O rendimento do gerador de indução pode ser determinado através da equação (4.33).

$$\eta_g = \frac{P_{elg}}{P_{elg} + W_{perdas}} \quad (4.33)$$

Onde:

η_g – rendimento do gerador de indução [1];

P_{elg} – potência elétrica gerada pela máquina [kW];

W_{perdas} – perdas na máquina de indução obtidas no ensaio do motor (seção 4.3.3) [kW].

4.4.12 – Determinação do rendimento da BFT

Conhecido o rendimento do grupo-gerador e o rendimento do gerador de indução, calcula-se o rendimento da BFT, através da equação (4.34) a seguir:

$$\eta_t = \frac{\eta_{gg}}{\eta_g} \quad (4.34)$$

Onde:

η_t – rendimento da BFT [1];

η_{gg} – rendimento do grupo-gerador [1];

η_g – rendimento do gerador de indução [1].

4.4.13 – Ensaio no grupo-gerador

A BFT foi ensaiada em quatro rotações, ou seja, 1740, 1800, 1840 e 1860rpm. A segunda rotação justifica-se pelo fato de se poder avaliar a variação da frequência do gerador, desde a condição a vazio até a plena carga. A terceira rotação foi aquela onde o grupo-gerador operou com máximo rendimento à frequência nominal do sistema, ou seja, 60Hz. Finalmente, a rotação de 1860rpm foi aquela onde o gerador de indução operou a plena carga à frequência nominal. Para cada rotação foi feito um ensaio variando-se a vazão e a altura, a fim de se determinar o ponto de máximo rendimento do grupo-gerador.

O gerador de indução foi excitado com um banco de capacitores de 80 μ F com ajuste de 10 μ F. A utilização do banco de capacitores foi necessária pois o objetivo foi avaliar seu comportamento num sistema isolado.

A característica da carga foi resistiva e, a medida que se ia variando, inseria-se ou retirava-se um grupo de capacitores de 10 μ F para que o valor da tensão ficasse em torno de 220V. Também ensaiou-se a partida de um pequeno motor de indução, com uma chave estrela-triângulo, a fim de avaliar a queda na tensão durante a partida do motor alimentado pelo gerador de indução. As figuras relativas ao ensaio do grupo-gerador, encontram-se no Anexo III.

Características como tensão, corrente, potência ativa e reativa, capacitância, fator de potência, altura e vazão foram determinadas e plotadas em curvas características que descrevem o comportamento do grupo-gerador ensaiado operando num sistema isolado. Estas características são mostradas nas seções 4.5.10.1 e 4.5.10.2.

4.4.14 – Resultados obtidos nos ensaios do grupo-gerador

Dos resultados obtidos nos experimentos de laboratório, foram obtidas curvas que informam o rendimento e a altura do grupo gerador em função da vazão, a regulação de frequência e de tensão do gerador e a variação do fator de potência em

função da carga elétrica. Os resultados obtidos no ensaio do grupo-gerador encontram-se no Anexo I.

4.4.14.1 – Resultados obtidos nos ensaios da BFT

As figuras 4.13 a 4.15 apresentam as curvas que caracterizam a operação da BFT.

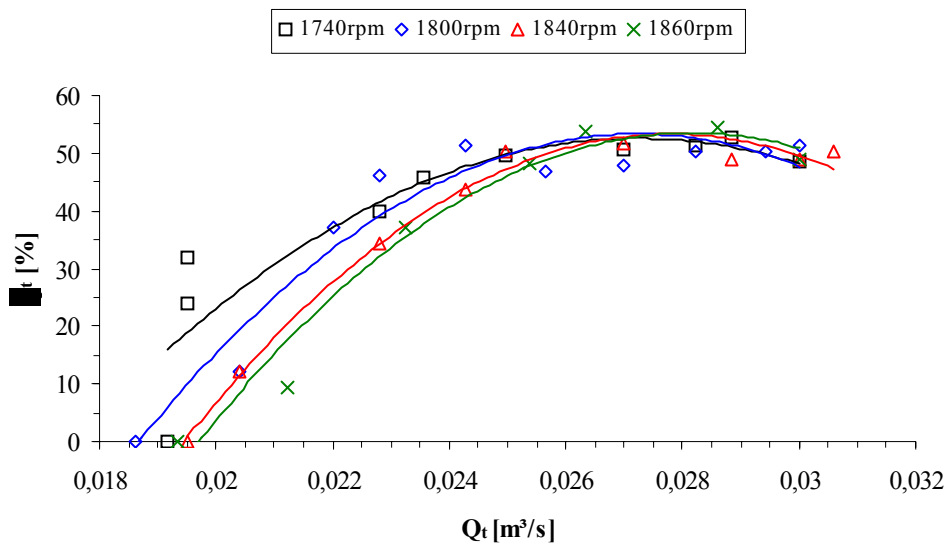


Figura 4.13 – Rendimento do grupo gerador em função da vazão

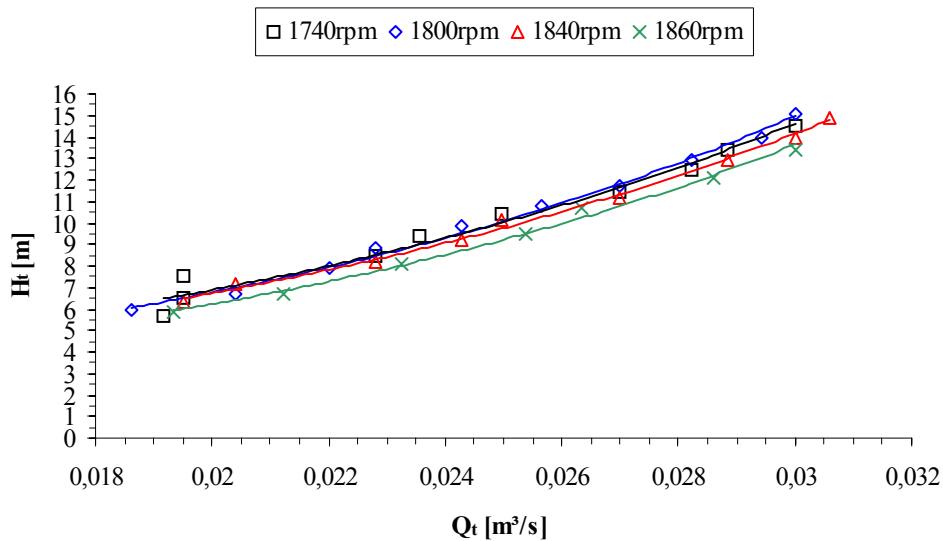


Figura 4.14 – Altura da BFT em função da vazão

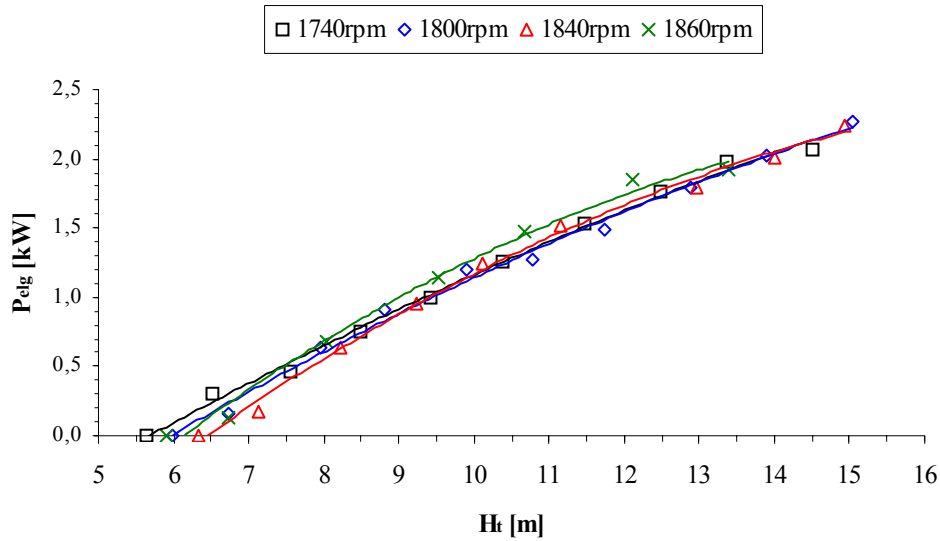


Figura 4.15 – Potência elétrica gerada em função da altura

Observando-se a figura 4.13, verifica-se que o ponto de máximo rendimento ocorreu para a vazão de $0,0273\text{m}^3/\text{s}$, $0,0273\text{m}^3/\text{s}$, $0,0278\text{m}^3/\text{s}$ e $0,0282\text{m}^3/\text{s}$, para as rotações de 1740rpm, 1800rpm, 1840rpm e 1860rpm, respectivamente.

Da figura 4.14, observa-se que as alturas onde a BFT opera com o máximo rendimento são, respectivamente, para as rotações de 1740rpm, 1800rpm, 1840rpm e 1860 rpm, 11,8m, 12,0m, 12,0m e 11,7m. Observa-se também que a altura da BFT aumentou com a rotação até 1800rpm, o que está de acordo com os resultados obtidos no trabalho de (CHAPALLAZ et al, 1992). Mas a altura manteve-se constante para a rotação de 1840rpm e sofreu uma queda para a rotação de 1860rpm. O ocorrido pode ser explicado pelo fato das perdas internas da máquina terem aumentado com o aumento da vazão.

Dos resultados obtidos no ensaio da bomba e da BFT, obteve-se os coeficientes de altura e de vazão, tanto para o Método de Viana como para o Método de Chapallaz, através das equações a seguir:

$$c_H = \frac{H_b}{H_t} \quad (4.1)$$

$$c_Q = \frac{Q_b}{Q_t} \quad (4.2)$$

$$c_H = \frac{H_t}{H_b} \quad (4.3)$$

$$c_Q = \frac{Q_t}{Q_b} \quad (4.4)$$

Onde:

c_H – coeficiente de altura [1];

H_b – altura da bomba que será utilizada como turbina [m];

H_t – altura disponível no aproveitamento (da BFT) [m];

c_Q – coeficiente de vazão [1];

Q_b – vazão da bomba que será utilizada como turbina [m³/s];

Q_t – vazão disponível no aproveitamento (da BFT) [m³/s].

Deve-se observar nas equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4), que os coeficientes obtidos no Método de Chapallaz são o inverso daqueles obtidos no Método de Viana. A Tabela 4.2 mostra os coeficientes experimentais obtidos neste trabalho, para o ponto de melhor rendimento e os compara com aqueles determinados segundo os Métodos de Viana e de Chapallaz.

Tabela 4.2 – Comparação entre os coeficientes de altura e de vazão

Rotação [rpm]		1740	1800	1840	1860
H_b [m]		6,0	6,5	6,8	6,9
H_t [m]		11,80	12,00	12,00	11,70
Q_b [m ³ /s]		0,0124	0,0127	0,0131	0,0133
Q_t [m ³ /s]		0,0273	0,0273	0,0278	0,0282
Viana	n_{qA} (bomba) [1]	152	150	151	152
	n_{qA} (BFT) [1]	136	139	143	149
	n_{qA} (BFT)/ n_{qA} (bomba)	0,89	0,93	0,95	0,98
	H_b/H_t [1]	0,51	0,54	0,57	0,59
	c_H (figura 2.4) utilizando n_{qA} da bomba [1]	0,60	0,58	0,59	0,60
	Q_b/Q_t [1]	0,45	0,47	0,47	0,47
	c_Q (figura 2.4) utilizando n_{qA} da bomba [1]	0,72	0,74	0,73	0,72
Chapallaz	n_{qb}	51	50	50	50
	n_{qt}	45	46	48	49
	n_{qt}/n_{qb}	0,89	0,93	0,95	0,98
	H_t/H_b [1]	1,97	1,85	1,76	1,70
	c_H [1] para $\eta_b = 76\%$ (figura 2.7) [1]	1,4	1,4	1,4	1,4
	Q_t/Q_b [1]	2,20	2,15	2,12	2,12
	c_Q [1] para $\eta_b = 76\%$ (figura 2.8) [1]	1,35	1,35	1,35	1,35
Rendimento experimental	η_b [1]	0,43	0,43	0,43	0,43
	η_t [1]	0,76	0,76	0,75	0,76

Apesar de (VIANA, 1987) considerar a mesma rotação específica tanto para a bomba como para a BFT, verifica-se, da tabela 4.2, que existe uma pequena diferença que diminui conforme a rotação aumenta. (CHAPALLAZ et al, 1992) considera uma relação igual a 0,89 entre a rotação específica da BFT e da bomba, o que de fato ocorreu para a rotação de 1740 rpm, mas conforme a rotação aumenta, esta relação tende à unidade, ou seja, a rotação específica tanto da bomba como da BFT tendem a se igualar.

Verifica-se também que a diferença entre o coeficiente de altura da BFT ensaiada e aquele obtido pelo Método de Viana, torna-se menor a medida que a rotação aumenta. Para a rotação de 1860rpm esta diferença é muito pequena. Já o coeficiente de vazão, esta diferença é razoável.

Para o Método de Chapallaz, a diferença entre o coeficiente de altura da bomba ensaiada e aquele determinado de acordo com a figura 2.7 também se mostra

razoável, tendendo a se igualar para rotações maiores. Já a diferença entre o coeficiente de vazão obtido no ensaio e aquele determinado segundo a figura 2.8 tende a se manter constante, mesmo para rotações maiores.

4.4.14.2 – Resultados obtidos nos ensaios no gerador de indução

As figuras 4.16 à 4.21 mostram as características operacionais do motor de indução operando como gerador, utilizado neste trabalho.

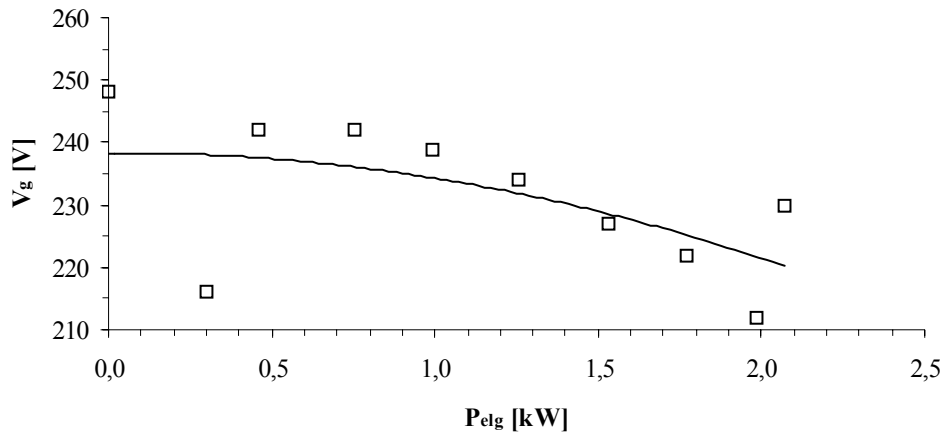


Figura 4.16 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n_{gg}=1740\text{rpm}$

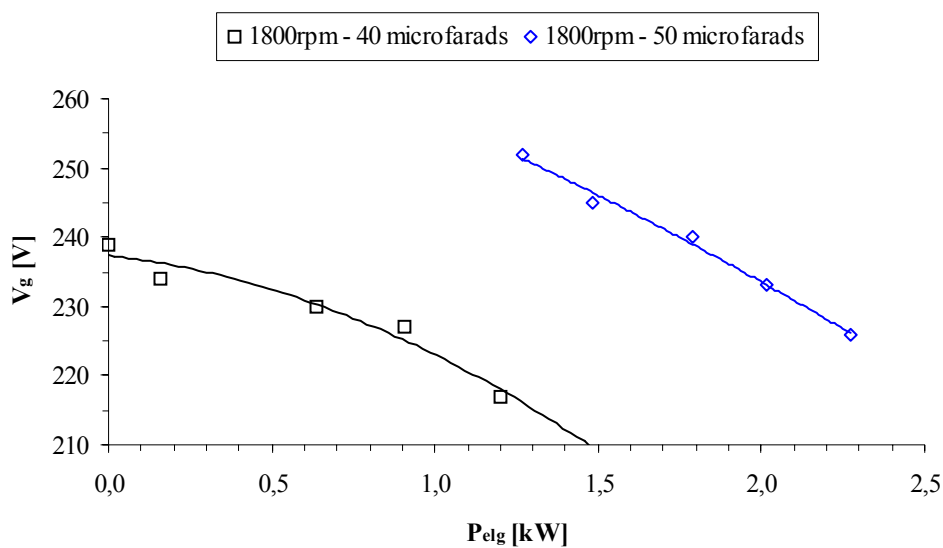


Figura 4.17 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n_{gg}=1800\text{rpm}$

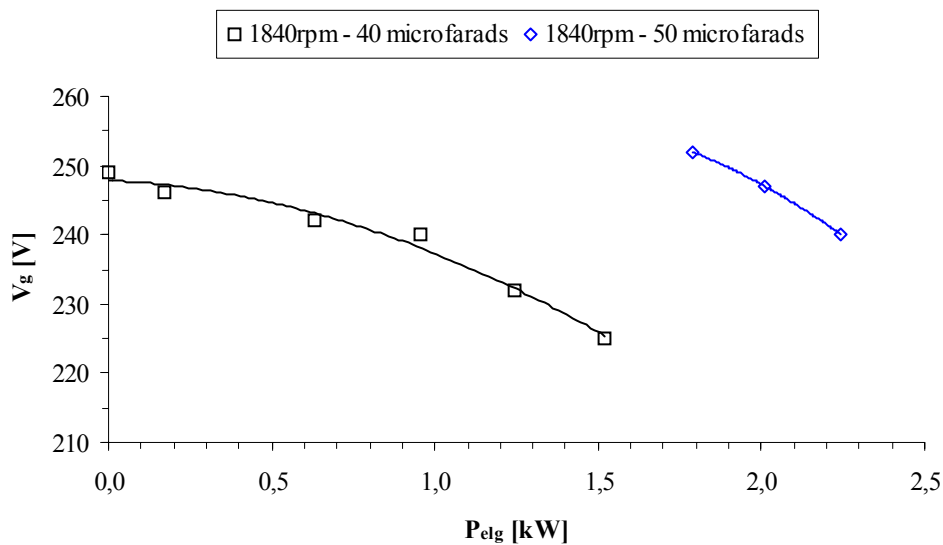


Figura 4.18 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n_{gg}=1840\text{rpm}$

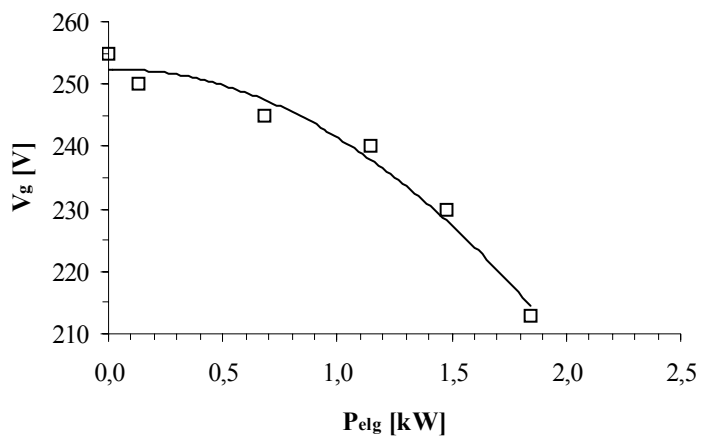


Figura 4.19 – Tensão do gerador em função da potência elétrica gerada, para $n_{gg}=1860$ rpm

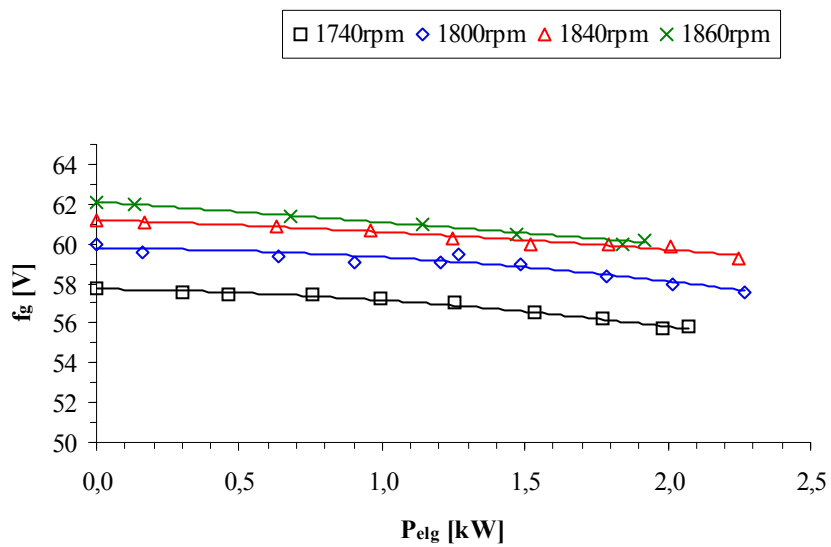


Figura 4.20 – Frequência do gerador em função da potência elétrica gerada

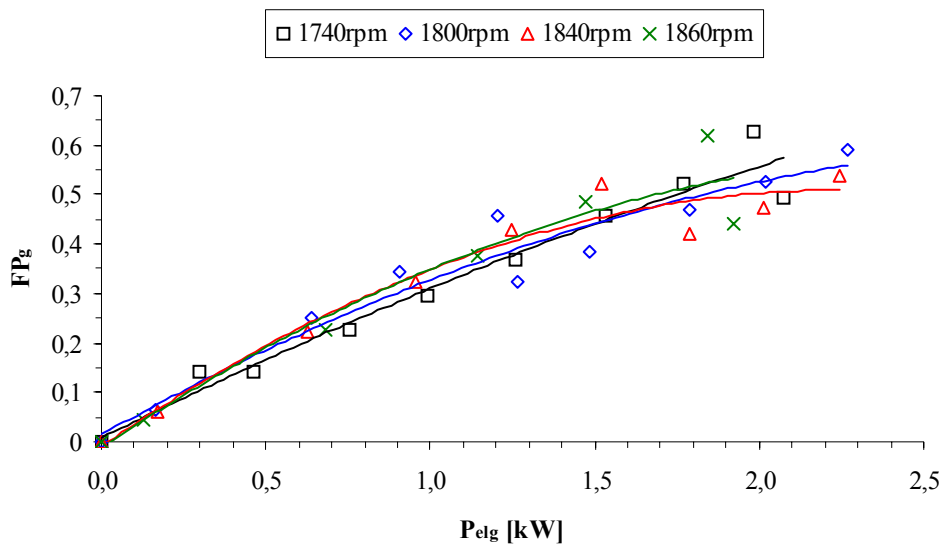


Figura 4.21 – Fator de potência em função da potência elétrica gerada

Das figuras 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19 observa-se que a regulação de tensão do gerador de indução não é satisfatória quando se utiliza o método dos capacitores chaveados. Nas figuras 4.17 e 4.18, que mostram a regulação de tensão para as rotações de 1800 e 1840rpm, verifica-se que houve a necessidade de se chavear mais um banco de capacitores de $10\mu\text{F}$, para que a tensão não assumisse valores muito baixos.

A figura 4.20 mostra a variação da frequência em função da carga elétrica que o gerador estava alimentando. É importante salientar que o gerador de indução só operou com a frequência nominal do sistema, ou seja, 60Hz, nas rotações de 1840 e 1860rpm, nas condições de máximo rendimento do grupo-gerador e quando o gerador está operando a plena carga.

Finalmente, a figura 4.21 mostra a variação do fator de potência em função da carga elétrica. Tal como o motor, o fator de potência torna-se melhor a medida que a carga elétrica aumenta.

4.4.14.3 – Resultados do grupo-gerador para o melhor rendimento

A tabela 4.3 apresenta a vazão, a altura, a potência elétrica gerada, a tensão, a frequência, o fator de potência o rendimento do gerador e da BFT, para o ponto onde

o grupo-gerador apresentou o melhor rendimento, para as rotações de 1740, 1800, 1840 e 1860rpm.

Tabela 4.3 – Pontos onde o grupo gerador operou com máximo rendimento

n_{gg}	η_{gg}	Q_t	H_t	P_{ht}	V_g	f_g	P_{elg}	$\cos(\phi_g)$	η_g	η_t
[rpm]	[%]	[m ³ /s]	[m]	[kW]	[V]	[Hz]	[kW]	[1]	[1]	[1]
1740	53	0,0273	11,8	3,15	227	56,5	1,67	0,470	0,70	0,76
1800	53	0,0273	12,0	3,21	242	58,5	1,70	0,480	0,70	0,76
1840	53	0,0278	12,0	3,26	255	60,0	1,73	0,475	0,71	0,75
1860	53	0,0282	11,7	3,22	224	60,5	1,71	0,480	0,70	0,76

Observando-se a tabela 4.3, verifica-se que o fator de potência da máquina de indução operando como gerador é baixo se comparado ao funcionamento como motor, que, segundo o fabricante é 0,85. Este resultado é razoável, visto que o gerador de indução necessita de mais energia reativa no seu processo de excitação se comparado ao motor, (CHAPALLAZ et al, 1990).

Da tabela 4.1 também se verifica que o rendimento do gerador de indução é menor do que o do motor. Este resultado está coerente com a realidade, visto que o trabalho de (CHAPALLAZ et al, 1990) prevê esta queda no rendimento da máquina. Já o rendimento da BFT foi maior do que o da bomba, o que é razoável, conforme cita o trabalho de (VIANA, 1987).

Verifica-se também que o rendimento do grupo-gerador é superior ao rendimento do grupo moto-bomba. Provavelmente a causa disto é devido ao rendimento da bomba ser inferior ao da BFT, o que não é de se estranhar, visto que (VIANA, 1987) cita em seu trabalho o mesmo fato ocorrido.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE CASO

5.1 – Introdução

Para apresentar a redução dos custos de investimento em microcentrais hidrelétricas utilizando geradores de indução e BFTs, será feita neste capítulo, uma comparação entre o custo de um grupo-gerador síncrono (incluindo acessórios) utilizando uma turbina Michell-Banki, e um grupo-gerador assíncrono utilizando uma BFT. Será utilizado como exemplo o aproveitamento onde se situa a microcentral Boa Esperança, que possui um grupo-gerador do primeiro tipo, operando a sete anos.

5.2 – A microcentral hidrelétrica Boa Esperança

A microcentral Boa Esperança está localizada no município de Delfim Moreira, Distrito do Onça – Estado de Minas Gerais – podendo ser localizada através da carta IBGE número SF-23-Y-B-VI-I, na escala 1:50.000, intitulada Delfim Moreira.

O recurso hídrico disponível para o funcionamento da microcentral Boa Esperança advém do córrego Boa Vista, que é afluente do rio de Bicas pela sua margem direita, que por sua vez é afluente do rio Sapucaí que e está inserido na bacia do Rio Paraná, sub-bacia do Rio Grande.

O sítio da microcentral Boa Esperança está localizado nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 34' 56,4" S e longitude 45° 14' 12" W, a uma altitude de 1.400m.

No trecho de aproveitamento hídrico existe a composição de seguidas cascatas naturais, margeadas por ombreiras de média declividade e afloramentos rochosos, em uma queda com um desnível de 23m e 100m de extensão. A microcentral Boa Esperança é do tipo central a fio d'água.

Atualmente a geração de energia elétrica atende ao consumo de uma propriedade rural constituída pela sede da fazenda, por chalés destinados ao ecoturismo, um restaurante e criação de trutas. Por isso a microcentral é caracterizada como autoprodutora de energia elétrica, conforme o Decreto 2.003 de 10 de setembro de 1996.

Encontram-se na tabela 5.1 os dados principais do aproveitamento e do grupo gerador.

Tabela 5.1 – Dados principais do aproveitamento e dos equipamentos

Dados Principais do Aproveitamento							
Vazão do rio [m ³ /s]		Altura de queda bruta [m]		Canal de adução		Conduto forçado (D = 350mm)	
Medidas em época de cheias				Comprimento [m]	Largura [m]	Comprimento [m]	
1,2		22,50		38	1	43	
Dados dos Equipamentos							
Turbina				Gerador		Regulador	
Tipo Michell-Banki				Tipo Síncrono, trifásico, 220 V		Tipo Eletrônico de carga, microprocessado	
Fabricante Beta Hidroturbinas				Fabricante Bambozzi		Fabricante UNIFEI	
H [m]	Q [m ³ /s]	n [rpm]	η [%]	P _{el} [kW]	n [rpm]	η [%]	-
21,5	0,185	600	70	25	1800	85	

5.3 – Seleção da BFT

Neste trabalho foi utilizado o Método de Chapallaz, pois não foi possível determinar os coeficientes de altura e vazão através do Método de Viana, devido à rotação específica do aproveitamento possuir um valor superior àquela prevista em seu trabalho.

Conhecendo-se os dados do aproveitamento, ou seja, a vazão e a altura disponíveis, escolhe-se o tipo de bomba que mais se adequa ao aproveitamento, através da figura 2.5. Da tabela 5.1, a altura e a vazão são:

$$H_t = 22,5\text{m}$$

$$Q_t = 0,185\text{m}^3/\text{s}$$

Da figura 2.5 verifica-se que a bomba a ser utilizada é do tipo mista.

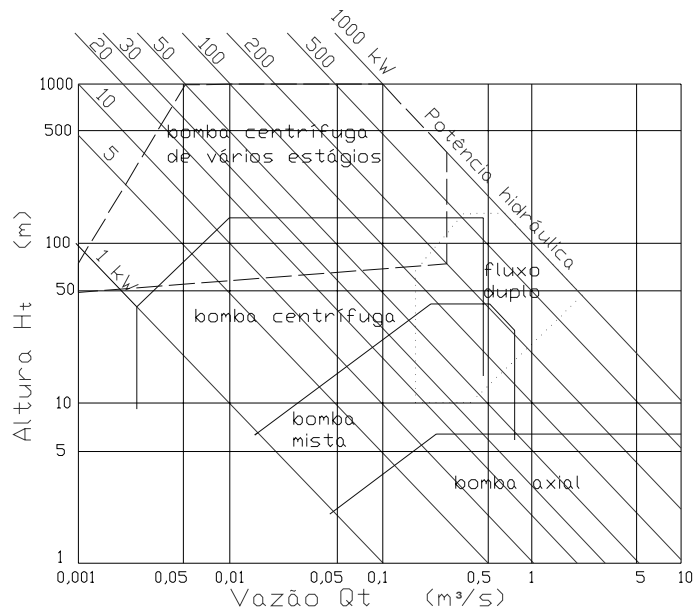


Figura 2.5 – Pré-seleção da BFT, (CHAPALLAZ et al, 1992)

Escolhido o tipo de bomba, o próximo passo é determinar a rotação específica da BFT. Como não se conhece a rotação da bomba, adota-se, inicialmente, a rotação de 1800rpm. A rotação específica da BFT é dada pela equação (2.8) a seguir:

$$n_{qt} = \frac{n \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{3/4}} \quad (2.8)$$

Sabendo-se que $H_t = 22,5\text{m}$, $Q_t = 0,185\text{m}^3/\text{s}$ e que $n = 1800\text{rpm}$, vem:

$$n_{qt} = 75$$

Que é a rotação específica da BFT. Com base nesta, determina-se a rotação específica da bomba. por meio da equação (2.9).

$$n_{qb} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (2.9)$$

Logo:

$$n_{qb} = 84$$

Feito isso, estima-se a vazão da bomba através da equação (2.10).

$$Q_b = \frac{Q_t}{1,3} \quad (2.10)$$

$$Q_b = 0,142\text{m}^3/\text{s}$$

Sabendo-se que $n_{qAb} = 84$, $Q_b = 0,142\text{m}^3/\text{s}$, estima-se o rendimento da bomba por através da figura 2.6.

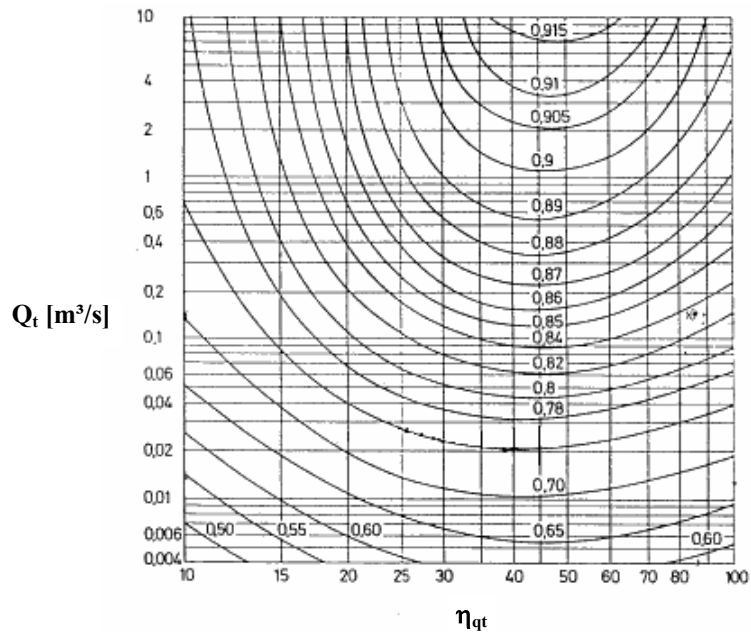


Figura 2.6 – Máximo rendimento da bomba em função da rotação específica e da vazão, (CHAPALLAZ et al, 1992)

Logo:

$$\eta_b = 83,5\%$$

Sabendo que $n_{qb} = 84$ e que $\eta_b = 83,5\%$, determinam-se os coeficientes de altura e vazão através das figuras 2.7 e 2.8.

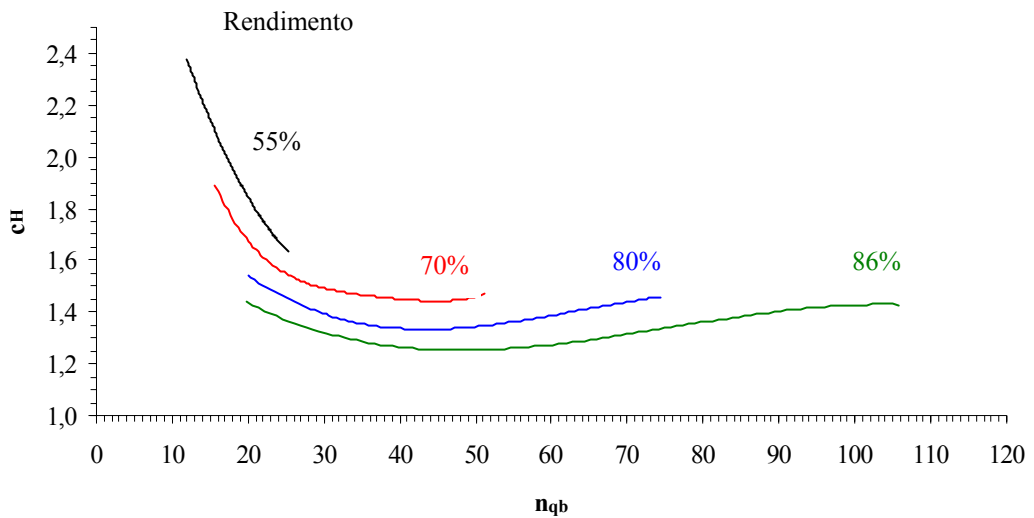


Figura 2.7 – Coeficiente de altura, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)

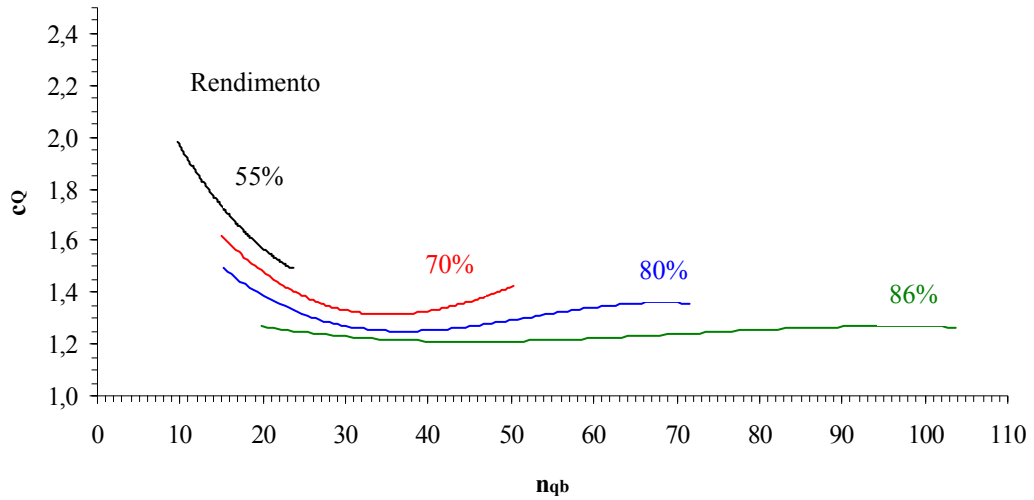


Figura 2.8 – Coeficiente de vazão, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)

Assim:

$$c_H = 1,41$$

$$c_Q = 1,32$$

De posse desses valores e sabendo que $H_t = 22,5$ e que $Q_t = 0,185\text{m}^3$, calcule-se a altura e a vazão da bomba, por meio das equações (2.6) e (2.7), para $n = 1800\text{rpm}$.

$$H_b = \frac{H_t}{c_H} \quad (2.6)$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{c_Q} \quad (2.7)$$

Logo:

$$H_b = 15,9\text{m}$$

$$Q_b = 0,140\text{m}^3/\text{s}$$

Conhecida a altura e a vazão da bomba para $n = 1800\text{rpm}$ calcula-se a altura e a vazão para a rotação que consta no catálogo do fabricante escolhido. Para este estudo a velocidade nominal da bomba era $n_n = 1750\text{rpm}$. Aplicando a altura, a vazão e a rotação nominal da bomba nas equações (2.4) e (2.5) a seguir:

$$H_{ob} = \left(\frac{n_{ob}}{n_b} \right)^2 \cdot H_b \quad (2.4)$$

$$Q_{ob} = \frac{n_{ob}}{n_b} \cdot Q_b \quad (2.5)$$

Logo:

$$H_b = 15,0\text{m}$$

$$Q_b = 0,136\text{m}^3/\text{s}$$

Segundo o catálogo do fabricante, neste ponto a bomba opera com rendimento igual à 79% que será o mesmo rendimento da BFT.

Um ponto que chama a atenção é a velocidade de operação do gerador de indução que deverá estar compreendida entre 1840rpm e 1860rpm, para que a máquina gere com a frequência nominal do sistema, ou seja, 60Hz. Esta velocidade deve ser determinada no momento em que a microcentral for posta em operação devido à incerteza daquela velocidade. Segundo (CALDAS, 1980), esta velocidade pode ser determinada de posse da corrente nominal da máquina, da velocidade síncrona e da resistência do rotor. Os dois primeiros parâmetros são dados pelo fabricante, mas o terceiro depende de ensaios no motor. Portanto é mais conveniente determinar a velocidade de operação do gerador por meio de um ajuste no campo, o que não implicará grandes erros na altura e na vazão da BFT, visto que estes valores se mostraram muito próximos daqueles referentes à rotação nominal da bomba, de acordo com os resultados experimentais do grupo-gerador vistos no capítulo 4.

A fim de se reduzir os efeitos da cavitação, deve-se utilizar a equação (2.14) para o cálculo da altura geométrica de sucção.

$$H_s = 10 - 0,00122 \cdot A - 0,025 \cdot (1 + 10^{-4} \cdot n_{qA}^2) \cdot H_t \quad (2.14)$$

Para a equação (2.14), a rotação específica é dada por:

$$n_{qA} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{(g \cdot H_t)^{3/4}} \cdot 10^3 \quad (2.3)$$

Sabendo que $n_t = 1800\text{rpm}$, $Q_t = 0,185\text{m}^3/\text{s}$, $H_t = 22,5\text{m}$ e $A = 1400\text{m}$ vem:

$$n_{qA} = 226$$

Logo:

$$H_s = 4,9\text{m}$$

Também pode ser utilizada a equação (2.15) a seguir, proposta no trabalho de (CHAPALLAZ et al, 1992).

$$H_s = \sigma_t \cdot H_t \quad (2.15)$$

Onde o coeficiente de cavitação de Thoma pode ser determinado através da figura 2.10. O cálculo deste coeficiente depende da rotação específica da BFT, no Sistema Técnico, dada pela equação (2.8) a seguir:

$$n_{qt} = \frac{n_t \cdot \sqrt{Q_t}}{H_t^{3/4}} \quad (2.8)$$

Aplicando os dados da BFT, vem:

$$n_{qt} = 75$$

Observando a figura (2.10) verifica-se que o coeficiente de cavitação da BFT ocupa uma área que gera uma incerteza na sua determinação. Visto que o rotor da bomba é semelhante ao rotor Francis (VIANA, 1987), determinou-se o coeficiente de cavitação de Thoma utilizando a curva referente às turbinas Francis.

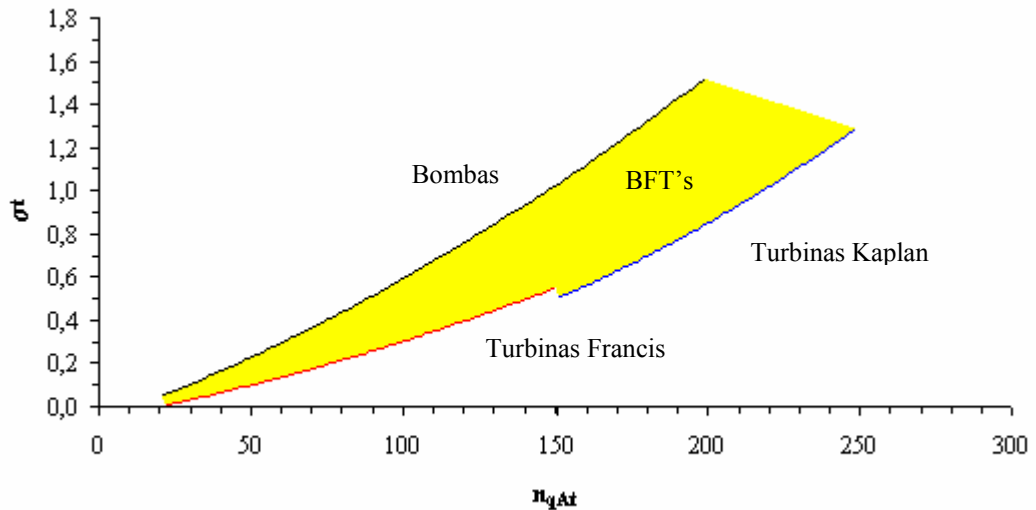


Figura 2.10 – Coeficiente de cavitação de Thoma, adaptado de (CHAPALLAZ et al, 1992)

Logo:

$$\sigma_t = 0,2$$

Portanto:

$$H_s = 4,5\text{m}$$

Verifica-se que os resultados obtidos com as equações (2.15) e (2.16) são bem próximos.

5.4 – Seleção do gerador de indução e do banco de capacitores

A seleção do gerador de indução foi feita através do método proposto por (CHAPALLAZ et al, 1990) com base em curvas obtidas experimentalmente. Conhecendo a potência de eixo da máquina primária, neste caso uma BFT, é possível selecionar um motor de indução que irá operar como gerador. A potência de eixo da BFT é dada pela equação (5.1) a seguir:

$$P_{et} = g \cdot \rho \cdot Q_t \cdot H_t \cdot \eta_t \cdot 10^{-3} \quad (5.1)$$

Onde:

P_{et} – potência de eixo da BFT [kW];

g – aceleração local da gravidade [m/s²];

ρ – massa específica da água [kg/m³];

Q_t – vazão da BFT [m³/s];

H_t – altura da BFT [m];

η_t – rendimento da BFT [1].

Sabendo que $g = 9,785\text{m/s}^2$ (1400m de altitude), $\rho = 1000\text{kg/m}^3$, $Q_t = 0,185\text{m}^3/\text{s}$, $H_t = 22,5\text{m}$ e $\eta_t = 0,79$, vem:

$$P_{et} = 32,2\text{kW}$$

Conhecido o valor da potência de eixo da BFT, determina-se a relação P_{et}/P_n através da figura 3.6 e calcula-se a potência nominal do motor que será utilizado como gerador, através da equação (3.7).

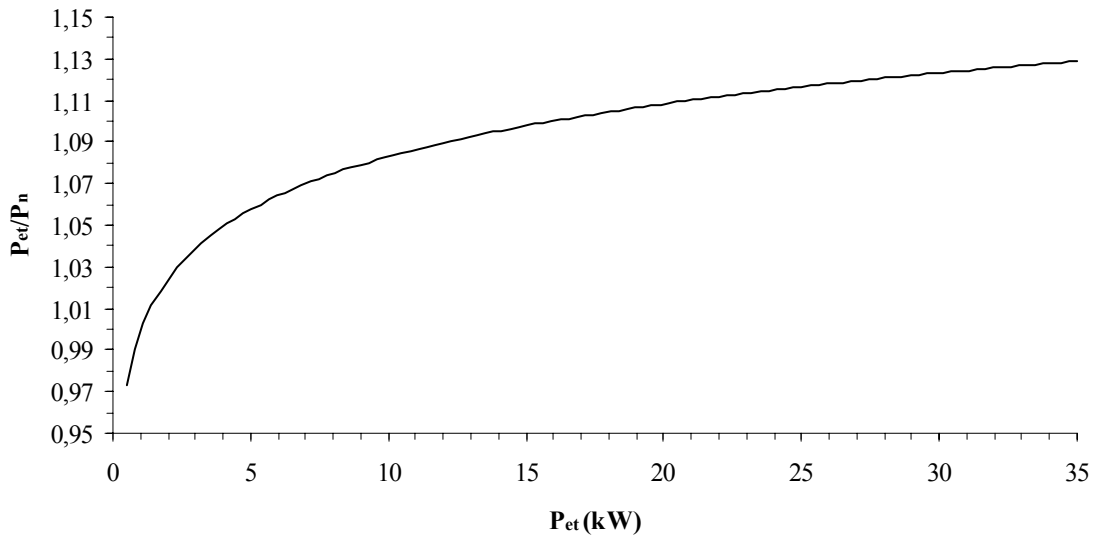


Figura 3.6 – Pré-seleção do motor para ser utilizado como gerador, adaptado (CHAPALLAZ et al, 1990)

$$P_n = \frac{P_{et}}{\frac{P_{et}}{P_n}} \quad (3.7)$$

Logo:

$$P_{nm} = 28,6\text{kW}$$

Como não existe esta potência padronizada nos catálogos dos fabricantes, escolhe-se um motor com potência nominal imediatamente superior. Assim:

$$P_{nm} = 30\text{kW}$$

Segundo uma consulta feita no catálogo de um fabricante, o rendimento e o fator de potência a plena carga do motor selecionado são:

$$\eta_m = 0,917$$

$$\cos(\phi_m) = 0,85$$

De posse desses dados e sabendo-se que $P_{nm} = 30\text{kW}$, determina-se a relação $\text{sen}(\phi_g)/\text{sen}(\phi_m)$, através da figura 3.8.

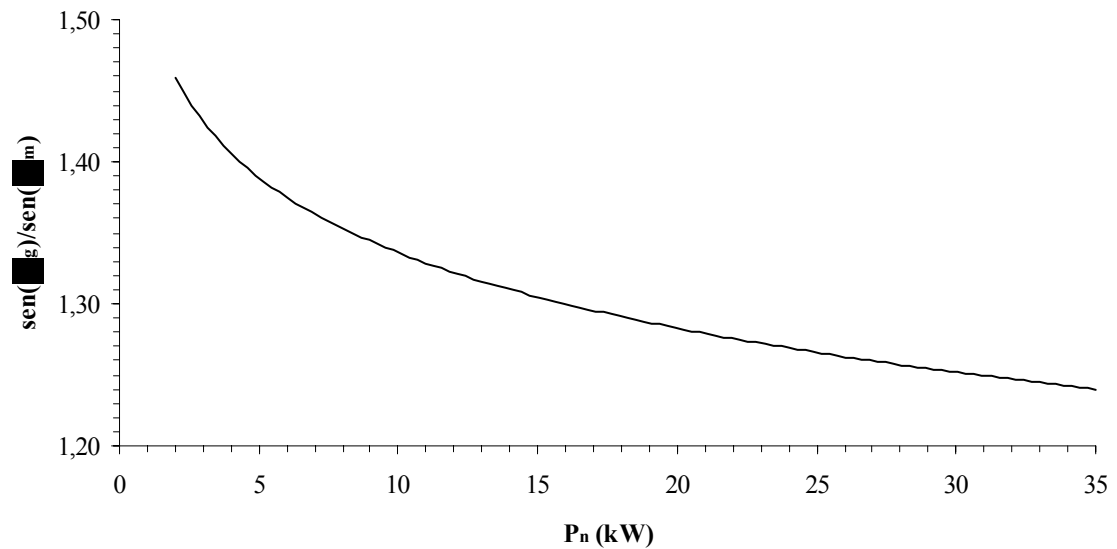


Figura 3.8 - Relação experimental entre $\text{sen}(\phi_g)$ do gerador e $\text{sen}(\phi_m)$ do motor em função da potência nominal, adaptado de CHAPALLAZ et al (1990)

Assim:

$$\frac{\text{sen}(\phi_g)}{\text{sen}(\phi_m)} = 1,25$$

Considerando a potência nominal e o rendimento a plena carga do motor e aplicando-se estes valores na equação (3.8) a seguir, calcula-se a potência elétrica absorvida pelo motor. Portanto:

$$P_{elm} = \frac{P_n}{\eta_m} \quad (3.8)$$

Logo:

$$P_{elm} = 32,7\text{kW}$$

Com base no fator de potência do motor, determina-se o ângulo de fase da máquina. Logo:

$$\phi_m = 31,8^\circ$$

Conhecido este ângulo, calcula-se a energia reativa do motor de indução através da equação (3.9) a seguir:

$$Q_m = P_{elm} \cdot \tan(\phi_m) \quad (3.9)$$

Logo:

$$Q_m = 20,3\text{kVAr}$$

De posse da relação $\sin(\phi_g)/\sin(\phi_m)$ e a energia reativa da máquina operando como motor, calcula-se a energia reativa da máquina operando como gerador através da equação (3.10).

$$Q_g = \frac{\sin(\phi_g)}{\sin(\phi_m)} \cdot Q_m \quad (3.10)$$

$$Q_g = 25,3\text{kVAr}$$

Considerando que será ligado um banco de capacitores em paralelo com o gerador assíncrono, que a tensão de linha é igual à 220V, calcula-se a capacitância através da equação (3.11), para a frequência de 50Hz.

$$C = \frac{Q_g}{3 \cdot V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \cdot 10^9 \quad (3.11)$$

$$C = 555\mu\text{F/fase}$$

Aplicando-se o resultado na equação (3.12) a seguir, obtém-se a capacitância para $f = 60\text{Hz}$.

$$C_{60} = C_{50} \cdot \left(\frac{50}{60}\right)^2 \quad (3.12)$$

$$C_{60} = 385\mu\text{F/fase}$$

Que é a capacitância necessária à auto-excitação do gerador assíncrono operando à plena carga. A potência elétrica que gerada pela máquina de indução selecionada é dada pela equação (3.13) a seguir:

$$P_{\text{elg}} = \frac{\cos(\phi_g)}{\eta_g \cdot \cos(\phi_m)} \cdot P_n \quad (3.13)$$

O fator de potência do gerador de indução pode ser calculado conhecendo-se a relação experimental relação $\text{sen}(\phi_g)/\text{sen}(\phi_m)$ da figura 3.8. Para o motor selecionado:

$$\frac{\text{sen}(\phi_g)}{\text{sen}(\phi_m)} = 1,25$$

Sabendo-se que $\cos(\phi_m) = 0,85$ vem:

$$\phi_m = 31,8^\circ$$

Logo:

$$\text{sen}(\phi_m) = 0,53$$

Portanto:

$$\text{sen}(\phi_g) = \frac{\text{sen}(\phi_g)}{\text{sen}(\phi_m)} \cdot \text{sen}(\phi_m) = 1,25 \cdot 0,53 = 0,66$$

Assim:

$$\phi_g = 41,5^\circ$$

Daí:

$$\cos(\phi_g) = 0,75$$

Sabendo que $\cos(\phi_g) = 0,75$, $\eta_m = 0,917$, $\cos(\phi_m) = 0,85$ e que $P_n = 30\text{kW}$, calcula-se a potência elétrica do gerador através da equação (3.13) a seguir:

$$P_{elg} = \frac{\cos(\phi_g)}{\eta_g \cdot \cos(\phi_m)} \cdot P_n \quad (3.13)$$

Portanto:

$$P_{elg} = 28,9\text{kW}$$

A potência de eixo necessária ao acionamento do gerador é:

$$P_{eg} = P_{elg} + P_n \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (3.14)$$

Assim:

$$P_{eg} = 31,6\text{kW}$$

Logo seu rendimento a plena carga é:

$$\eta_g = \frac{P_{elg}}{P_{eg}} \quad (3.15)$$

$$\eta_g = 0,914$$

Sabendo que $P_{et} = 32,2\text{kW}$ e resolvendo a equação (3.15) para P_{elg} , vem:

$$P_{elg} = 29,44\text{kW}$$

Esta potência não irá sobrecarregar o gerador de indução, pois seu fator de serviço é igual à 1,15. Portanto, a máxima potência que poderá ser gerada pela máquina de indução, sem perigo de sobreaquecimento, é:

$$P_{elg} = 1,15 \cdot 28,9$$

$$P_{elg} = 33,9\text{kW}$$

Comparando a potência elétrica gerada pela máquina de indução com a aquela gerada pela máquina síncrona, verifica-se que a primeira gera 4,44kW a mais que a segundo. Isto é devido à maior potência entregue ao eixo do gerador de indução pela BFT, visto que esta possui um tubo de sucção que permite maior aproveitamento da altura de queda bruta e da energia cinética, o que não acontece com a turbina Michell-Banki, devido à ausência do tubo de sucção.

5.5 – Comparação entre os custos dos equipamentos

Para o levantamento de custos dos equipamentos considerou-se, sendo novo, o grupo gerador com turbina Michell-Banki e o mesmo para a BFT e o gerador assíncrono. Na tabela 4.2 são encontrados os equipamentos necessários ao funcionamento dos grupos geradores e seus respectivos custos.

Tabela 5.2 – Comparação entre os custos dos equipamentos

GRUPO GERADOR SÍNCRONO		GRUPO GERADOR ASSÍNCRONO	
Equipamento	Custo [R\$]	Equipamento	Custo [R\$]
Turbina Michell-Banki	12.030,00	Bomba centrífuga e acessórios (luva e protetor de acoplamento)	2.930,00
Gerador trifásico, tipo BEL, eletrônico, sem escovas, 220V, 1800rpm, 60Hz, 30kW	5.250,00	Motor trifásico, 220V, 1800rpm, 60Hz, 30kW, adaptado com banco de capacitores	3.220,00
Painel de controle com instrumentos, controlador eletrônico de carga	2.620,00	Painel de controle com instrumentos, controlador eletrônico de carga	2.620,00
Válvula borboleta (φ300)	950,00	Válvula borboleta (φ300)	700,00
Custo total (R\$)	20.600,00	Custo total (R\$)	9.470,00
Custo total (US\$)	6.800,00*	Custo total (US\$)	3.125,00*

* US\$ 1,00 = R\$ 3,04 (junho/2004)

A tabela 5.2, portanto, demonstra que o painel de controle, o regulador eletrônico de carga, a válvula borboleta são necessários aos dois empreendimentos e possuem custos iguais. O que mais chama a atenção é o custo da turbina Michell-Banki, que está em torno de quatro vezes maior que o da bomba. No caso da comparação do motor assíncrono e do gerador síncrono, mesmo com a adaptação do banco de capacitores para a excitação da máquina, o custo do motor assíncrono é 1,6 vezes menor do que o gerador síncrono. No total, o custo do grupo gerador assíncrono é 2,2 vezes menor que o grupo gerador síncrono.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos em laboratório mostraram que o grupo-gerador funcionou satisfatoriamente, apesar da má regulação de tensão do gerador que pode ser melhorada utilizando-se um método mais adequado. Uma boa opção seria a utilização do controlador de carga, já que este, além de manter a tensão no nível desejado, controla a rotação e mantém o grupo operando no ponto de melhor rendimento, já que o gerador de indução não “enxerga” a variação na carga. Dos resultados também se constata a necessidade de se operar com 1840rpm, já que esta rotação é aquela onde o grupo-gerador operou com a frequência nominal do sistema nacional, ou seja, 60Hz e também onde a potência elétrica gerada foi maior apesar do rendimento ter sido um ponto percentual menor em relação às outras rotações. O único ponto fraco do gerador de indução é o seu fator de potência baixo, que ficou em torno de 0,5, em relação ao gerador síncrono que possui valores na ordem de 0,8. No entanto esta desvantagem pode ser compensada pelo baixo custo do motor de indução.

O estudo de caso mostrou que, a utilização de BFTs, em aproveitamentos de pequeno porte, mostra-se bastante atrativa em função do seu baixo custo se comparada com a turbina Michell-Banki. Além disso, numa comparação com turbinas convencionais do tipo Francis e Pelton, essa diferença de custo seria bem maior. Aliada ao baixo custo, a bomba apresenta um bom funcionamento quando opera, em reverso, como turbina (VIANA, 2002).

Outra vantagem da BFT em relação à turbina Michell-Banki é a utilização do tubo de sucção, que acarreta um aumento na altura, e, conseqüentemente um ganho na potência gerada.

A utilização do motor de indução como gerador num sistema isolado também mostra-se interessante, principalmente devido ao baixo custo se comparado ao gerador síncrono. Também tem a vantagem de ser uma máquina mais robusta e praticamente isenta de manutenção, devido à ausência de escovas. Estas vantagens podem ser ainda maiores se o gerador de indução estiver interligado a um grande

sistema, visto que, neste caso, a máquina poderá ser excitada com a própria energia reativa da rede e poderá ser dispensado o controle da tensão, já que esta será determinada pelo sistema. A frequência também se manterá em seu valor nominal, ou seja, 60Hz. É importante salientar que o gerador de indução, para fornecer energia reativa ao sistema, deve operar acima da sua velocidade síncrona.

O estudo de caso também mostrou que a substituição da turbina Michell-Banki, acoplada a um gerador síncrono, por uma BFT acionando um gerador assíncrono é uma alternativa economicamente viável, aliada ao bom funcionamento desse último, visto que a diferença entre os custos de aquisição dos equipamentos foi da ordem de 50%.

Como sugestão para futuros trabalhos, seria interessante a realização de testes no sentido de se avaliar a cavitação em BFT's, visto que (VIANA, 1987), em seu trabalho, utiliza a equação para turbinas Francis no cálculo da altura de sucção e (CHAPALLAZ et al, 1992) mostra que há um intervalo de incerteza na determinação do coeficiente de cavitação de Thoma para as BFT's.

Sugere-se também o estudo do controle da rotação da BFT através de uma válvula borboleta automatizada, a fim de evitar o disparo da máquina em caso de rejeição de carga.

Em vista da viabilidade técnica e econômica do grupo-gerador utilizando BFT's e geradores de indução demonstrada neste trabalho, espera-se que essa tecnologia seja mais utilizada no país em aproveitamentos com potencial abaixo de 50kW. Seria uma alternativa interessante para o Governo Federal, ao invés de construir uma rede de distribuição de energia, analisar e subsidiar a implantação desta tecnologia de baixo custo, através do seu programa de eletrificação rural, Luz Para Todos, em áreas onde existam potenciais hidráulicos disponíveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASSET, E. D.; POTTER, F. M; **Capacitive Excitation of Induction Generators.** Transactions AIEE; Vol. 54; pp. 540 – 545; 1935.

BERNARDES, D. F., RODRIGUES, J. C. G., VIANA, A. N. C., TIAFO FILHO, G. L., **Turbina Michell - Banki e seu Regulador de Carga para Microcentrais Hidroelétricas.** 2ª. Reunião do Grupo de Trabalho em Hidromecânica , Divisão Latino Americana da AIPH, Ilha Solteira - SP, pp 271 - 285, 15 a 17/09/1993.

BRENNEN, M. B.; ABBONDANT, A.; **Static Exciters for Induction Generators.** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-13, no. 5, pp 422 – 428, September, 1977.

BURIAN, Y.; **Compensação de Tensão em Gerador de Indução com Capacitores em Ligação “Shunt” Longo.** 4º Congresso Brasileiro de Automática, Campinas – SP, pp 310 – 314, 1982.

CALDAS, F. P.; **Um Estudo do Gerador de Indução Auto-excitado e Aplicações.** Dissertação de Mestrado; UFRJ; Rio de Janeiro; Agosto; 1987.

CHAKRABORTY, C.; BHADRA, S.; CHATTOPADHYAY, A. K.; **Excitation Requirements for Stand Alone Three Phase Induction Generator.** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, Issue: 4, Pages: 358 – 365, December, 1998.

CHAN, T. F.; **Analysis of Self-excited Induction Generators Using an Iterative Method.** IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10 , Issue: 3 , Pages: 502 – 507, September, 1995

CHAPALLAZ J. M.; GHALI, J. D.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; **Manual on Motors Used as Generators**; MHPG Series; Vol. 10; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany; 1990.

CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; **Manual on Pumps Used as Turbines**; MHPG Series; Vol. 11; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany, 1992.

CHAPMAN, S. J.; **Electric Machinery Fundamentals**. 2nd ed., McGraw-Hill, Boston, 1991.

COGO, J. R.; OLIVEIRA, J. C.; ABREU, J. P. G; **Ensaio de Máquinas de Indução**. Apostila. EFEI, Itajubá, 1984.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 41. **Field Acceptance Tests to Determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump-Turbines**. 3rd ed., Switzerland, 1991.

JABRI, A.; ALOLAH, A. I.; **Capacitance Requirement for Isolated Self-excited Induction Generator**, IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 137, Issue: 3, Pages: 154 – 159, May, 1990.

NOGUEIRA, F. J. H.; **Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas**. Trabalho de Pesquisa; Departamento de Mecânica; EFEI; Itajubá, Março, 1990.

RESENDE, J. T; **Operação Isolada e Interligada do Gerador de Indução**. Dissertação de Mestrado; EFEI; Itajubá; Junho; 1994.

SANTOS, A.H.M. ; BAJAY, S.V. **O desenvolvimento Nacional e as Pequenas Centrais Hidrelétricas - uma Visão Histórica**. Seminário sobre a História da Energia, São Paulo - SP, 1986.

TIAGO FILHO, G. L., **Desenvolvimento Teórico e Experimental para Dimensionamento de Turbina Hidráulica Michell - Banki**. Dissertação de Mestrado, EFEI - Itajubá, p. 206, Outubro, 1987.

TIAGO FILHO, G. L.; **O Papel das PCH's no Atual Contexto Institucional Brasileiro**. Brasil Hidro Termo, São Paulo – SP, 29 a 30/03/2000.

VIANA, A.N.C.; BERNARDES, D.F. , RODRIGUES, J. C. **Reguladores de Velocidade para Microturbinas Hidráulicas**. V Seminário de Pesquisa da EFEI, Itajubá - MG, pp 1166-168, 22 a 26/10/1990.

VIANA, A. N. C.. **Pequenas Centrais Hidrelétricas no Meio Rural**. XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, pp 135-166, 21 a 25/07/1997.

VIANA, A.N.C.; **Bombas de Fluxo Operando como Turbinas – Por Que Usá-las?** PCH Notícias & SHP News; Ano 4; Num. 12; CERPCH; Itajubá; Nov.-Dez.-Jan.; 2002.

VIANA, A.N.C.; **Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas**; Dissertação de Mestrado; EFEI; Itajubá; Dezembro, 1987.

WAGNER, C. F.. **Self – excitation of Induction Motors**. AIEE Transactions on Electrical Engineering, Vol. 58, pp 47 – 51, February, 1939.

www.ieee-kc.org acessado em 19/11/2004.

ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS NO GRUPO MOTO-BOMBA, NO MOTOR, NA BFT E NO GERADOR DE INDUÇÃO

Tabela I.1 – Resultados do ensaio no grupo moto-bomba para $n_b = 1740\text{rpm}$

Medidor	Valores medidos			Valores calculados	
	H_b	Q_b	P_{elm}	P_h	η_{mb}
	[m]	[m ³ /s]	[kW]	[kW]	[1]
2"	7,420	0,000000	1,14583	0,000000	0,0000000
	7,459	0,000459	1,15116	0,033441	0,0290498
	7,506	0,000936	1,13708	0,068634	0,0603600
	7,642	0,002154	1,19468	0,160844	0,1346331
	7,722	0,003540	1,27799	0,267121	0,2090167
	7,718	0,004142	1,28998	0,312391	0,2421675
	7,650	0,005622	1,38109	0,420291	0,3043174
4"	7,395	0,007170	1,47121	0,518190	0,3522212
	7,143	0,008291	1,51967	0,578768	0,3808509
	6,797	0,009750	1,58970	0,647661	0,4074121
	6,414	0,011158	1,64096	0,699375	0,4261989
	5,865	0,012897	1,68597	0,739314	0,4385106
	5,217	0,014623	1,71567	0,745555	0,4345569
	4,051	0,016656	1,72710	0,659426	0,3818122
	3,782	0,016656	1,71477	0,615582	0,3589877

**Tabela I.2 – Aplicação das Leis de Afinidades para
 $n_b = 1800\text{rpm}$, 1840rpm e 1860rpm**

Valores calculados					
$n_b = 1800\text{rpm}$		$n_b = 1840\text{rpm}$		$n_b = 1860\text{rpm}$	
Q_{2b}	H_{2b}	Q_{2b}	H_{2b}	Q_{2b}	H_{2b}
[m ³ /s]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m ³ /s]	[m]
0,000475	7,982	0,000485	8,341	0,000490	8,523
0,000968	8,033	0,000989	8,394	0,001000	8,577
0,002228	8,178	0,002278	8,546	0,002303	8,732
0,003662	8,264	0,003743	8,635	0,003784	8,824
0,004285	8,259	0,004380	8,631	0,004428	8,819
0,005816	8,187	0,005945	8,555	0,006010	8,742
0,007417	7,914	0,007582	8,269	0,007664	8,450
0,008577	7,644	0,008767	7,988	0,008863	8,162
0,010086	7,274	0,010310	7,601	0,010422	7,767
0,011543	6,864	0,011799	7,172	0,011928	7,329
0,013342	6,276	0,013638	6,559	0,013786	6,702
0,015127	5,583	0,015463	5,834	0,015631	5,961
0,017230	4,335	0,017613	4,530	0,017805	4,629
0,017230	4,047	0,017613	4,229	0,017805	4,322

Tabela I.3 – Resultado dos ensaios no motor de indução

Valores medidos				Valores calculados
Ensaio a vazio				
V_0	I_0	W_1	W_2	W_0
[V]	[A]	[W]	[W]	[W]
258	8,0	1240	-720	520
240	6,4	960	-560	400
220	5,2	720	-440	280
200	4,4	560	-360	200
180	3,7	440	-280	160
160	3,2	360	-200	160
140	2,7	280	-160	120
120	2,4	200	-120	80
100	2,1	160	-80	80
80	1,7	100	-40	60
60	1,4	80	0	80
40	1,0	40	0	40
20	1,0	20	0	20
15	1,3	20	0	20
Ensaio com o rotor travado				
V_{travado}	I_{travado}	W_1	W_2	W_{travado}
[V]	[A]	[W]	[W]	[W]
37	9,0	360	80	440

Tabela I.4 – Resultados dos ensaios na BFT, para $n_{gg} = 1740\text{rpm}$

Valores medidos					Valores calculados					
n_{gg}	Δh	h_2	h_1	x	Q_t	$(v_{1t}^2 - v_{3t}^2)/2g$	$p_1/\rho g$	z	H_t	P_{ht}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kW]
1744	0,053	1,275	0,910	0,7	0,019167	0,887	3,936	0,820	5,643	1,058
1740	0,055	1,285	0,900	0,123	0,019525	0,920	4,198	1,397	6,515	1,245
1741	0,055	1,325	0,860	0,123	0,019525	0,920	5,246	1,397	7,563	1,445
1740	0,075	1,345	0,835	0,123	0,022801	1,255	5,833	1,397	8,485	1,893
1742	0,080	1,380	0,805	0,123	0,023549	1,339	6,687	1,397	9,423	2,171
1741	0,090	1,410	0,775	0,123	0,024977	1,506	7,473	1,397	10,376	2,536
1743	0,105	1,445	0,745	0,123	0,026978	1,757	8,327	1,397	11,481	3,031
1742	0,115	1,475	0,710	0,123	0,028234	1,924	9,176	1,397	12,497	3,453
1740	0,120	1,505	0,680	0,123	0,028841	2,008	9,962	1,397	13,367	3,772
1739	0,130	1,540	0,640	0,123	0,030019	2,175	10,942	1,397	14,514	4,263

Tabela I.5 – Resultados dos ensaios no gerador, para $n_{gg} = 1740\text{rpm}$

Valores medidos					Valores calculados			
V_g	f_g	C	I_{Ag}	I_{Sg}	P_{elg}	S_g	$\cos(\phi_g)$	η_{gg}
[V]	[Hz]	[μF]	[A]	[A]	[kW]	[kVA]	[1]	[1]
248	57,8	50	0,0	7,9	0,000	3,393	0,000	0,000
216	57,6	40	0,8	5,7	0,299	2,133	0,140	0,240
242	57,4	50	1,1	7,8	0,461	3,269	0,141	0,319
242	57,4	50	1,8	8,0	0,754	3,353	0,225	0,399
239	57,2	50	2,4	8,1	0,994	3,353	0,296	0,458
234	57,0	50	3,1	8,4	1,256	3,405	0,369	0,495
227	56,5	50	3,9	8,5	1,533	3,342	0,459	0,506
222	56,2	50	4,6	8,8	1,769	3,384	0,523	0,512
212	55,7	50	5,4	8,6	1,983	3,158	0,628	0,526
230	55,8	60	5,2	10,5	2,072	4,183	0,495	0,486

Tabela I.6 – Resultados dos ensaios na BFT, para $n_{gg} = 1800\text{rpm}$

Valores medidos					Valores calculados					
n_{gg}	Δh	h_2	h_1	x	Q_t	$(v_{1t}^2 - v_{3t}^2)/2g$	$p_1/\rho g$	z	H_t	P_{ht}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kW]
1800	0,050	1,270	0,920	0,124	0,018617	0,837	3,742	1,396	5,975	1,088
1802	0,060	1,290	0,895	0,124	0,020394	1,004	4,329	1,396	6,729	1,343
1801	0,070	1,330	0,855	0,124	0,022028	1,171	5,377	1,396	7,944	1,712
1803	0,075	1,360	0,825	0,124	0,022801	1,255	6,163	1,396	8,814	1,966
1805	0,085	1,395	0,790	0,124	0,024273	1,422	7,080	1,396	9,898	2,351
1805	0,095	1,425	0,765	0,124	0,025662	1,590	7,803	1,396	10,789	2,709
1804	0,105	1,450	0,730	0,124	0,026978	1,757	8,584	1,396	11,737	3,098
1802	0,115	1,490	0,695	0,122	0,028234	1,924	9,569	1,398	12,891	3,561
1800	0,125	1,520	0,660	0,122	0,029436	2,092	10,418	1,398	13,908	4,006
1802	0,130	1,560	0,620	0,122	0,030019	2,175	11,466	1,398	15,039	4,418

Tabela I.7 – Resultados dos ensaios no gerador, para $n_{gg} = 1800\text{rpm}$

Valores medidos					Valores calculados			
V_g	f_g	C	I_{Ag}	I_{Sg}	P_{elg}	S_g	$\cos(\phi_g)$	η_{gg}
[V]	[Hz]	[μF]	[A]	[A]	[kW]	[kVA]	[1]	[1]
239	60,0	40	0,0	6,2	0,000	2,567	0,000	0,000
234	59,6	40	0,4	6,2	0,162	2,513	0,065	0,121
230	59,4	40	1,6	6,4	0,637	2,550	0,250	0,372
227	59,1	40	2,3	6,7	0,904	2,634	0,343	0,460
217	59,1	40	3,2	7,0	1,203	2,631	0,457	0,512
252	59,5	50	2,9	9,0	1,266	3,928	0,322	0,467
245	59,0	50	3,5	9,1	1,485	3,862	0,385	0,479
240	58,4	50	4,3	9,2	1,787	3,824	0,467	0,502
233	58,0	50	5,0	9,5	2,018	3,834	0,526	0,504
226	57,6	50	5,8	9,8	2,270	3,836	0,592	0,514

Tabela I.8 – Resultados dos ensaios na BFT, para $n_{gg} = 1840\text{rpm}$

Valores medidos					Valores calculados					
n_{gg}	Δh	h_2	h_1	x	Q_t	$(v_{1t}^2 - v_{3t}^2)/2g$	$p_1/\rho g$	z	H_t	P_{ht}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kW]
1843	0,055	1,280	0,910	0,125	0,019525	0,920	4,004	1,395	6,319	1,207
1842	0,060	1,305	0,880	0,125	0,020394	1,004	4,722	1,395	7,121	1,421
1841	0,075	1,340	0,850	0,125	0,022801	1,255	5,576	1,395	8,226	1,835
1842	0,085	1,370	0,815	0,125	0,024273	1,422	6,425	1,395	9,242	2,195
1846	0,090	1,400	0,785	0,125	0,024977	1,506	7,211	1,395	10,112	2,471
1845	0,105	1,430	0,755	0,125	0,026978	1,757	7,997	1,395	11,149	2,943
1,845	0,120	1,490	0,695	0,125	0,028841	2,008	9,569	1,395	12,972	3,661
1844	0,130	1,520	0,660	0,124	0,030019	2,175	10,418	1,396	13,989	4,109
1842	0,135	1,555	0,630	0,124	0,030591	2,259	11,272	1,396	14,927	4,468

Tabela I.9 – Resultados dos ensaios no gerador, para $n_{gg} = 1840\text{rpm}$

Valores medidos					Valores calculados			
V_g	f_g	C	I_{Ag}	I_{Sg}	P_{elg}	S_g	$\cos(\phi_g)$	η_{gg}
[V]	[Hz]	[μF]	[A]	[A]	[kW]	[kVA]	[1]	[1]
249	61,2	40	0,0	6,7	0,000	2,890	0,000	0,000
246	61,1	40	0,4	6,7	0,170	2,855	0,060	0,120
242	60,9	40	1,5	6,8	0,629	2,850	0,221	0,343
240	60,7	40	2,3	7,1	0,956	2,951	0,324	0,436
232	60,3	40	3,1	7,2	1,246	2,893	0,431	0,504
225	60,0	40	3,9	7,5	1,520	2,923	0,520	0,516
252	60,0	50	4,1	9,7	1,790	4,234	0,423	0,489
247	59,9	50	4,7	9,9	2,011	4,235	0,475	0,489
240	59,3	50	5,4	10,0	2,245	4,157	0,540	0,502

Tabela I.10 – Resultados nos ensaios da BFT, para $n_{gg} = 1860\text{rpm}$

Valores medidos					Valores calculados					
n_{gg}	Δh	h_2	h_1	x	Q_t	$(v_{1t}^2 - v_{3t}^2)/2g$	$p_1/\rho g$	z	H_t	P_{ht}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kW]
1864	0,054	1,283	0,900	0,700	0,019347	0,904	4,1708	0,820	5,894	1,116
1864	0,065	1,310	0,870	0,780	0,021226	1,088	4,9160	0,740	6,744	1,401
1861	0,078	1,350	0,830	0,740	0,023252	1,305	5,9640	0,780	8,049	1,831
1859	0,093	1,397	0,787	0,690	0,025390	1,556	7,1450	0,830	9,531	2,368
1862	0,100	1,435	0,750	0,650	0,026328	1,673	8,1280	0,870	10,671	2,749
1858	0,118	1,475	0,705	0,620	0,028600	1,975	9,2390	0,900	12,114	3,390
1858	0,130	1,515	0,665	0,590	0,030019	2,175	10,2870	0,930	13,392	3,934

Tabela I.11 – Resultados nos ensaios no gerador, para $n_{gg} = 1860\text{rpm}$

Valores medidos					Valores calculados			
V_g	f_g	C	I_{Ag}	I_{Sg}	P_{elg}	S_g	$\cos(\phi_g)$	η_{gg}
[V]	[Hz]	[μF]	[A]	[A]	[kW]	[kVA]	[1]	[1]
255	62,1	40	0,0	7,0	0,000	3,092	0,000	0,000
250	62,0	40	0,3	6,9	0,130	2,988	0,043	0,093
245	61,4	40	1,6	7,0	0,679	2,970	0,229	0,371
240	61,0	40	2,8	7,3	1,143	3,035	0,377	0,483
230	60,5	40	3,7	7,6	1,474	3,028	0,487	0,536
213	60,0	40	5,0	8,1	1,845	2,988	0,617	0,544
252	60,2	50	4,4	10,0	1,920	4,365	0,440	0,488

ANEXO II – FOTOS DAS PARTES CONSTITUINTES DA BOMBA



Figura II.1 – Desmontagem da bomba



Figura II.2 – Voluta da bomba



Figura II.3 – Vista frontal do rotor



Figura II.4 – Vista lateral do rotor



Figura II.5 – Caixa de lubrificação da bomba



Figura II.6 – Eixo e rolamento

**ANEXO III – FOTOS DOS EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS
NOS ENSAIOS DO GRUPO MOTO-BOMBA E DO GRUPO-GERADOR**



Figura III.1 – Vista geral da linha de recalque, das válvulas esfera, globo e dos medidores eletromagnéticos no Laboratório de Etiquetagem de Bombas (LEB)



Figura III.2 – Tanque de calibração – LEB



Figura III.3 – Computador para aquisição de dados – LEB



Figura III.4 – Ensaio do grupo moto-bomba – LEB



Figura III.5 – Vista geral do Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidroelétricas (LHPCH)



Figura III.6 – Tanque de sucção



Figura III.7 – Piezômetro



Figura III.8 – Bomba utilizada para simular a altura e a vazão da BFT



Figura III.9 – Vaso de pressão



Figura III.10 – Manômetro de colunas de mercúrio para medição da pressão manométrica na entrada da BFT

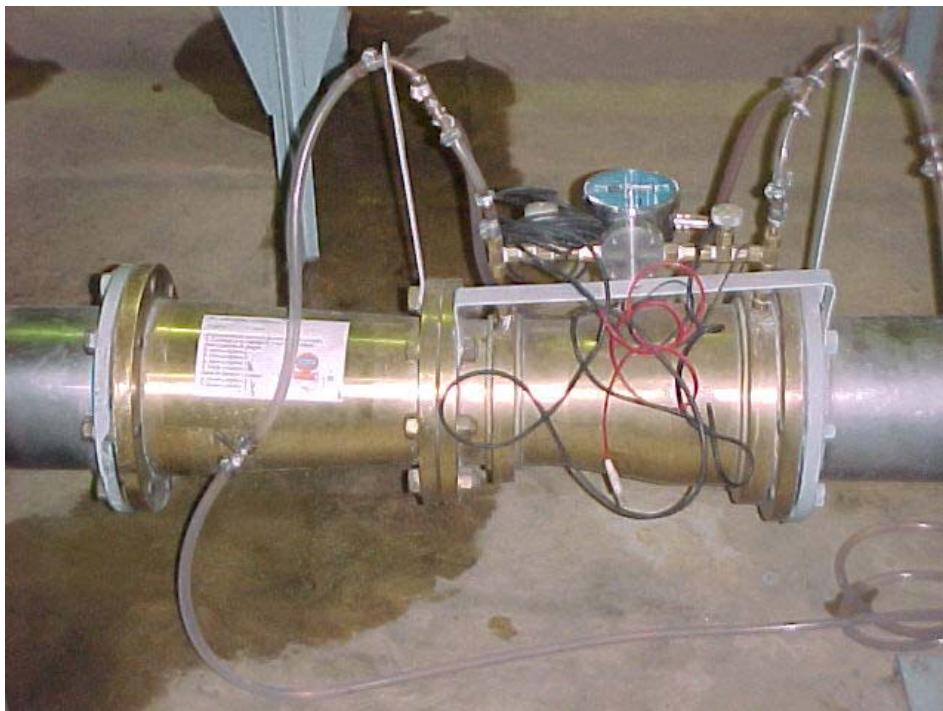


Figura III.11 – Medidor Venturi para medição da vazão



Figura III.12 – Manômetro invertido de colunas de mercúrio do medidor Venturi



Figura III.13 – Válvula gaveta



Figura III.14 – Vista geral da bancada de ensaios



Figura III.15 – Resistência líquida para simulação da carga ativa

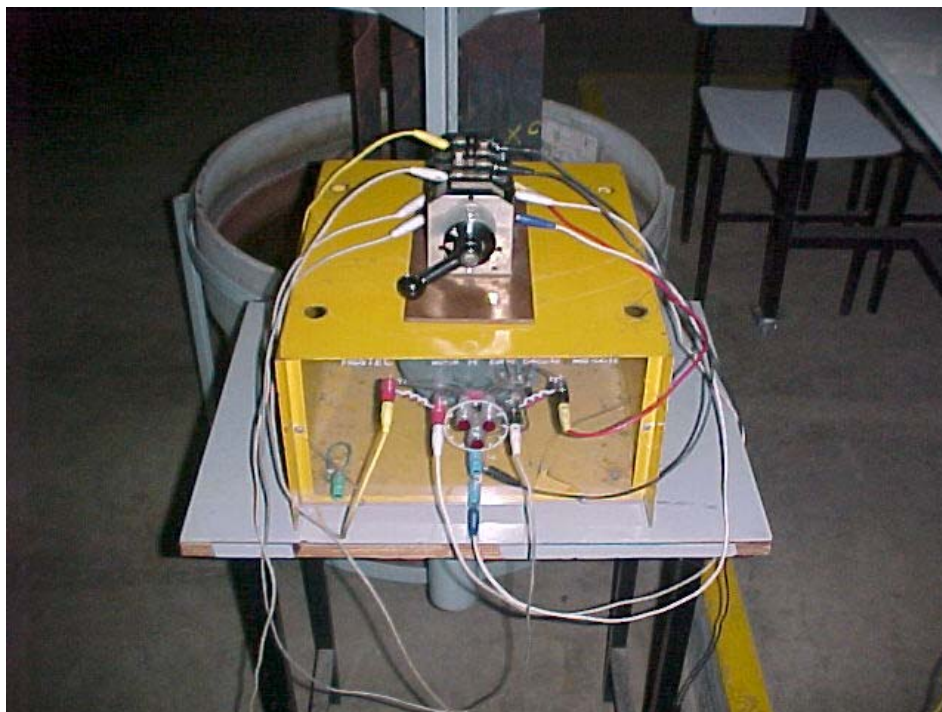


Figura III.16 – Motor de indução utilizado para simular partida de motores