

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

MATEUS RICARDO

**ESTUDO DE GRUPOS MOTO-BOMBA OPERANDO
COMO GRUPOS GERADORES EM MICROCENTRAIS
HIDRELÉTRICAS**

Itajubá

2007

MATEUS RICARDO

**ESTUDO DE GRUPOS MOTO-BOMBA OPERANDO
COMO GRUPOS GERADORES EM MICROCENTRAIS
HIDRELÉTRICAS**

**Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia da
Energia como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em
Ciências em Engenharia da Energia.**

**Área de concentração: Geração de
energia**

**Orientador: Professor Doutor Augusto
Nelson Carvalho Viana**

Itajubá

2007



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

A N E X O II
FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "ESTUDO DE GRUPOS MOTO-BOMBA OPERANDO
COMO GRUPOS GERADORES EM MICROCENTRAIS
HIDRELÉTRICAS"

Autor: MATEUS RICRDO NOGUEIRA VILANOVA

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
1°	A		
2°	A		
3°	A		

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, 07 de fevereiro de 2008.

Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim
1° Examinador - UNESP

Prof. Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho
2° Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana
3° Examinador - Orientador - UNIFEI

**Dedico esse trabalho à
Geraldo Lúcio Tiago Filho e
Augusto Nelson Carvalho Viana.**

AGRADECIMENTOS

Aos professores Luiz Augusto Horta Nogueira e Carlos Roberto Rocha, pela oportunidade.

Ao amigo Rafael Balbino Cardoso.

Ao Ministério de Minas e Energia, pelo convênio que possibilitou a realização dos ensaios de campo apresentados nesse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa.

Ao professor Carlos Roberto Balarim, por gentilmente disponibilizar sua tese e dissertação, utilizadas como referências.

Aos senhores Roberto Schneider e Cristiano Garcia (Schneider Motobombas), Moacyr Hooper (Leon Heimer S.A.), Fábio Marinato de Viveiros e Suelen (WEG Sul de Minas), Gustavo A. Massaro (IMBIL Bombas Hidráulicas), Antonio Carlos T. Bettarello (Betta Hidroturbinas), à senhora Sônia Baranoski (Toyama do Brasil) pelo fornecimento dos custos de bombas, motores e grupos geradores.

Aos amigos e amigas do Instituto de Recursos Naturais (IRN), Laboratório de Etiquetagem de Bombas (LEB), Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH), Laboratório Hidromecânico para Pequenas

Centrais Hidrelétricas (LHPCH), Júlio César dos Santos, Osvaldo de Melo Rodrigues, Luan Marcel Guimarães, Adriano, Vandir, Levi Barbeta, Rodrigo Amarante Santana, Helmo Lemos, Antônio Claret Gomes, Márcia Hipólito, Heloisa Helena dos Santos, e Maria de Fátima Silva.

A todos os meus amigos.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar em campo a utilização de bombas funcionando como turbina (BFTs) e motores de indução operando como gerador (MIGs), para a substituição de grupos geradores convencionais em microcentrais hidrelétricas (MCHs), tendo como foco as BFTs. Para se atingir tal objetivo, foi realizado o estudo de caso em uma microcentral hidrelétrica instalada na Serra da Mantiqueira que, após reformada, recebeu um grupo gerador BFT/MIG. A pesquisa é pioneira, sendo o primeiro caso documentado no Brasil de aplicação de BFTs e MIGs em uma MCH real. Após ensaios para definição do rendimento, e comparação com resultados teóricos e laboratoriais, concluiu-se que grupos geradores BFT/MIG podem ser utilizados de forma eficaz na geração de energia elétrica, mediante aplicação de metodologias adequadas para seleção e adaptações que otimizem sua operação em reverso. Além dos aspectos técnicos, foram abordados também os aspectos econômicos da tecnologia. Através de pesquisa de preços e composição de custos, foi possível quantificar o benefício econômico de grupos BFT/MIG em relação a grupos geradores convencionais, constatando-se que a tecnologia estudada reduz de forma significativa os custos de implantação de microcentrais hidrelétricas.

Palavras-chave: Microcentrais hidrelétricas. Grupos geradores. Conjuntos moto-bomba.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the in site use of pumps working as turbines (PATs) and induction engines operating as generators (MIGs), for the replacement of conventional generating groups in micro hydropower plants (MHPs), focusing on PATs. To achieve this goal, a case study was accomplished on a micro hydropower plant installed in Mantiqueira Mountain that, after been rebuilt, received a PAT/MIG generating group. It's a pioneer research, being the first documented case of implementation of PATs and MIGs in a real MHP in Brazil. After tests for defining the efficiency, and the comparison with theoretical and laboratorial results, it was concluded that PAT/MIG generating groups can be used effectively in electricity generation, by the application of appropriate selection methodologies and adjustments to optimize its operation in reverse. Besides the technical aspects, it was also addressed the technology's economic aspects. Through prices research and costs composition, it was possible to quantify the economic benefit of PAT/MIG groups over conventional generating groups, noting that the studied technology reduces the micro hydropower plants deployment costs in a significant way.

Keywords: Micro Hydro Power Plants. Generating groups. Moto-pump groups.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Monjolo (fonte: ARAÚJO, 2000)	34
FIGURA 2 - Rodas d'água (fonte: TOASTER, 2006)	35
FIGURA 3 - Primeiro gerador idealizado por Faraday (fonte: FRIEDEL, 1981)	36
FIGURA 4 - Cragside House (fonte: CRAGSIDE, 2007)	38
FIGURA 5 - Microcentral hidrelétrica de Vulcan Street (fonte: FIRST, 2007)	38
FIGURA 6 - Usina de Marmelos (fonte: BRASILVIAGEM.COM, 2006)	39
FIGURA 7 - Matriz elétrica brasileira (fonte: ANEEL, 2007)	40
FIGURA 8 - Composição da geração hidrelétrica brasileira (fonte: ANEEL, 2007) ...	42
FIGURA 9 - Arranjo típico de MCH (fonte: <i>NATURAL RESOURCES CANADA</i> , 2004)	45
FIGURA 10 - Pré-seleção de turbinas hidráulicas (fonte: SOUZA, 1992)	53
FIGURA 11 - Diagrama de Cordier (fonte: TIAGO FILHO, ca. 1990)	54
FIGURA 12 - Turbina Francis (fonte: SOUZA et al., 1999)	55
FIGURA 13 - Turbina Pelton com dois jatos (fonte: SOUZA et al., 1999)	56
FIGURA 14 - Turbina Michell-Banki (fonte: SOUZA et al., 1999)	57
FIGURA 15 - Turbinas axiais (fonte: SOUZA et al., 1999)	57
FIGURA 16 - Gerador de indução (fonte: UNESP, 2007)	60
FIGURA 17 - Campo de funcionamento de bombas hidráulicas	61
FIGURA 18 - Rotores de simples e dupla sucção	62
FIGURA 19 - Bomba com três estágios	62
FIGURA 20 - Rotores fechados, semi-abertos e abertos	63
FIGURA 21 - Aspectos construtivos de uma bomba centrífuga (fonte: adaptado de KSB, ca. 2005)	63

FIGURA 22 - Aspectos construtivos de um motor de indução (fonte: MARQUES et al., 2006)	64
FIGURA 23 - Enrolamentos imbricado e ondulado (fonte: BORTONI e SANTOS, ca. 2000)	65
FIGURA 24 - Rotores tipo gaiola e bobinado (fonte: BORTONI; SANTOS, ca. 2000)	65
FIGURA 25 - Força de Lorentz em um motor (fonte: BORTONI; SANTOS, ca. 2000)	66
FIGURA 26 - Analogia entre bombas (<i>pump</i>) e turbinas (<i>turbine</i>) (fonte: CHAPALLAZ et al., 1992b)	68
FIGURA 27 - Bico injetor (turbinas Pelton) e distribuidor (Turbina Francis) (fonte: Macintyre, 1983).....	70
FIGURA 28 - Pré-seleção de BFTs (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992b)	71
FIGURA 29 - Triângulo de velocidades de bomba centrífuga funcionando como bomba	72
FIGURA 30 - Triângulo de velocidades de BFT	72
FIGURA 31 - Coeficientes de altura – Worthington.....	79
FIGURA 32 - Coeficientes de vazão – Worthington	80
FIGURA 33 - Relação entre rendimentos de bombas e BFTs.....	81
FIGURA 34 - Coeficientes de Viana (fonte: adaptado de VIANA; NOGUEIRA, 1990)	82
FIGURA 35 - Estimativa de rendimento de BFT (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992b)	86
FIGURA 36 - Coeficientes de altura de Chapallaz (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992b)	86

FIGURA 37 - Coeficientes de vazão de Chapallaz (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992b)	87
FIGURA 38 - Seleção de MIG (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1990a)	96
FIGURA 39 - Seleção de MIG – Dados extrapolados	96
FIGURA 40 - Relação experimental de senos (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992a)	98
FIGURA 41 - Relação experimental de senos – Extrapolação	98
FIGURA 42 - Microcentral do Projeto BFT/MIG	104
FIGURA 43 - Desfavoráveis condições do grupo gerador e casa de força	105
FIGURA 44 - Georreferenciamento da central através de GPS de precisão.....	105
FIGURA 45 - Levantamento topográfico utilizando estação total	106
FIGURA 46 - Arranjo da MCH	107
FIGURA 47 - Modelagem digital da bacia de contribuição da central	108
FIGURA 48 - Área de drenagem da MCH, plotada sobre folha topográfica e imagem de satélite	109
FIGURA 49 - Hidrografia e rede de drenagem	109
FIGURA 50 - Hidrograma de vazões médias mensais transpostas para a central..	110
FIGURA 51 - Curva de permanência de vazões da central	111
FIGURA 52 - Campanha hidrométrica	112
FIGURA 53 - Reprojeto da câmara de carga	114
FIGURA 54 - Planta da casa de força reformada.....	114
FIGURA 55 - Referências geométricas para ensaio de turbinas de reação, segundo NBR 11374.....	120
FIGURA 56 - Referências geométricas para ensaio de turbinas de ação, segundo NBR 11374.....	122

FIGURA 57 - Medidor de vazão ultra-sônico Polysonics DCT7088 (fonte: THERMO, 2007)	125
FIGURA 58 - Medidor de espessura de conduto forçado Homis TT100 (fonte: HOMIS, 2007)	126
FIGURA 59 - Manômetro de Bourdon	127
FIGURA 60 - Transdutores de pressão	127
FIGURA 61 - Medidor de grandezas elétricas Yokogawa CW140 (fonte: CLAMP-ON, 2007)	128
FIGURA 62 - Tacômetro digital	128
FIGURA 63 - Módulo SCXI-1125, National Instruments (fonte: SCXI-1125, 2007) ..	129
FIGURA 64 - Bloco SCXI-1338, National Instruments (fonte: SCXI-1338, 2007)....	130
FIGURA 65 - Módulo SCXI-1102, National Instruments (fonte: SCXI-1102, 2007) ..	130
FIGURA 66 - Módulo SCXI-1600, National Instruments (fonte: USB, 2007)	131
FIGURA 67 - Esquema de medição e aquisição de dados do grupo BFT/MIG.....	132
FIGURA 68 - Esquema de medição e aquisição de dados do grupo Michell-Banki/Gerador	132
FIGURA 69 - Transdutores do medidor de vazão ultra-sônico, entrada da BFT	133
FIGURA 70 - Medidor ultra-sônico de vazão, entrada da turbina Michell-Banki.....	133
FIGURA 71 - Transdutor de pressão e manômetro de Bourdon, entrada da BFT ..	133
FIGURA 72 - Transdutor de pressão e manômetro de Bourdon, entrada da turbina Michell-Banki	134
FIGURA 73 - Transdutor de pressão em poço tranqüilizador, canal de fuga	134
FIGURA 74 - Alicates para medição de grandezas elétricas	134
FIGURA 75 - Medidor de grandezas elétricas.....	135
FIGURA 76 - Módulo de aquisição de dados	135

FIGURA 77 - Computador laptop com o software LabVIEW.....	135
FIGURA 78 - Processo de seleção de BFTs e MIGs para cotação.....	139
FIGURA 79 - Custo índice de MCHs em função da bruta (fonte: adaptado de ESHA, 2005).....	143
FIGURA 80 – Parâmetros hidráulicos, grupo BFT/MIG.....	152
FIGURA 81 – Potências, grupo BFT/MIG	153
FIGURA 82 – Parâmetros hidráulicos, grupo gerador com Michell-Banki – Leituras diretas	155
FIGURA 83 – Parâmetros hidráulicos, grupo gerador com Michell-Banki – Dados adquiridos	155
FIGURA 84 – Potências, grupo gerador com Michell-Banki – Leituras diretas	156
FIGURA 85 – Potências, grupo gerador com Michell-Banki – Dados adquiridos ..	156
FIGURA 86 – Comparação de rendimentos dos grupos geradores.....	157
FIGURA 87 – Comparação de potências elétricas dos grupos geradores.....	158
FIGURA 88 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida.....	159
FIGURA 89 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida	160
FIGURA 90 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 10 e 30 m).....	161
FIGURA 91 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 30 e 50 m).....	161
FIGURA 92 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 30 e 50 m).....	162
FIGURA 93 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 50 e 70 m).....	163
FIGURA 94 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida	

entre 70 e 100 m)	163
FIGURA 95 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida (queda líquida entre 10 e 30 m)	164
FIGURA 96 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida (queda líquida entre 30 e 50 m)	164
FIGURA 97 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida (queda líquida entre 50 e 70 m)	165
FIGURA 98 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida (queda líquida entre 70 e 100 m)	165
FIGURA 99 - Custo índice de BFTs em função da queda líquida (de 10 a 20 m) ...	166
FIGURA 100 - Custo índice de BFTs em função da queda líquida (de 20 a 100 m)	167
FIGURA 101 - Custo de MIGs em função da potência nominal	167
FIGURA 102 - Custo de MIGs em função da potência elétrica gerada	168
FIGURA 103 - Custo índice de grupos geradores BFT/MIG em função da queda líquida (entre 10 e 20 m)	169
FIGURA 104 - Custo índice de grupos geradores BFT/MIG em função da queda líquida (entre 20 e 100 m)	169
FIGURA 105 - Custo índice de grupos geradores BFT/MIG em função da queda líquida - Dólares (entre 10 e 20 m).....	170
FIGURA 106 - Custo índice de grupos geradores BFT/MIG em função da queda líquida - Dólares (entre 20 e 100 m).....	170
FIGURA 107 - Custo índice de turbinas hidráulicas em função da queda líquida (de 5 a 40 m)	171
FIGURA 108 - Custo índice de grupos geradores convencionais em função da queda	

líquida (de 5 a 40 m)	171
FIGURA 109 - Custo índice de grupos geradores convencionais em função da queda líquida - Dólares (de 5 a 40 m)	172
FIGURA 110 - Custo índice médio de BFTs e turbinas Michell-Banki e Pelton.....	173
FIGURA 111 - Custo índice médio de BFTs em relação ao de turbinas Michell-Banki e Pelton	173
FIGURA 112 - Custo índice médio de BFTs (considerando volante de inércia e tubo de sucção) e turbinas Michell-Banki e Pelton.....	174
FIGURA 113 - Custo índice médio de BFTs (considerando volante de inércia e tubo de sucção) em relação ao de turbinas Michell-Banki e Pelton	175
FIGURA 114 - Custo índice médio de grupos geradores BFT/MIG e grupos geradores convencionais	177
FIGURA 115 - Custo índice médio de grupos BFT/MIG em relação a grupos convencionais.....	177
FIGURA 116 - Custo índice de microcentrais hidrelétricas com turbinas Michell-Banki e convencionais – Dólares	179
FIGURA 117 - Custo índice de microcentrais hidrelétricas (grupo gerador BFT/MIG) - Dólares.....	179
FIGURA 118 - Custo índice médio de microcentrais hidrelétricas.....	180
FIGURA 119 - Custo índice médio de microcentrais hidrelétricas utilizando grupos BFT/MIG em relação a grupos convencionais (turbina Michell-Banki)	181
FIGURA 120 - Abaulamento das pás da BFT	185
FIGURA 121 - Planilha para definição de custos de MCHs	215
FIGURA 122 - Capa de “L'architecture Hydraulique” (1737) (fonte: GALLICA, 2007)	230

FIGURA 123 - Curvas da bomba utilizada (fonte: KSB, 2006).....	231
FIGURA 124 - Especificações do motor utilizado (fonte: WEG,2007).....	232
FIGURA 125 - Características do motor utilizado, Modelo 4 pólos, 60 Hz, 45 kW (fonte: WEG, 2007)	233
FIGURA 126 - Cotação de grupos geradores convencionais.....	236
FIGURA 127 - Cotação de motores de indução.....	237
FIGURA 128 - Especificações do medidor ultra-sônico de vazão (THERMO, 2007)	238
FIGURA 129 - Especificações do medidor de espessura de conduto (HOMIS, 2007)	239

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Resultados experimentais de Viana	78
TABELA 2 - Principais parâmetros de projeto da MCH.....	112
TABELA 3 - Parâmetros de seleção da BFT	115
TABELA 4 - Parâmetros de seleção do MIG.....	116
TABELA 5 - Características geométricas para ensaio do grupo BFT/MIG.....	123
TABELA 6 - Características geométricas para ensaio do grupo gerador – Michell-Banki	124
TABELA 7 - Custos índices de MCHs e previsão para 2010.....	144
TABELA 8 - Custos índices de MCHs, por equipamento	144
TABELA 9 - Ensaio em BFTs Worthington.....	203
TABELA 10 - Seleção de BFTs para simulação – Método de Viana.....	205
TABELA 11 - Seleção de BFTs para simulação – Método de Chapallaz	208
TABELA 12 - Cotação de BFTs e MIGs	209
TABELA 13 - Cotação de grupos geradores	213
TABELA 14 - Simulação de custos índices de MCHs	216
TABELA 15 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Valores médios	217
TABELA 16 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 1	217
TABELA 17 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 2	218
TABELA 18 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 3	218
TABELA 19 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 4	219
TABELA 20 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 5	220
TABELA 21 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 6	220
TABELA 22 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 7	221

TABELA 23 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 8	221
TABELA 24 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 9	222
TABELA 25 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 10.....	222
TABELA 26 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 11.....	222
TABELA 27 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 12.....	223
TABELA 28 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 13.....	223
TABELA 29 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 14.....	224
TABELA 30 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 15.....	225
TABELA 31 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 16.....	225
TABELA 32 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 17.....	226
TABELA 33 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 18.....	226
TABELA 34 – Ensaio do grupo gerador convencional – Leituras diretas	227
TABELA 35 – Ensaio do grupo gerador convencional – Dados aquisitados	227

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BFB	bomba funcionando como bomba
BFT	bomba funcionando como turbina
BIG	Banco de Informações de Geração
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EFEI	Escola Federal de Engenharia de Itajubá
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS)
ESHA	<i>European Small Hydro Association</i> (Associação Européia de Pequenas Centrais Hidrelétricas)
GPS	<i>global positioning system</i> (sistema de posicionamento global)
IDH	índice de desenvolvimento humano
MCH	microcentral hidrelétrica
MIG	motor de indução operando como gerador
MME	Ministério de Minas e Energia
NRCAN	<i>Natural Resources Canadá</i> (Secretaria de Recursos Naturais do Canadá)
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento (PAC)
PCH	pequena central hidrelétrica
PNPCH	Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas de Pequenas Centrais Hidrelétricas
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

LISTA DE SÍMBOLOS

a	diferença de nível entre a entrada da turbina/BFT e o manômetro (ou transdutor de pressão)
A_3	área da entrada do tubo de sucção
A_4	área da saída do tubo de sucção
C_{60}	capacitância para excitação do MIG em 60 Hz
c_a	coeficiente de altura de Chapallaz
C_{bc}	custo de barragem de concreto
$C_{BFT/MIG}$	custo do grupo gerador BFT/MIG
C_{bpa}	custo de barragem de pedra argamassada
C_{btva}	custo da barragem de terra com vertedor em canal de alvenaria
C_{bvt}	custo da barragem de terra com vertedor em canal de terra
C_{car}	custo do canal de adução revestido de alvenaria
C_{cc}	custo da câmara de carga
C_{cff}	custo do conduto forçado de ferro dúctil
C_{cfpvc}	custo do conduto forçado de PVC
C_{cl}	custo do conduto livre de ferro dúctil
C_{cm}	custo da casa de máquinas
C_{ct}	custo do canal de adução de terra
CI	custo índice
$\cos \phi$	fator de potência
c_q	coeficiente de vazão de Chapallaz
C_{rd}	custo da rede de distribuição
C_{ta}	custo da tomada d'água

C_{tbft}	custo dos equipamentos eletromecânicos
C_{tf}	custo dos equipamentos eletromecânicos, turbina Francis
C_{tmb}	custo dos equipamentos eletromecânicos, turbina Michell-Banki
D_e	diâmetro do eixo
D_r	diâmetro do rotor
D_{ts}	diâmetro do tubo de sucção na seção considerada
D_1	diâmetro da entrada da turbina
D_3	diâmetro da entrada do tubo de sucção
D_3'	diâmetro da saída do tubo de sucção
F_{min}	distância entre a saída do tubo de sucção e o fundo do canal de fuga
f_q	fator de queda
g	aceleração da gravidade
H_b	altura da bomba no ponto de melhor rendimento
H_b	altura da bomba
H_B	queda bruta
H_{bc}	altura da barragem de concreto
H_{bc}	altura da bomba corrigida para a rotação nominal
H_{bpa}	altura da barragem de pedra argamassada
H_{btva}	altura da barragem de terra com vertedor em canal de alvenaria
H_{bvt}	altura da barragem de terra com vertedor em canal de terra
H_L	queda líquida
H_{nb}	queda nominal da bomba
H_{nt}	queda nominal da BFT
H_p	perdas de carga
H_{pmrb}	altura da bomba no ponto de melhor rendimento

$H_{sm\acute{a}x}$	altura máxima de sucção
H_t	queda da BFT
H_t	queda da BFT no ponto de melhor rendimento
k	coeficiente de BUTU 2;
k_a	coeficiente de altura/queda
k_a	coeficiente de altura de Viana
k_p	coeficiente de relação entre P_{et} e P_{ng}
k_{p1}	coeficiente de relação entre P_{et} e P_{ng} extrapolada (entre 35 e 100 kW)
k_q	coeficiente de vazão
k_q	coeficiente de vazão de Viana
k_ϕ	relação experimental de senos
k_ϕ	relação experimental de senos
L	comprimento do tubo de sucção
L_{bc}	comprimento da barragem de concreto
L_{bpa}	comprimento da barragem de pedra argamassada
L_{btva}	comprimento da barragem de terra com vertedor em canal de alvenaria
L_{btvt}	comprimento da barragem de terra com vertedor em canal de terra
L_{car}	comprimento do canal de adução revestido de alvenaria
L_{cff}	comprimento do conduto forçado de ferro dúctil
L_{cfpvc}	comprimento do conduto forçado de PVC
L_{cl}	comprimento do conduto livre de ferro dúctil
L_{rd}	comprimento da rede de distribução
L_{ct}	comprimento do canal de adução de terra
n	rotação da BFT
n	rotação

n_{11e}	rotação de disparo do modelo da turbina, calculado em ensaio
n_e	rotação de disparo da turbina
n_{nb}	rotação nominal da bomba
n_{nt}	rotação nominal da BFT
n_{qa}	rotação específica no Sistema Internacional
n_{qbt}	rotação específica da bomba no Sistema Técnico
n_{qt}	rotação específica da BFT no Sistema Técnico
n_t	rotação da BFT
P	potência instalada
P_a	potência ativa
P_1	pressão na entrada da turbina/BFT
P_e	potência de eixo da BFT
P_{el}	potência elétrica fornecida pelo MIG
P_{elgc}	potência elétrica nominal gerada pelo MIG
P_{elm}	potência elétrica demandada pelo motor
P_{emig}	potência de eixo absorvida pelo MIG
P_{et}	potência de eixo fornecida pela turbina ou BFT
P_{HL}	potência hidráulica líquida absorvida pela BFT
P_{hnb}	potência hidráulica nominal da bomba
P_{hnt}	potência hidráulica nominal da BFT
P_{ht}	potência hidráulica da BFT
P_{inst}	potência instalada da MCH
P_{ng}	potência nominal do motor (MIG)
P_{ngc}	potência nominal comercial do MIG
P_{nt}	potência nominal de eixo da BFT

P_t	potência de eixo da BFT
Q	vazão de projeto ou vazão turbinada
Q_b	vazão da bomba ou vazão da bomba no ponto de melhor rendimento
Q_{bc}	vazão da bomba corrigida para a rotação nominal
Q_g	potência reativa do MIG
Q_m	potência reativa do motor
Q_{nb}	vazão nominal da bomba ou vazão estimada bomba
Q_{nt}	vazão nominal da BFT
Q_{pmrb}	vazão da bomba no ponto de melhor rendimento
Q_t	vazão da BFT ou vazão da BFT no ponto de melhor rendimento
S	potência aparente
S_{min}	submergência ou afogamento mínimo do tubo de sucção
v	velocidade recomendável para o escoamento na seção
V	tensão de linha
v_1	velocidade na entrada da turbina
$v_{3'}$	velocidade na saída do tubo de sucção
v_4	velocidade na saída do tubo de sucção
v_{4a}	velocidade na saída do tubo de sucção para altas quedas ($nqt < 20$)
v_{4b}	velocidade na saída do tubo de sucção para baixas quedas ($nqt > 20$)
z	cota topográfica do nível mínimo do canal de fuga
z_1	cota da entrada da turbina/BFT
z_3	cota do nível d'água de jusante ou da saída do rotor (turbina Michell-Banki)
ϕ_m	ângulo fasorial do motor
ϕ_{mig}	ângulo fasorial do gerador/MIG

$\eta_{\text{BFT/MIG}}$	rendimento do grupo gerador BFT/MIG
$\eta_{\text{bmáx}}$	rendimento máximo da bomba
η_{m}	rendimento do motor à plena carga
η_{mig}	rendimento do MIG
η_{nb}	rendimento nominal da bomba
η_{nt}	rendimento nominal da bomba
η_{t}	rendimento da turbina ou BFT
ρ	massa específica da água
σ	coeficiente de cavitação de Thoma, para turbinas Francis
$\tau_{\text{máxe}}$	tensão máxima aplicada no eixo
τ_{adm}	tensão admissível do material do eixo
$\tau_{\text{máxe}}$	tensão máxima aplicada no eixo
ω_{st}	coeficiente de BUTU 1;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	30
1.1 OBJETIVOS.....	32
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
2 CONSIDERAÇÕES SOBRE HIDROELETRICIDADE	34
2.1 PEQUENO HISTÓRICO DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA.....	34
2.2 PANORAMA HIDRELÉTRICO BRASILEIRO	39
2.3 MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS	43
2.3.1 COMPONENTES DE MCHS.....	45
2.3.1.1 Barragens	46
2.3.1.2 Tomada d'água	46
2.3.1.3 Sistema de adução em baixa pressão.....	46
2.3.1.4 Sistema de transição entre baixa e alta pressão	46
2.3.1.5 Sistema de adução em alta pressão.....	47
2.3.1.6 Casa de força	48
2.3.1.7 Grupo gerador	48
2.3.1.8 Sistema de distribuição e transmissão	48
2.3.2 VANTAGENS E CONSIDERAÇÕES SOBRE MCHS	48
2.4 TURBINAS HIDRÁULICAS.....	52
2.4.1 TURBINAS FRANCIS	54
2.4.2 TURBINAS PELTON.....	55
2.4.3 TURBINAS MICHELL-BANKI.....	56
2.4.4 TURBINAS AXIAIS.....	57
2.5 GERADORES.....	58

2.5.1 GERADORES SÍNCRONOS.....	58
2.5.2 GERADORES ASSÍNCRONOS OU DE INDUÇÃO	59
3 BOMBAS HIDRÁULICAS E MOTORES DE INDUÇÃO	61
3.1 BOMBAS HIDRÁULICAS	61
3.2 MOTORES DE INDUÇÃO	64
4 BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA.....	67
4.1 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO	73
4.2 MÉTODOS DE SELEÇÃO DE BFTS.....	81
4.2.1 MÉTODO DE VIANA.....	81
4.2.2 MÉTODO DE CHAPALLAZ.....	84
4.3 RECOMENDAÇÕES PARA APLICAÇÃO PRÁTICA DE BFTS.....	88
4.3.1 TENSÃO MÁXIMA NO EIXO DA BFT	88
4.3.2 ROTAÇÃO DE DISPARO	89
4.3.3 TUBO DE SUCÇÃO	90
4.3.4 PRESSÃO NA CAIXA ESPIRAL	92
5 MOTORES DE INDUÇÃO OPERANDO COMO GERADOR	94
5.1 SELEÇÃO DE MIGs.....	94
6 APLICAÇÃO DE GRUPOS MOTO-BOMBA EM MCHS.....	103
6.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA.....	103
6.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	104
6.1.2 REPROJETO E REFORMA DA MCH	105
6.1.3 SELEÇÃO DA BFT.....	115
6.1.4 SELEÇÃO DO MIG	116
6.1.5 ENSAIOS NO GRUPO GERADOR.....	117
6.1.5.1 Normatização dos ensaios	117

6.1.5.2	Descrição teórica e parâmetros aquistados.....	118
6.1.5.2.1	Grupo gerador convencional – Turbina Michell-Banki.....	121
6.1.5.3	Caracterização do sistema ensaiado.....	123
6.1.5.3.1	Grupo gerador – Turbina Michell-Banki	124
6.1.5.4	Equipamentos utilizados.....	124
6.1.5.4.1	Medidor de vazão ultra-sônico por tempo de trânsito	124
6.1.5.4.2	Medidor de espessura de condutos forçados.....	125
6.1.5.4.3	Manômetro de Bourdon	126
6.1.5.4.4	Transdutores de pressão	127
6.1.5.4.5	Medidor de grandezas elétricas	128
6.1.5.4.6	Tacômetro digital.....	128
6.1.5.4.7	Sistema de aquisição de dados	129
6.1.5.4.8	<i>Software</i> para aquisição de dados LabVIEW	131
6.1.5.5	Instrumentação e aquisição de dados	131
6.1.5.6	Execução dos ensaios – procedimentos	136
6.2	ANÁLISE DE BENEFÍCIOS ECONÔMICOS	136
6.2.1	CUSTOS DE GRUPOS GERADORES.....	137
6.2.2	CUSTOS DE MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	142
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	152
7.1	VIABILIDADE TÉCNICA	152
7.1.1	ENSAIOS NO GRUPO BFT/MIG.....	152
7.1.1.1	Análise dos resultados e comparação com os resultados teóricos esperados.....	153
7.1.2	ENSAIOS NO GRUPO GERADOR COM TURBINA MICHELL-BANKI ..	154
7.1.2.1	Análise dos resultados e comparação com o grupo BFT/MIG.....	157

7.2 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DA TECNOLOGIA.....	159
7.2.1 CUSTO ÍNDICE DE GRUPOS BFT/MIG.....	159
7.2.2 IMPACTO DA TECNOLOGIA BFT/MIG SOBRE O CUSTO DE GRUPOS GERADORES	172
7.2.3 CUSTO ÍNDICE DE MCHS UTILIZANDO BFTS/MIGS.....	178
7.2.4 IMPACTO DA TECNOLOGIA BFT/MIG SOBRE O CUSTO DE MCHS..	180
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	182
8.1 SUGESTÕES E FUTUROS ESTUDOS.....	184
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	199
APÊNDICES.....	202
APÊNDICE A – Ensaio em BFTs Worthington	203
APÊNDICE B – Seleção de BFTs para simulação de custos Método de Viana.....	205
APÊNDICE C – Seleção de BFTs para simulação de custos Método de Chapallaz	208
APÊNDICE D – Cotação de BFTs e MIGs	209
APÊNDICE E – Cotação de grupos geradores convencionais.....	213
APÊNDICE F – Planilha para definição de custos de MCHs	215
Apêndice G – Custos índices de MCHs	216
Apêndice H – Resultados dos ensaios no grupo gerador BFT/MIG	217
Apêndice I – Resultados dos ensaios no grupo gerador convencional (Turbina Michell-Banki).....	227
ANEXOS	229
ANEXO A - Capa de “ <i>L'architecture Hydraulique</i> ” (1737).....	230
ANEXO B – Curvas da bomba utilizada no Projeto BFT/MIG	231

ANEXO C – Características do MIG utilizado.....	232
ANEXO D – Características elétricas do MIG utilizado	233
ANEXO E – Cotação do grupo BFT/MIG utilizado no projeto.....	234
ANEXO F – Cotação de grupos geradores convencionais.....	236
ANEXO G – Cotação de motores de indução	237
ANEXO H – Especificações do medidor ultra-sônico de vazão.....	238
ANEXO I – Especificações do medidor de espessura de conduto forçado	239

1 INTRODUÇÃO

A energia sempre foi um elemento fundamental na vida e no desenvolvimento do ser humano. No atual contexto mundial, esse insumo se tornou o centro das atenções e dos esforços governamentais, pois ao mesmo tempo em que se torna necessária a expansão da oferta para garantir o crescimento econômico dos países diante do mercado globalizado, problemas ambientais como o aquecimento global obrigam que essa expansão ocorra de forma sustentável, privilegiando as fontes renováveis. Diante desse desafio, o Brasil encontra-se numa posição privilegiada. Esforços para o aumento da matriz energética, sobretudo a elétrica, como aqueles previstos no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), tornam-se possíveis em função do enorme potencial hidráulico do país.

Além da questão econômica, a energia desempenha um importante papel social, sobretudo em relação às populações rurais e isoladas. Para essas, a energia é necessária não somente para a realização de atividades básicas, como iluminação e refrigeração, mas também para ações nas áreas de saúde, educação, informação e segurança. As economias e mercados locais muitas vezes dependem ou podem ser impulsionados pela disponibilidade de energia elétrica.

Ciente dessa realidade, o Governo Federal instituiu o “Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Luz para Todos”, através do qual pretende levar energia elétrica até a parcela menos favorecida da sociedade brasileira (encontrada majoritariamente em zonas rurais), através, principalmente, da extensão das redes elétricas já existentes.

Sabe-se, porém, que sistemas de geração descentralizada individualizados, ou por redes isoladas, são na maioria das vezes a melhor opção para o atendimento

a comunidades rurais e isoladas, sob o ponto de vista técnico e econômico, salvo em situações onde tais localidades encontram-se geograficamente próximas às redes. Nesse sentido, o Brasil dispõe de um enorme potencial ainda não inventariado para a implantação de microcentrais hidrelétricas (MCHs). Essa tecnologia, baseada em uma fonte renovável e tecnicamente dominada, ainda é subexplorada nacionalmente, principalmente em função do seu custo inicial de implantação, considerado alto em relação a outras fontes, sobretudo à geração a Diesel.

Considerando o fato de que grande parte dos custos de uma MCH está relacionada ao grupo gerador, vários pesquisadores se focaram nesse componente, na busca por tecnologias mais baratas. Uma das principais alternativas encontradas é a utilização de bombas funcionando como turbina (BFTs) e motores de indução operando como gerador (MIGs). A vantagem econômica desses equipamentos sobre grupos geradores convencionais reside na sua produção em massa, para aplicações industriais, irrigação, saneamento, dentre outras, implicando numa redução de seu custo.

Trabalhos como o de Viana (1987) comprovam, em laboratório, que a utilização de BFTs e MIGs é viável. Pretende-se, com essa dissertação, analisar a utilização dos grupos moto-bomba para a geração de energia em situações reais. Para tanto, uma MCH localizada no alto da Serra da Mantiqueira foi repotenciada e reformada para receber um grupo BFT/MIG, através de convênio entre a UNIFEI e o Ministério de Minas e Energia. Os resultados dos ensaios realizados nesse grupo BFT/MIG são apresentados ao longo do trabalho, bem como aspectos técnicos e econômicos da utilização dessa tecnologia.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é analisar a utilização e aplicabilidade de BFTs e MIGs na geração de energia elétrica em MCHs, valendo-se para isso não somente de um forte embasamento teórico, mas também do estudo de um caso real. São analisados os aspectos técnicos, através de ensaios no grupo gerador, cujos resultados serão confrontados com aqueles disponíveis na literatura, e com os de um grupo gerador convencional, utilizando turbina Michell-Banki.

Procura-se também, ao longo do trabalho, quantificar os impactos da utilização de grupos BFT/MIG sobre os custos de MCHs, sendo a economia gerada por essa tecnologia o principal fator motivante de sua aplicação.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos da pesquisa:

- apresentar, através de uma revisão bibliográfica, os principais conceitos em torno da geração descentralizada de energia elétrica através de microcentrais hidrelétricas, bem como sobre grupos geradores, BFTs e MIGs;
- avaliar o comportamento de um grupo gerador BFT/MIG em campo, instalado numa MCH real, através de ensaios;
- comparar os resultados dos ensaios de campo com os de laboratório, desenvolvidos, entre outros, por Viana (1987), comprovando a viabilidade técnica de grupos geradores BFT/MIG;
- comparar o desempenho do grupo BFT/MIG com o de um grupo composto por

turbina Michell-Banki e gerador convencional;

- avaliar os benefícios econômicos da tecnologia BFT/MIG, no contexto das MCHs;
- propor aperfeiçoamentos e recomendações para a utilização prática desses equipamentos.

2 CONSIDERAÇÕES SOBRE HIDROELETRICIDADE

Apresenta-se, neste capítulo, um panorama geral e conceitos básicos da geração hidrelétrica, contextualizando-se a temática do trabalho.

2.1 PEQUENO HISTÓRICO DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Os primeiros registros da utilização da energia hidráulica pelo homem foram obtidos na Europa e Ásia, a cerca de 2000 anos atrás (FRAENKEL et al., 2003). Nessa época, a energia da água era utilizada, basicamente, para a moagem de grãos, valendo-se para isso de sistemas rudimentares, como por exemplo os monjolos.



FIGURA 1 - Monjolo (fonte: ARAÚJO, 2000)

Com o passar dos anos, a primitiva tecnologia foi dando lugar a equipamentos

mais elaborados, destacando-se as rodas d'água (figura 2). As primeiras rodas d'água tinham eixo vertical e eram acopladas diretamente a moendas. Aprimoramentos foram sendo feitos e as rodas, agora de eixo horizontal, passaram a contar com sistemas de acoplamento indireto através de correias e engrenagens. Percebe-se que, até então, tais sistemas realizavam apenas conversões hidromecânicas de energia.

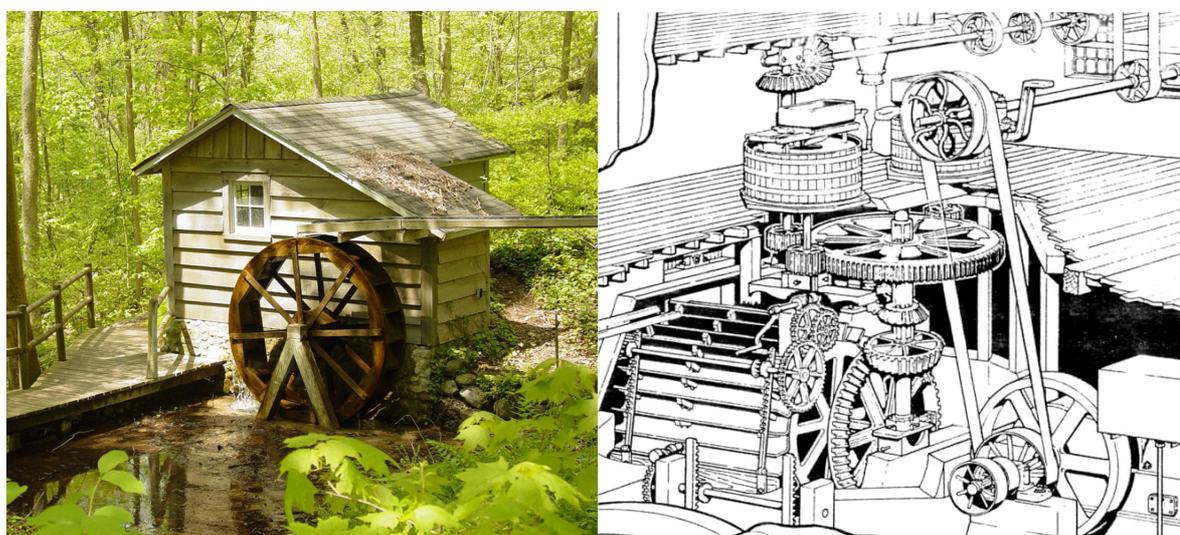


FIGURA 2 - Rodas d'água (fonte: TOASTER, 2006)

Em 1730, Daniel Bernoulli elaborou o teorema e a equação da conservação de energia em fluidos, base da hidráulica moderna, que ficaram estabelecidos em sua obra intitulada "Hidrodinâmica" (MACINTYRE, 1983).

A publicação do livro *L'architecture Hydraulique* (vide ANEXO A) pelo engenheiro francês Bernard Forest de Bélidor, no ano de 1737, é considerada por muitos como o primeiro marco tecnológico da geração hidrelétrica, no seu estágio atual. Em seu trabalho, composto por 4 volumes, Bélidor descreve máquinas hidráulicas de eixo vertical e horizontal, criando bases para o desenvolvimento das bombas e turbinas hidráulicas modernas. Curiosamente, outra contribuição de

Bélidor, durante a elaboração de *L'architecture Hydraulique*, foi a inédita utilização das teorias de cálculo integral para a resolução de problemas técnicos (BERNARD, 2006).

Já em 1754, Leonard Euler, inventor de uma roda de reação com distribuidor fixo (considerada a verdadeira precursora das turbinas hidráulicas), desenvolveu a equação que ainda hoje leva seu nome, através da qual pode-se descrever o comportamento de máquinas de reação (MACINTYRE, 1983).

Quase um século depois, em 1831, o químico britânico Michael Faraday descobriu e estudou o fenômeno da indução eletromagnética, sendo este o princípio fundamental de operação de motores, geradores e transformadores. Uma década depois, os primeiros geradores elétricos começavam a ser utilizados (FRIEDEL, 1981).

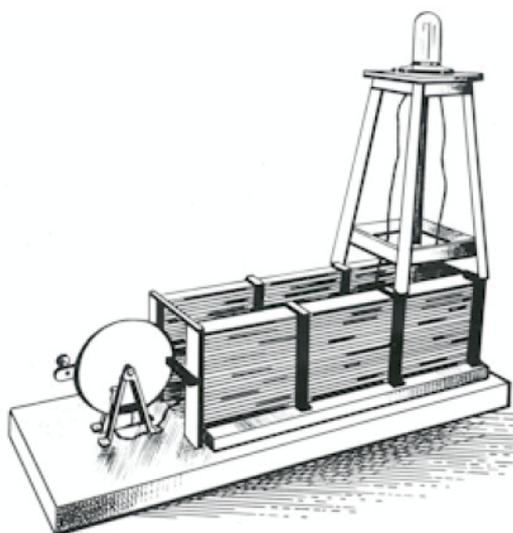


FIGURA 3 - Primeiro gerador idealizado por Faraday (fonte: FRIEDEL, 1981)

Inúmeras fontes norte-americanas consultadas, pelos mesmos e óbvios motivos que as levam erroneamente a não reconhecer o pioneirismo brasileiro na invenção do avião, e a considerar a Amazônia um território internacional, atribuem aos Estados Unidos às primeiras experiências práticas de geração hidrelétrica.

Segundo estas, em 1880, a *Michigan's Grand Rapids Electric Light and Power Company* produziu eletricidade para acender 16 lâmpadas, através do acoplamento de um dínamo a uma turbina hidráulica. Um ano depois, nas Cataratas do Niagara, outro sistema teria sido implantado, utilizando novamente um dínamo, desse vez acoplado à turbina de uma fábrica de farinha, visando à iluminação pública (WIND, 2005).

Sabe-se, porém, que a energia hidrelétrica foi utilizada pela primeira vez na Inglaterra, em 1878, na cidade de Rothbury, pelo industrial inglês William George Armstrong (ELETRIC, 2006). Lorde Armstrong, como era conhecido, sempre se interessou pela engenharia, especialmente por máquinas hidráulicas, tendo inventado e projetado inúmeros equipamentos e estruturas. Como industrial, Armstrong se dedicou inicialmente à produção de pontes e equipamentos hidráulicos. Posteriormente, passou a atuar na indústria bélica, produzindo desde armas até veículos de combate, tendo sido um dos principais fornecedores do exército britânico durante a I Guerra Mundial. Foi também um dos fundadores da Universidade de Newcastle. Com o passar do tempo, Armstrong começou a se interessar por paisagismo e jardinagem, o que o levou a construir uma estupenda mansão, chamada de *Cragside House* (WILLIAM, 2007). Lorde Armstrong barrou alguns rios em sua propriedade, desviando a água para 5 pequenos reservatórios, que lhe ofereciam uma queda bruta de aproximadamente 103 m. Com a instalação de uma pequena casa de força, *Cragside House* se tornou o primeiro local no mundo a utilizar energia hidrelétrica, no caso, para iluminação e aquecimento (NATIONAL, 2007).



FIGURA 4 - Cragside House (fonte: CRAGSIDE, 2007)

Em 1882, entra em operação a primeira usina hidrelétrica comercial do mundo, a *Vulcan Street Power Plant*, construída rio Fox (Appleton - Wisconsin) com uma potência instalada de 12,5 kW. A usina atendia a duas fábricas de papel e a residência de seu proprietário (FIRST, 2007).

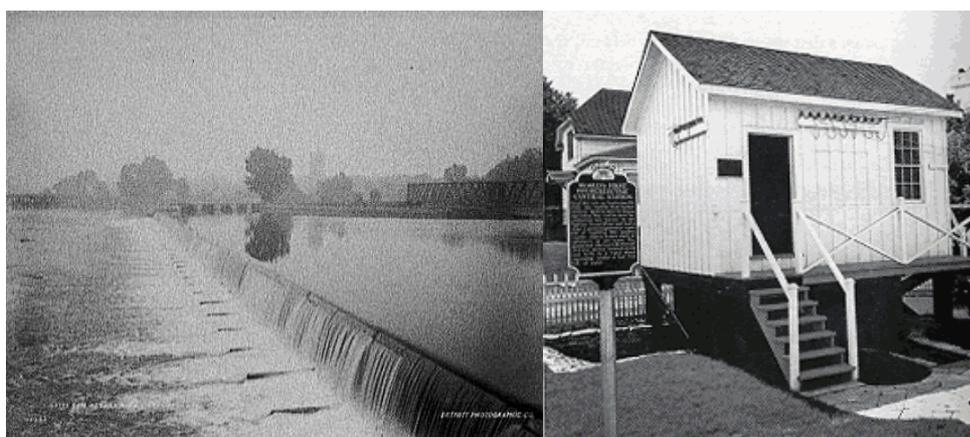


FIGURA 5 - Microcentral hidrelétrica de Vulcan Street (fonte: FIRST, 2007)

A primeira central hidrelétrica brasileira foi instalada em 1883, em um afluente do rio Jequitinhonha, município de Diamantina - MG (HISTÓRIA, 2003). Em 1889 era inaugurada em Juiz de Fora a Usina de Marmelos, sendo considerada o grande

marco da hidroeletricidade brasileira.



FIGURA 6 - Usina de Marmelos (fonte: BRASILVIAGEM.COM, 2006)

Em 1908 começa a operar em Piraí - RJ a Usina Hidrelétrica Fontes Velha, com 24 MW instalados, sendo uma das maiores do mundo na época.

2.2 PANORAMA HIDRELÉTRICO BRASILEIRO

O Brasil é conhecido mundialmente pela abundância de recursos naturais, destacando-se nesse cenário, os recursos hídricos. A existência de grandes rios, aliada aos antigos modelos políticos e setoriais, fizeram com que o país se tornasse o detentor de uma das maiores matrizes elétricas baseadas em fontes renováveis do planeta, através da geração hidráulica. A hidroeletricidade representa cerca de 70 % da capacidade instalada nacional (TIAGO FILHO, 2006), correspondente a uma potência de 75.949 MW. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tem-se a seguinte distribuição entre as fontes empregadas no Brasil:

Matriz Elétrica Brasileira por Fonte - Porcentagem

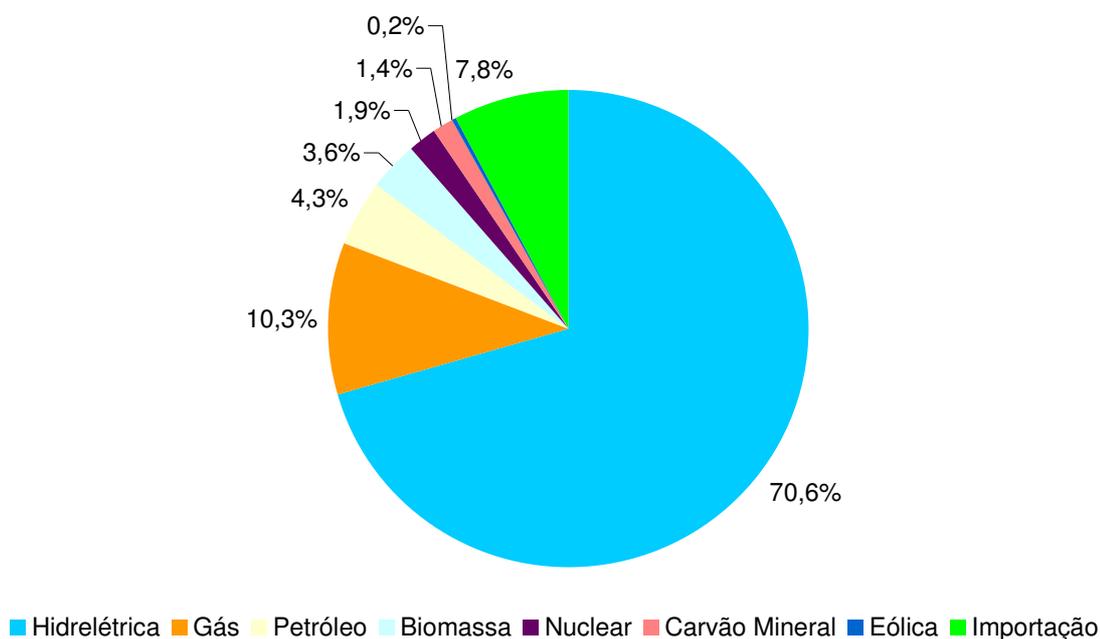


FIGURA 7 - Matriz elétrica brasileira (fonte: ANEEL, 2007)

A aptidão brasileira à hidroeletricidade vem passando por mudanças na sua forma, mantendo, porém, a mesma intensidade. Apesar dos tão comentados projetos das usinas de Belo Monte e do Rio Madeira, os grandes empreendimentos vem cedendo espaço para as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). A explicação para essa tendência reside, entre outros, no fato dos grandes aproveitamentos remanescentes se localizarem em áreas afastadas dos grandes centros consumidores do Sudeste/Sul, e, principalmente, na legislação ambiental vigente no país, que inviabiliza esse tipo de empreendimento devido aos impactos ambientais ocasionados pela formação de grandes reservatórios. São consideradas PCHs as usinas hidrelétricas cuja potência instalada se encontra na faixa de 1¹ a 30 MW, e cujos reservatórios tenham área inferior a 13 km² (ANEEL, 2003).

¹ Faixa de potência adotada no Brasil. Na Europa, por exemplo, os limites de potência para PCH's são de 500 e 10.000 kW (EUROPEAN SMALL HYDRO ASSOCIATION, 2006).

A implantação do novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro, baseado num mercado competitivo, e a necessidade de se garantir um aumento da oferta de eletricidade, capaz de sustentar o desenvolvimento econômico do país, fez com que a geração de energia elétrica se tornasse um negócio milionário e estratégico, envolvendo agentes privados e estatais. A eminência de uma nova crise no fornecimento de energia já em 2008 tende a impulsionar o mercado de PCHs, que constituem uma boa opção para a expansão do sistema, devido ao já citado potencial hidrelétrico brasileiro e ao estado da arte, permitindo uma complementação aos grandes empreendimentos.

Concomitantemente aos números do mercado, o Governo Federal tem lidado com índices igualmente surpreendentes em relação ao fornecimento de energia elétrica para a parcela menos favorecida da população. Segundo dados do “Programa Luz Para Todos”, aproximadamente 10 milhões de brasileiros não tem acesso à eletricidade, estando cerca de 90 % deles localizados em áreas rurais com baixos índices de desenvolvimento humano (IDH) (IBGE, 2000² apud MME, 2007). A situação se torna ainda mais grave quando considerado o fato de que grande parte das comunidades isoladas encontra-se na Amazônia, onde as características naturais quase sempre impossibilitam a extensão das redes existentes, obrigando qualquer esforço de universalização a se basear em sistemas de geração descentralizada.

Em termos de pequena geração descentralizada, as centrais hidrelétricas mostram novamente sua versatilidade, através das minicentrals, com potência instalada entre 100 e 1.000 kW, e as microcentrais (MCHs), com capacidade inferior a 100 kW (ELETROBRÁS, 1999). Esse tipo de usina, amplamente difundido no

² INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo 2000. Brasília: IBGE, 2000.

exterior, ainda é subexplorado no Brasil, onde poderia contribuir para o desenvolvimento de pequenos centros de produção agrícola e para a melhoria da qualidade de vida de comunidades isoladas.

A figura 8 apresenta a composição do parque hidrelétrico brasileiro, de acordo com os tipos de centrais:

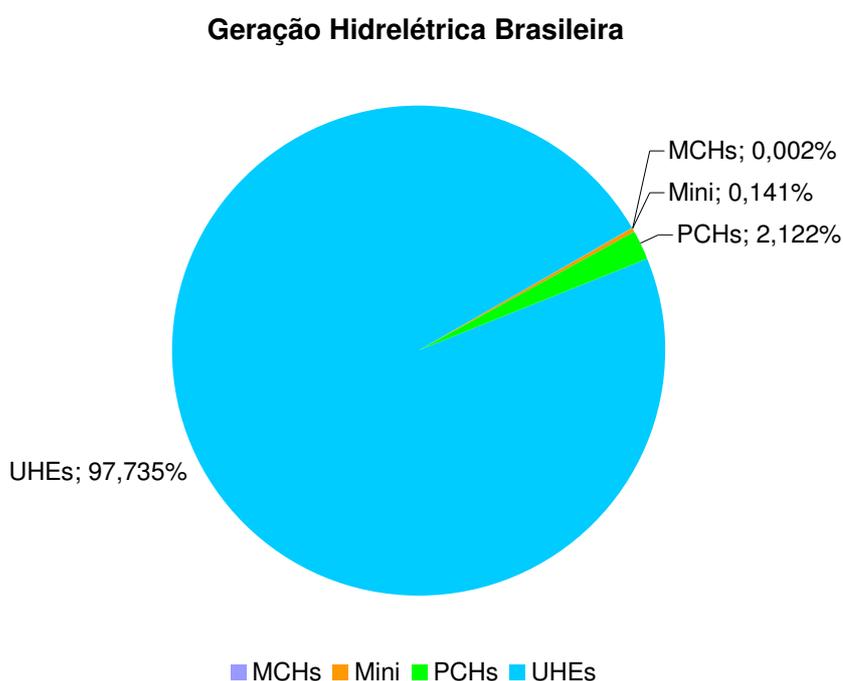


FIGURA 8 - Composição da geração hidrelétrica brasileira (fonte: ANEEL, 2007)

Um dos principais entraves à disseminação das microcentrais hidrelétricas no Brasil é o seu custo inicial de instalação, relativamente alto quando comparado, por exemplo, com os geradores a Diesel, opção atualmente predominante no país. Porém, quando se avalia todo o ciclo de vida de uma microcentral hidrelétrica, percebe-se que o inconveniente do alto investimento inicial é suprimido por várias vantagens, tanto de ordem econômica, quanto ambientais e operacionais, que serão abordados ao longo desse trabalho. Outro empecilho à expansão das MCHs é a

atual legislação do setor elétrico brasileiro, que dificulta a comercialização de energia gerada em centrais com capacidade inferior a 1 MW³, tornando este tipo de empreendimento pouco atrativo para investidores privados.

A soma desses e outros fatores implicam no não aproveitamento de inúmeros potenciais para microgeração hidrelétrica, que ao contrário dos potenciais maiores, não são sequer inventariados. Esse descaso ou falta de interesse recai até mesmo sobre as MCHs já existentes. Dados do Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2007) apontam a existência de apenas 27 centrais com potência inferior a 100 kW em todo o Brasil, quando na realidade, são conhecidas, pelo menos, 187 (TIAGO FILHO, 2006).

2.3 MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS

As primeiras iniciativas brasileiras em prol das MCHs ocorreram na década de 80, com o lançamento do Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PNPCH), pelo extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), e a publicação dos manuais de pequenas, mini e microcentrais, feita em parceria pelo DNAEE e as Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS). De acordo com Souza (2005)⁴, os principais objetivos do PNPCH eram:

- Disseminação da energia elétrica de forma simples, com baixos custos e impactos ambientais, utilizando tecnologia brasileira;

³ As MCHs devem atender a critérios para interligação ao sistema, o que pode inviabilizar economicamente o projeto.

⁴ Diretrizes estabelecidas pela Portaria nº 109 de 1982, do extinto Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE).

- Apoiar projetos de baixo custo;
- Incentivar a geração, distribuição, transmissão e comercialização independentes de energia;
- Aplicação de mini e microcentrais priorizando o atendimento de propriedades rurais, agroindústrias, cooperativas e comunidades isoladas;

Passados mais de 20 anos, as diretrizes do PNPC, no tocante às MCHs, ainda soam como atualidades, indo de encontro, principalmente, aos esforços do governo na busca pela universalização da energia elétrica, conforme comentado na seção 2.2.

Tecnicamente, o projeto de uma MCH deve partir do pressuposto da simplicidade. Apesar de vários aspectos em comum, esse tipo de central não pode ser encarado levemente como uma usina hidrelétrica em escala reduzida, dadas as especificidades e particularidades de cada uma.

Uma central hidrelétrica pode ser, basicamente, de três tipos (SOUZA,1992):

- Central de represamento: a queda bruta é obtida através da construção de uma barragem com grandes dimensões, estando a casa de força, geralmente, instalada na sua base. É um tipo pouco usual de MCH, dados os altos custos associados ao barramento;
- Central de desvio: é o tipo mais comum de MCH, no qual se aproveita o desnível natural do terreno, sendo a água captada e restituída no mesmo curso d'água. Constitui uma vantagem ambiental, uma vez que, por quase sempre ser instalada junto a cachoeiras (naturalmente intransponíveis para a ictiofauna), não interferem na rota migratória de peixes durante a piracema;

- Central de derivação: tem características semelhantes às de centrais de desvio, sendo a água, porém, devolvida em um rio diferente daquele onde foi captada.

A figura 9 ilustra um arranjo típico de microcentrais hidrelétricas de desvio, sendo seus principais componentes (NRCAN, 2004): tomada d'água e extravasor (A); sistema de adução em baixa pressão (B); sistema de transição entre alta e baixa pressão (C), sistema de alta pressão e blocos - de apoio e ancoragem - (D); casa de força, grupo gerador e painel de controle (E); canal de fuga (F); sistema de distribuição (G).



FIGURA 9 - Arranjo típico de MCH (fonte: *NATURAL RESOURCES CANADA*, 2004)

2.3.1 COMPONENTES DE MCHS

É apresentado a seguir um resumo descritivo dos principais componentes de MCHs.

2.3.1.1 Barragens

Estrutura construída transversalmente ao curso d'água, com a função de acumular água ou simplesmente elevar o seu nível. Em MCHs, geralmente assume o papel de soleira (pequena mureta, galgável, sobre a qual ocorre vertimento), com dimensões reduzidas, tendo a função de manter o afogamento necessário da tomada d'água ou produzir uma regularização diária de vazões.

2.3.1.2 Tomada d'água

Componente responsável pela captação da água no curso d'água. Deve ser equipada com uma comporta para manutenção do sistema de adução, extravasor, grade para retenção corpos flutuantes e desarenador, para eliminação de sedimentos.

2.3.1.3 Sistema de adução em baixa pressão

Pode ser constituído por um canal de adução ou conduto livre, sendo que, em ambos os casos, o escoamento ocorre sob pressão atmosférica. Transporta a água até o sistema de alta pressão, devendo para isso, acompanhar as curvas de nível do terreno.

2.3.1.4 Sistema de transição entre baixa e alta pressão

A escolha do sistema de transição se dá em função das características do

sistema de baixa pressão. Quando este é composto por um canal de adução, a transição é feita por uma estrutura denominada câmara de carga.

A câmara de carga apresenta aspectos construtivos extremamente semelhantes aos da tomada d'água, tendo a função de manter o afogamento do conduto forçado (selo hidráulico), aliviar o efeito de um possível golpe de aríete⁵, e armazenar um volume suficiente para a partida das turbinas.

No caso da adução em baixa pressão ocorrer através de um conduto livre, utiliza-se na transição uma chaminé de equilíbrio, sendo sua principal função o amortecimento do golpe de aríete.

2.3.1.5 Sistema de adução em alta pressão

É representado pelo conduto forçado, cuja função é alimentar a turbina hidráulica. Os condutos, quando não enterrados, são sustentados por blocos de apoio e ancoragem. Os blocos de apoio (ou selas) são instalados em toda extensão do conduto, de forma a suportar principalmente os esforços verticais provenientes do peso da tubulação, podendo esta, inclusive, apresentar movimento relativo em relação às selas (por exemplo, no caso de dilatação térmica). Sempre que ocorre mudança na direção, vertical ou horizontal, dos condutos, bem como no seu início e final, são instalados os blocos de ancoragem, envolvendo totalmente a tubulação. Ao contrário dos blocos de apoio, o conduto não pode se movimentar dentro dos blocos de ancoragem, devendo, com isso, serem previstas juntas de dilatação entre blocos consecutivos.

⁵ Surto de pressão ocasionado pelo interrompimento brusco do escoamento no conduto forçado.

2.3.1.6 Casa de força

A casa de força é o local reservado para a instalação e abrigo do grupo gerador. Deve ser projetada levando-se em consideração aspectos como ventilação, iluminação, facilidade de acesso e movimentação de equipamentos.

É também na casa de força onde se instala o canal de fuga, responsável pela restituição da vazão turbinada ao curso d'água.

2.3.1.7 Grupo gerador

É formado pelo acoplamento de uma turbina hidráulica a um gerador elétrico, através dos quais ocorrem os processos de conversão do potencial hidráulico em potência elétrica. Pode-se incluir no grupo gerador sistemas de regulação de velocidade (volantes de inércia, por exemplo).

2.3.1.8 Sistema de distribuição e transmissão

Leva a energia gerada até as cargas. MCHs normalmente se restringem à distribuição em curtas distâncias, uma vez que a extensão de longas linhas e o custo de transformadores de maior porte quase sempre inviabilizam o empreendimento.

2.3.2 VANTAGENS E CONSIDERAÇÕES SOBRE MCHS

As microcentrais hidrelétricas constituem a forma de geração isolada, em pequena escala e baseada em fontes renováveis, cuja tecnologia encontra-se mais

disseminada e dominada em termos mundiais. Em relação aos investimentos para implantação, quando consideradas somente fontes renováveis, geralmente representam a alternativa mais viável. Mesmo quando isso não ocorre, as muitas vantagens que esse tipo de central fornece às comunidades atendidas e ao meio ambiente justificam subsídios governamentais (KHENNAS e BARNETT, 2000). A *Natural Resources Canada* (2004) enumera os seguintes benefícios inerentes às microcentrais hidrelétricas:

- A fonte energética das MCHs, a água, é praticamente gratuita⁶, embora seu custo de implantação geralmente seja superior ao de sistemas que geram eletricidade utilizando combustíveis fósseis ou gás natural;
- Sistemas hidrelétricos são “à prova de inflação”, uma vez que não dependem de combustíveis, cujos preços, além de seguirem tendências inflacionárias, geralmente apresentam alta volatilidade, por exemplo, por questões geopolíticas;
- A vida útil de sistemas hidrelétricos encontra-se na faixa de 20 a 30 anos, muito superior a da maioria dos outros sistemas;
- Em se tratando de uma fonte renovável, uma microcentral hidrelétrica não depende de óleo, carvão ou outro combustível fóssil para operar. Esse fato, juntamente à reduzida escala desse tipo de empreendimento, contribui para a auto-sustentabilidade da central, uma vez que os impactos ambientais e sociais das grandes centrais são praticamente eliminados.
- As microcentrais eliminam a necessidade de implantação ou extensão de longas linhas de transmissão.

⁶ Com o avanço da política nacional de recursos hídricos e o desenvolvimento dos mecanismos de outorga e cobrança pelo uso, deve-se tomar tal afirmação como uma meia-verdade, ainda que os valores envolvidos sejam irrisórios quando comparados ao da compra de combustíveis.

São várias as vantagens, em termos ambientais, das MCHs, a começar pela não formação de grandes reservatórios. Dessa forma, é evitado o alagamento de áreas produtivas ou de mata nativa, além do deslocamento de populações. O impacto ocasionado pela instalação das estruturas, como canais, condutos e casa de força, é extremamente localizado, dispensando, muitas vezes, o desmatamento. Quando este é necessário, ocorre em proporções reduzidas, podendo ser facilmente compensado pelo plantio de outras árvores em locais adjacentes.

A utilização de soleiras ao invés de barragens propriamente ditas geralmente dispensa a instalação de mecanismos de transposição de peixes, uma vez que estas se assemelham aos obstáculos naturais ultrapassados pelas espécies em suas rotas migratórias. Quando estes mecanismos se fazem necessários, apresentam dimensões extremamente reduzidas, devido ao pequeno desnível a ser superado. Além disso, as soleiras influem muito menos no transporte de sedimentos do rio, retendo, em grande parte, apenas material de maior granulometria.

Finalmente, a não utilização de combustíveis fósseis evita a emissão de gases de efeito estufa. Numa época onde o mundo volta suas atenções para o problema do aquecimento global, as fontes renováveis devem ser prioridade tanto dos governos quanto de investidores privados, no tocante à eletrificação de áreas rurais e isoladas. Um GWh de eletricidade produzido a partir de pequenas e microcentrais hidrelétricas corresponde a uma redução média de 480 toneladas na emissão de CO₂ (ESHA, 2006), em relação à queima de combustíveis fósseis.

Do ponto de vista socioeconômico, a energia produzida por uma MCH, em uma comunidade rural e/ou isolada, permite a expansão das atividades produtivas locais, geralmente associadas à agricultura e ao extrativismo, incrementando a renda de sua população. Além disso, a eletricidade dá suporte ao desenvolvimento

de programas de saúde, educação e saneamento, melhorando sensivelmente a qualidade de vida dos moradores.

No âmbito tecnológico, apesar da maturidade técnica envolvendo as MCHs, muitos avanços ainda são possíveis em relação ao estado da arte. Nesse sentido, muitos dos esforços atuais se concentram na busca pela redução dos custos de implantação (principal benefício da tecnologia BFT/MIG, foco deste trabalho) e na automatização das usinas. Segundo a *European Small Hydro Association* (ESHA, 2005), as principais tendências tecnológicas na área de microcentrais hidrelétricas são:

- Padronização e otimização de turbinas, geradores e estruturas civis;
- Pesquisas para ampliar a faixa de operação de turbinas Francis, mantendo rendimentos regulares;
- Desenvolvimento de sistemas de controle computacionais, ao invés dos eletrônicos, atualmente utilizados;
- Utilização de barragens móveis;
- Desenvolvimento de novos materiais.

O aprimoramento e desenvolvimento de turbinas para baixa queda e hidrocínéticas constituiu uma outra linha de pesquisa muito promissora, sendo necessária não somente para a expansão das micro e mini, mas também das pequenas centrais hidrelétricas.

2.4 TURBINAS HIDRÁULICAS

Existem basicamente dois tipos de turbinas hidráulicas (TIAGO FILHO, ca. 1990):

- Turbinas de ação: a conversão da energia hidráulica em mecânica ocorre com o escoamento no rotor à pressão constante;
- Turbinas de reação: a pressão no rotor varia durante a conversão hidromecânica de energia.

A seleção da turbina para um aproveitamento hidrelétrico se dá a partir de dois parâmetros: vazão de projeto (Q) e queda líquida (H_L), sendo esta última obtida subtraindo-se as perdas de carga (H_P) no sistema de adução da queda topográfica ou bruta (H_B). A partir de Q e H_L , obtém-se uma grandeza adimensional, denominada rotação específica⁷ (n_{qA}), cujos valores são característicos para cada tipo de turbina. O n_{qA} é expresso pela seguinte equação:

$$n_{qA} = \frac{10^3 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{(H_L \cdot g)^{\frac{3}{4}}} \quad (1)$$

onde:

n_{qA} rotação específica no Sistema Internacional [1];

n rotação [rps];

Q vazão de projeto [m^3/s];

H_L queda líquida [m];

⁷ Fisicamente, o n_{qA} representa a rotação que a turbina teria sob uma queda de 1 m e escoando uma vazão de 1 m^3/s .

g aceleração da gravidade [m/s^2].

As figuras 10 e 11 permitem a pré-seleção do tipo de turbina, em função da vazão, queda e n_{qA} :

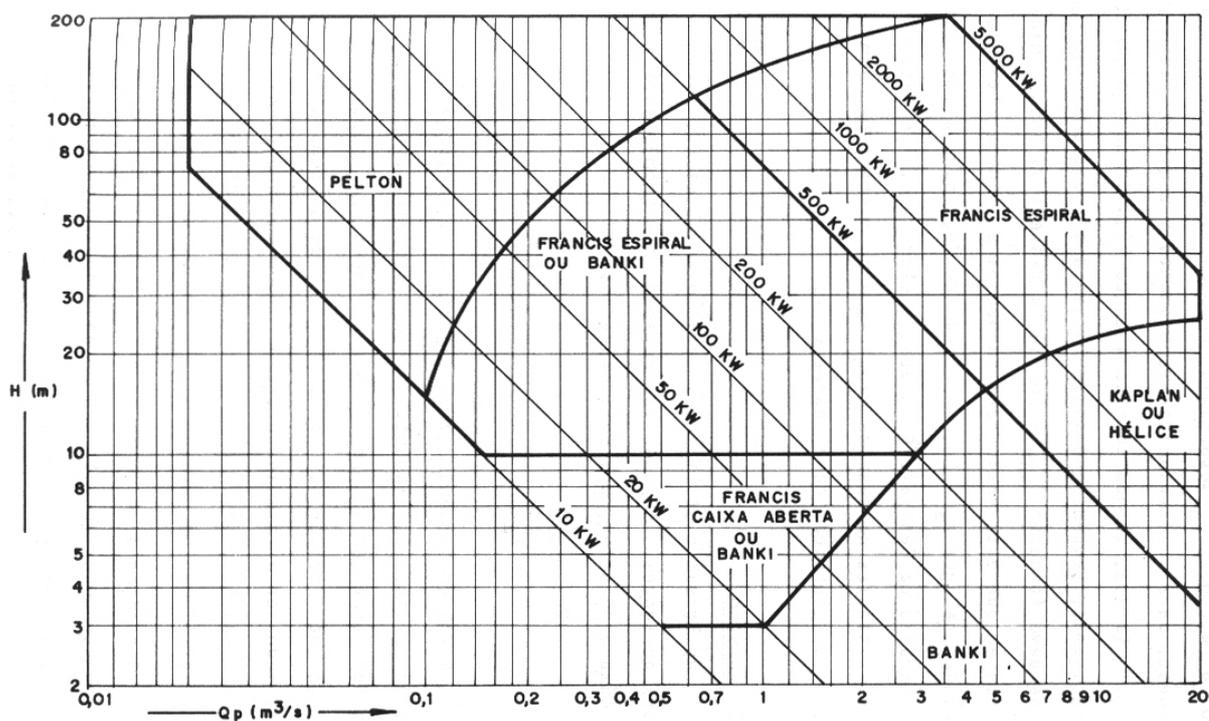


FIGURA 10 - Pré-seleção de turbinas hidráulicas (fonte: SOUZA, 1992)

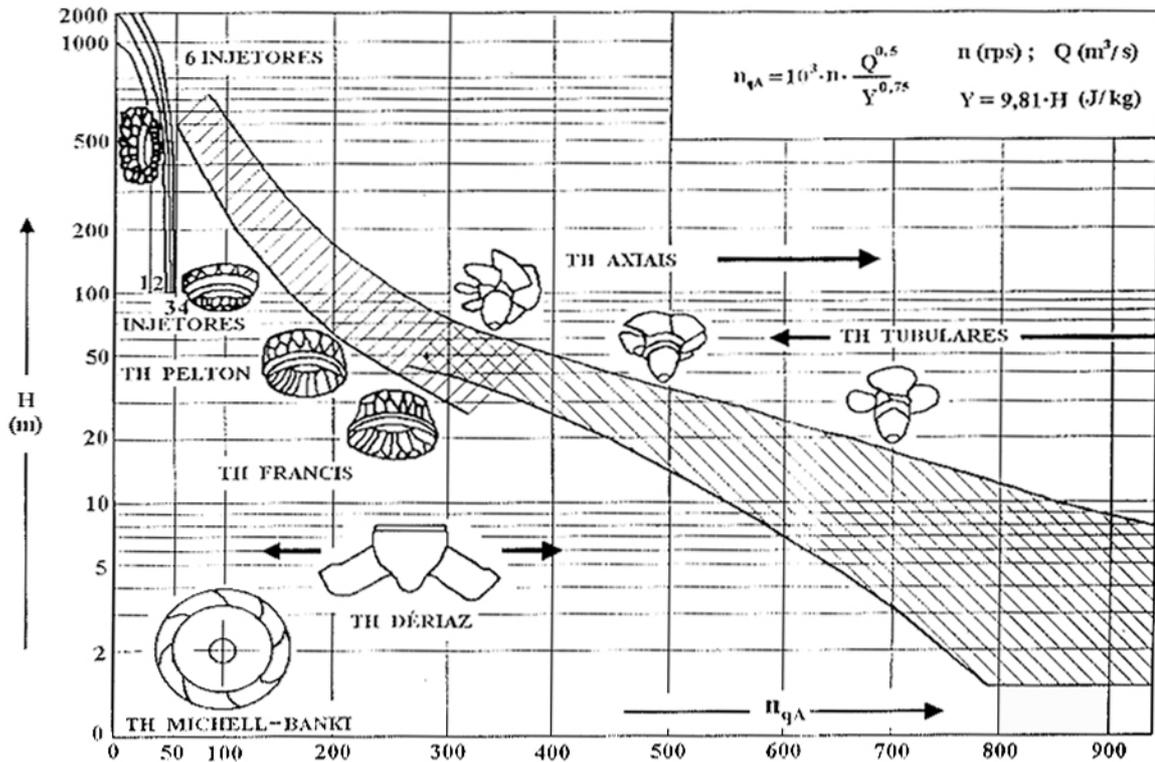


FIGURA 11 - Diagrama de Cordier (fonte: TIAGO FILHO, ca. 1990)

2.4.1 TURBINAS FRANCIS

São máquinas de reação, operando sob uma variada faixa de vazões e quedas. São constituídas basicamente das seguintes partes:

- Caixa: pode ser na forma de caracol, fechada, ou do tipo aberta, quando o rotor é instalado diretamente em um poço ou câmara;
- Distribuidor: componente formado por uma série de pás móveis que, além de direcionarem o fluxo (juntamente ao pré-distribuidor), permitem a regulação da vazão turbinada em função da demanda;
- Rotor: composto de pás especiais, pode ser de vários tipos (lento, normal, rápido), em função das características do aproveitamento;

- Tubo de sucção: restitui a vazão turbinada pelo canal de fuga, além de recuperar parte da energia cinética da água que sai do rotor.

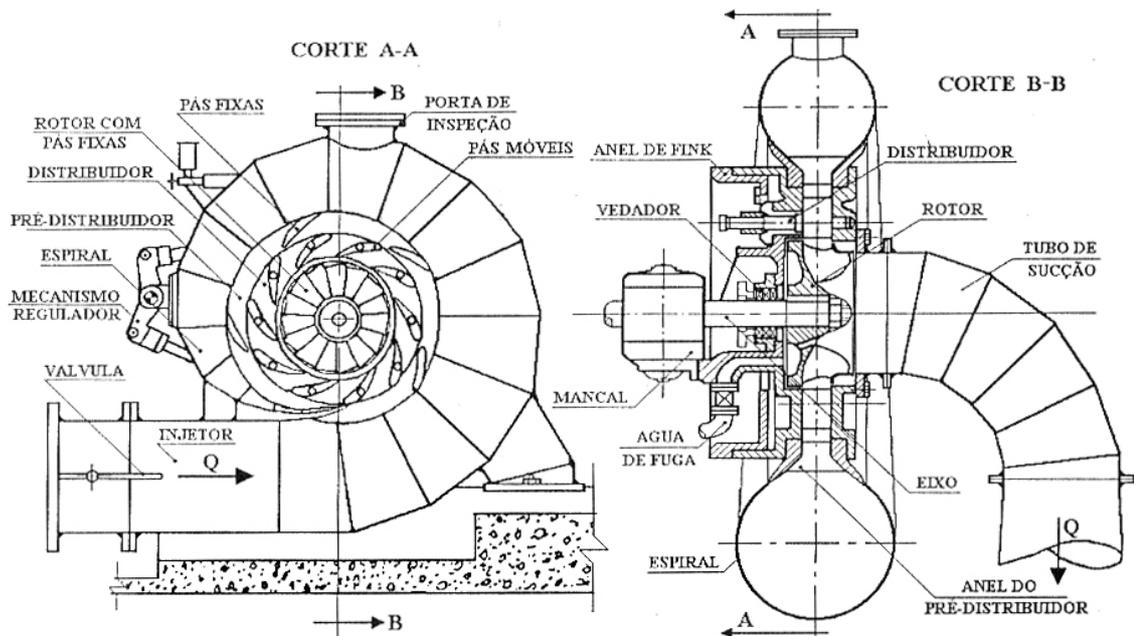


FIGURA 12 - Turbina Francis (fonte: SOUZA et al., 1999)

2.4.2 TURBINAS PELTON

As turbinas Pelton são máquinas de ação, indicadas para altas quedas e baixas vazões. Seu distribuidor é denominado injetor, ou bico injetor, sendo a vazão controlada por um componente chamado de agulha. Para MCHs são utilizadas turbinas Pelton com 1 e 2 jatos, existindo fabricantes que oferecem bicos injetores sem controle de vazão por questão de custos, sendo estes denominados setias.

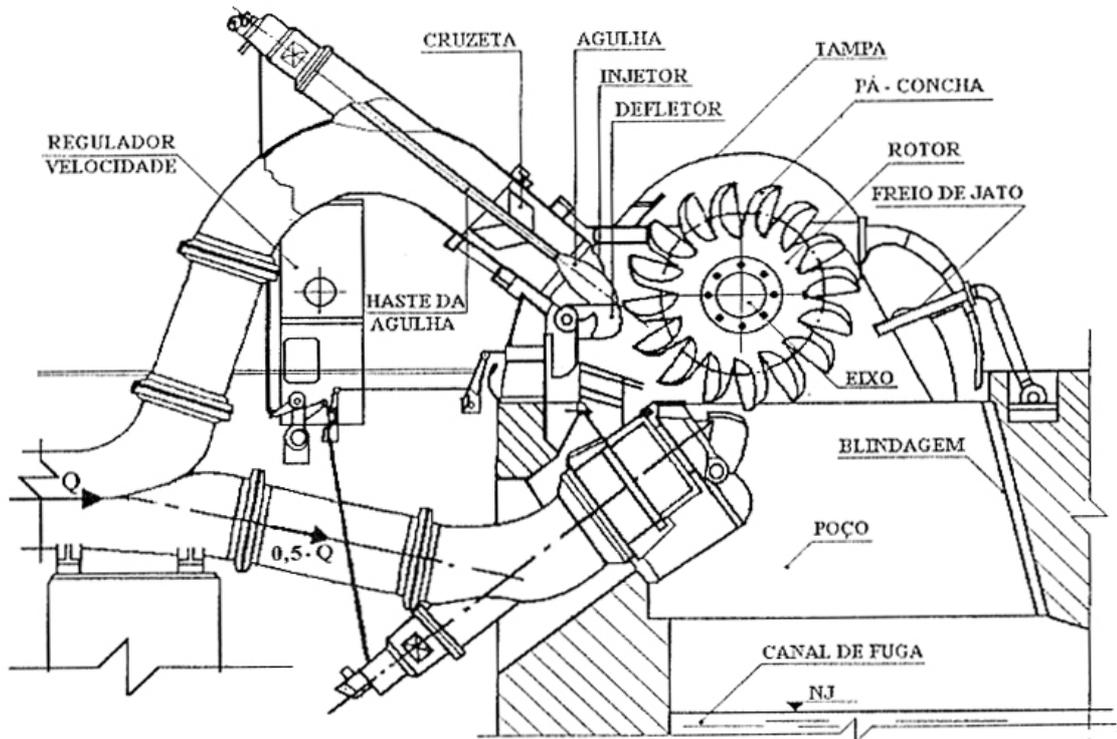


FIGURA 13 - Turbina Pelton com dois jatos (fonte: SOUZA et al., 1999)

2.4.3 TURBINAS MICHELL-BANKI

É um dos tipos de turbina mais empregados em microaproveitamentos hidrelétricos, dada sua simplicidade construtiva e baixo custo (SOUZA et al., 1999). É uma máquina de ação, cujo rotor se assemelha a uma roda d'água, sendo movimentado por um jato d'água largo.

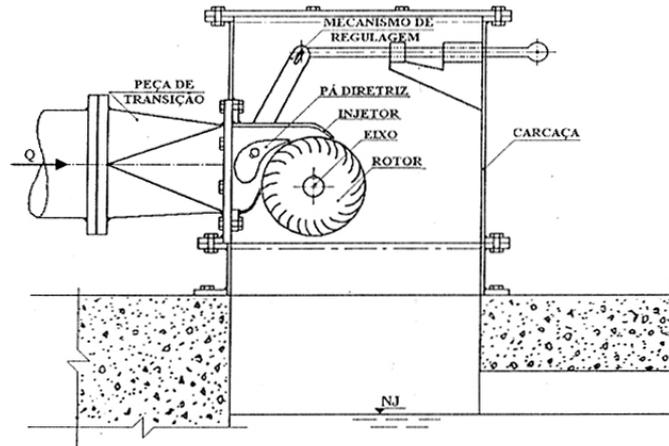


FIGURA 14 - Turbina Michell-Banki (fonte: SOUZA et al., 1999)

2.4.4 TURBINAS AXIAIS

As turbinas axiais são aplicadas em aproveitamentos que possuam alta vazão e baixas quedas. Os rotores axiais são compostos por pás fixadas a um cubo, podendo estas ser fixas ou móveis. Quando as pás são fixas, denomina-se o rotor/turbina como hélice; sendo as pás móveis, o equipamento é chamado de Kaplan. Existem variações nos tipos de turbina empregando rotores axiais, sendo os principais as turbinas tubulares, bulbo e *straflo*. Em MCHs, as turbinas axiais mais utilizadas são aquelas que não possuem controle de vazão no distribuidor e no rotor, por apresentarem menor custo.

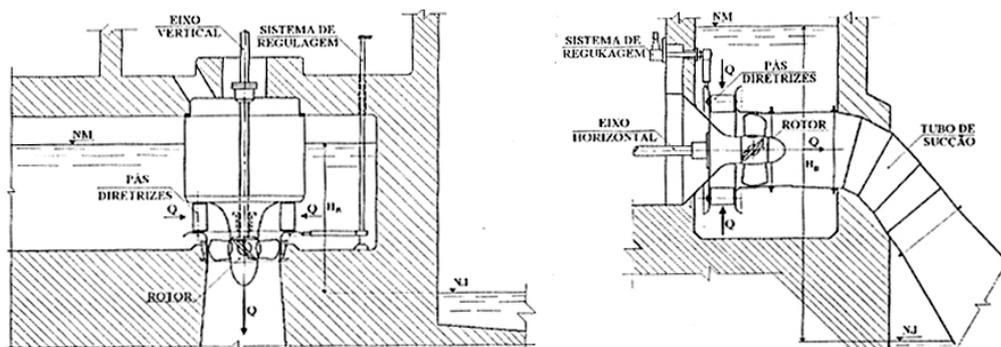


FIGURA 15 - Turbinas axiais (fonte: SOUZA et al., 1999)

2.5 GERADORES

As máquinas elétricas (geradores e motores) funcionam de acordo com o princípio da indução eletromagnética, descoberto por Michael Faraday em 1831. A indução eletromagnética é o fenômeno através do qual uma força eletromotriz, ou tensão, é gerada quando um corpo é exposto a um campo magnético variável, sendo a tensão proporcional à variação do campo. Quando esse corpo é um condutor, surge juntamente à tensão, uma corrente induzida (FITZGERALD et al., 1975).

Os geradores elétricos utilizados em centrais hidrelétricas são basicamente de dois tipos: síncronos ou assíncronos (SOUZA et al., 1999).

2.5.1 GERADORES SÍNCRONOS

Os geradores síncronos operam com velocidade constante, sincronizada à frequência da tensão alternada aplicada em seus terminais. A variação do campo magnético necessária à indução eletromagnética é obtida através da rotação do componente denominado rotor, constituído de material ferromagnético envolto em um enrolamento. Esse enrolamento é chamado de enrolamento de campo, tendo a função de produzir um campo magnético constante que irá interagir com o campo produzido pelo enrolamento do estator (excitação). Este, por sua vez, é montado, de forma fixa, entorno do rotor, sendo também constituído de material ferromagnético envolto em um conjunto de enrolamentos distribuídos ao longo de sua circunferência. Os enrolamentos do estator são alimentados por tensões alternadas.

O gerador síncrono recebe energia mecânica (potência de eixo) vinda da

turbina, cuja rotação deve ser constante e controlada, uma vez que a frequência da tensão trifásica é função dessa velocidade. Como já mencionado, o enrolamento de campo do rotor deve ser alimentado por uma fonte de tensão contínua, de forma que, ao girar, o campo magnético gerado pelos pólos do rotor tenha um movimento relativo aos condutores dos enrolamentos do estator. Esse movimento relativo produz a variação do campo magnético necessária à indução de tensão em seus terminais, de acordo com a lei de Faraday (FITZGERALD et al., 1975).

2.5.2 GERADORES ASSÍNCRONOS OU DE INDUÇÃO

Os geradores de indução trabalham com rotações um pouco diferentes da rotação síncrona. Podem possuir rotores bobinados, com anéis e escovas, ou do tipo gaiola de esquilo, sendo este último preferido por questões de manutenção e robustez (SOUZA et al., 1999). Para que o gerador de indução possa converter a potência de eixo em potência ativa, é necessário fornecê-lo potência reativa, uma vez que ele é desprovido de enrolamento de campo, propriamente dito. Essa potência reativa pode ser fornecida pela rede, no caso de um sistema interligado, ou por um banco de capacitores. Quando se deseja operar com tensão e frequência constante, porém com velocidade variável, deve-se utilizar um gerador de indução bobinado, conseguindo-se a excitação através de um cicloconversor (CHAPALLAZ et al., 1992).

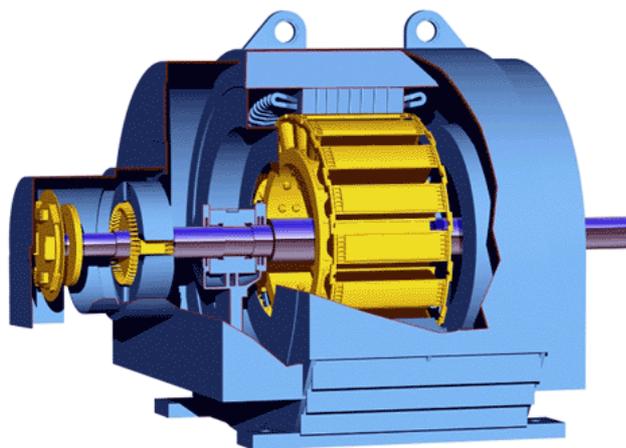


FIGURA 16 - Gerador de indução (fonte: UNESP, 2007)

3 BOMBAS HIDRÁULICAS E MOTORES DE INDUÇÃO

3.1 BOMBAS HIDRÁULICAS

As bombas hidráulicas são classificadas em três tipos, sendo estes definidos pela geometria do rotor e, conseqüentemente, pelo seu campo de operação. São elas, de acordo com Viana et al. (2001):

- Bombas centrífugas ou radiais: o escoamento ocorre, predominantemente, num plano perpendicular ao eixo. Aplicadas para baixas vazões e grandes alturas;
- Bombas de fluxo misto: o escoamento ocorre, simultaneamente, no sentido axial e radial. Operam com vazões e alturas médias;
- Bombas axiais: a direção do escoamento é predominantemente paralela ao eixo.

A geometria do rotor, assim como nas turbinas hidráulicas, é definida pelo n_{qA} ⁸, apresentado na equação 1. A figura abaixo ilustra o campo de aplicação dos três tipos de bombas hidráulicas, em função do n_{qA} :

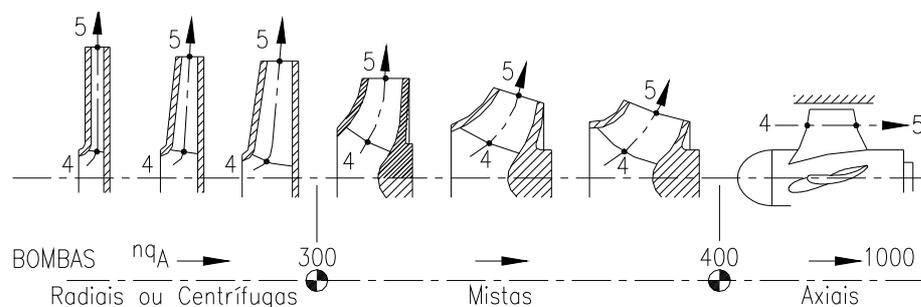


FIGURA 17 - Campo de funcionamento de bombas hidráulicas

⁸ No caso de bombas, deve-se substituir na expressão do n_{qA} , o parâmetro H_L pela altura total de elevação.

As bombas podem ser classificadas também como de simples ou dupla sucção. As bombas de dupla sucção, cujo rotor é dito gêmeo, tem a função de dobrar a vazão recalçável, para uma mesma altura de elevação, de forma análoga a uma associação de bombas duas bombas iguais em paralelo.

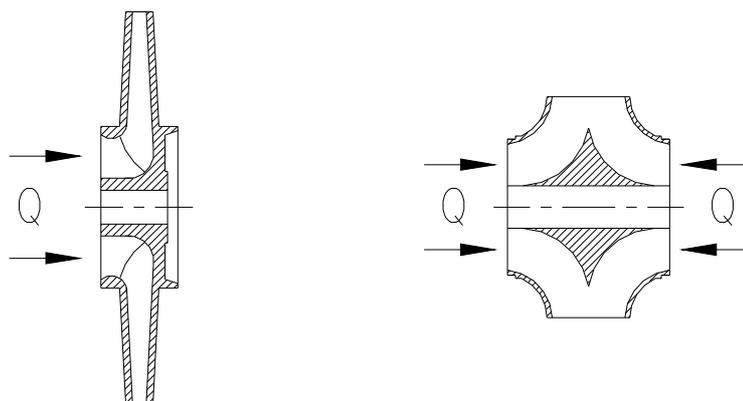


FIGURA 18 - Rotores de simples e dupla sucção

Quando se necessita fornecer mais pressão ao sistema, para uma mesma vazão, pode-se utilizar bombas de vários estágios, que consistem na combinação de vários rotores em uma mesma máquina. O resultado obtido é semelhante ao de uma associação de bombas em série, conforme figura a seguir:

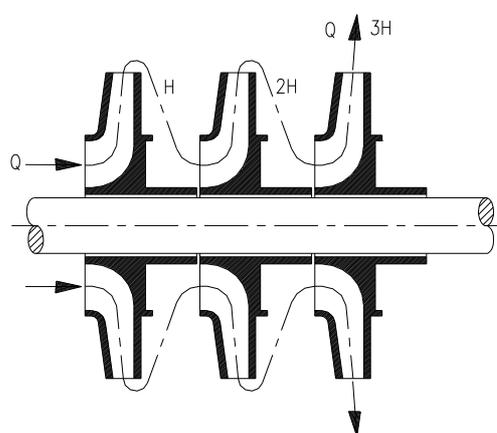


FIGURA 19 - Bomba com três estágios

Os rotores podem ainda ser do tipo fechado, semi-aberto e aberto, sendo os dois últimos utilizados em aplicações específicas, como por exemplo, em situações onde o fluído recalçado possua material sólido em suspensão.

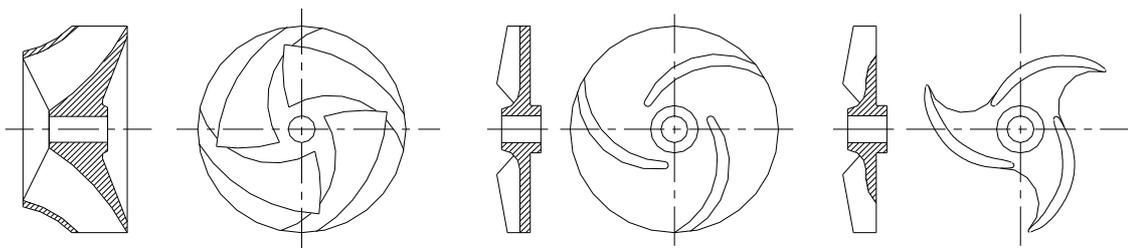


FIGURA 20 - Rotores fechados, semi-abertos e abertos

A figura 21 ilustra os principais componentes e detalhes construtivos de uma bomba centrífuga, sendo eles: corpo espiral (1), anel de desgaste (2 e 3), anel centrifugador (4), indicador de nível de óleo (5), rolamento (6), tampa de mancal (7), tampa de sucção (8), rotor (9), chaveta (10), luva protetora do eixo (11), eixo (12), suporte de mancal (13) e anel de junta radial do eixo (14).

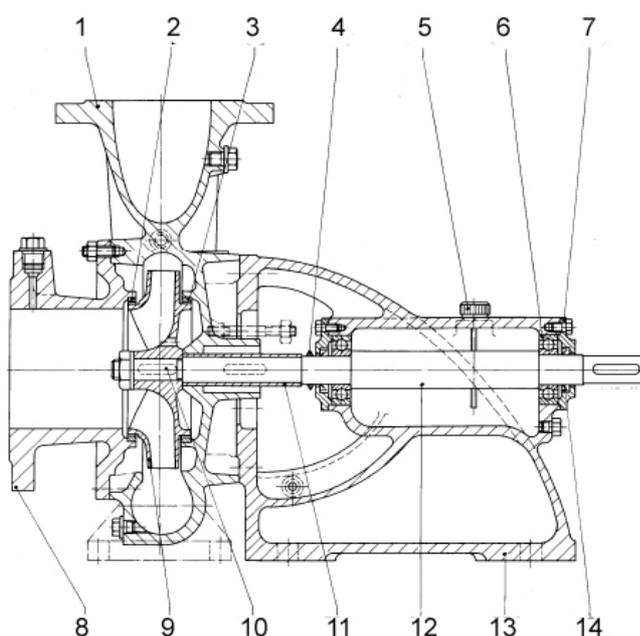


FIGURA 21 - Aspectos construtivos de uma bomba centrífuga (fonte: adaptado de KSB, ca. 2005)

3.2 MOTORES DE INDUÇÃO

Motores de indução são máquinas que apresentam aspectos construtivos extremamente semelhantes ao de geradores de indução, realizando, porém, o processo oposto de conversão (MARQUES et al., 2006). Funcionam normalmente com velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo, é o tipo de motor mais utilizado, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas e aplicações práticas (BORTONI, 2006).

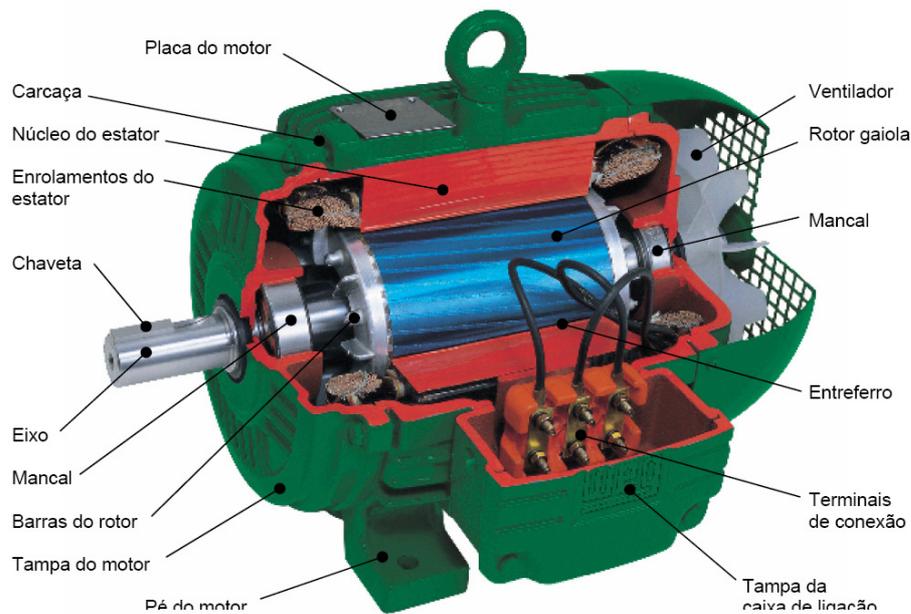


FIGURA 22 - Aspectos construtivos de um motor de indução (fonte: MARQUES et al., 2006)

Assim como um gerador, é composto basicamente de duas partes: o estator (parte fixa) e o rotor (parte móvel). O espaço entre o estator e o rotor é denominado entreferro. O estator é composto de chapas finas de material ferromagnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e

histerese. Estas chapas têm o formato de um anel com ranhuras internas de tal maneira que possam ser alojados enrolamentos, os quais por sua vez, quando em operação, deverão criar um campo magnético no estator. O rotor também é composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente, com o formato também de anel, e com os enrolamentos alojados longitudinalmente (BORTONI, 2006).



FIGURA 23 - Enrolamentos imbricado e ondulado (fonte: BORTONI e SANTOS, ca. 2000)



FIGURA 24 - Rotores tipo gaiola e bobinado (fonte: BORTONI; SANTOS, ca. 2000)

O motor de indução funciona a partir da formação de um campo girante, obtido quando os enrolamentos do estator (separados espacialmente por ângulos de

120°) são percorridos por correntes elétricas defasadas temporalmente de 120°. O movimento relativo do campo girante sobre os enrolamentos do rotor estacionário faz com que apareça uma tensão induzida neste enrolamento (segundo a Lei de Faraday), gerando uma corrente que irá circular pelo rotor. A interação do campo girante com a corrente induzida no rotor, por sua vez, dá origem à Força de Lorentz (BORTONI, 2006), conforme a figura 25:

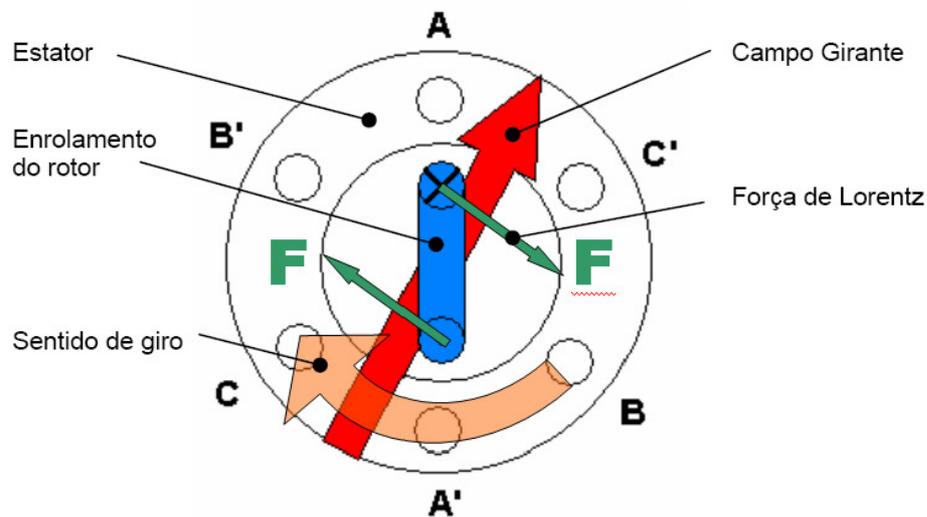


FIGURA 25 - Força de Lorentz em um motor (fonte: BORTONI; SANTOS, ca. 2000)

À medida que a velocidade aumenta, as velocidades do rotor e do campo girante tendem a se igualar, anulando o movimento relativo que induz a tensão no rotor e, conseqüentemente, a força de Lorentz. Para isso, é necessário que o motor de indução seja assíncrono, ou seja, opere com uma pequena diferença entre a velocidade operativa e a síncrona, garantindo a ocorrência dos fenômenos citados (BORTONI, 2006).

4 BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA

O grupo gerador, formado por uma turbina hidráulica, gerador e regulador de velocidade, é um dos componentes mais importantes de uma central hidrelétrica, podendo representar até 40 % de seu custo global (TIAGO FILHO, ca. 1990). Dessa forma, quando se pretende reduzir os custos de implantação de uma MCH, o grupo gerador passa a constituir um importante objeto de estudo.

O alto custo dos grupos geradores recai principalmente sobre as turbinas hidráulicas, devido à existência de poucos fabricantes nacionais, e pelas especificidades de cada aproveitamento. Na maioria dos casos, as turbinas são produzidas individualmente, de acordo com os parâmetros de projeto da central considerada.

Por outro lado, bombas hidráulicas são equipamentos produzidos em série, utilizadas amplamente na agricultura (irrigação), saneamento e indústria. Conseqüentemente, o custo de uma bomba tende a ser inferior ao de uma turbina, com potências e dimensões semelhantes.

Analisando-se os aspectos construtivos e hidráulicos de bombas e turbinas, percebe-se que estes equipamentos são bastante semelhantes, desempenhando, porém, processos opostos. Bombas são máquinas geratrizes, ou seja, convertem a energia mecânica (de eixo), fornecida pelo motor, primeiramente em energia cinética (de velocidade) e, finalmente, em energia de pressão. Já uma turbina realiza o processo oposto, convertendo a energia hidráulica disponível em potência de eixo, sendo considerada uma máquina motriz, conforme figura 26:

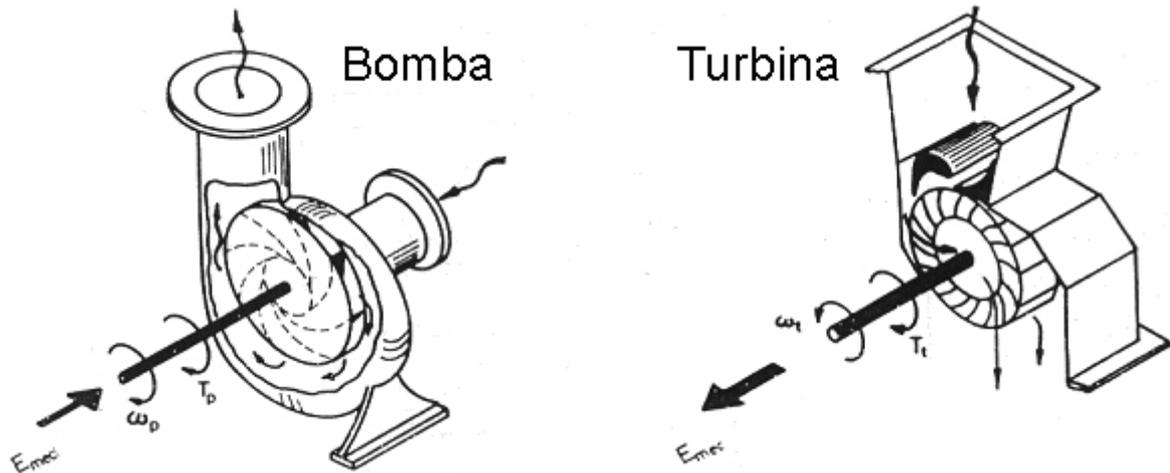


FIGURA 26 - Analogia entre bombas e turbinas (fonte: CHAPALLAZ et al., 1992b)

Motivados pelos fatores apresentados anteriormente, alguns pesquisadores passaram a estudar a utilização de bombas funcionando como turbina (BFTs), para a substituição de turbinas convencionais, principalmente em centrais hidrelétricas de pequeno porte. Essa alternativa, apesar de ainda pouco difundida, já é conhecida há várias décadas como comprovam, por exemplo, os trabalhos Kittredge⁹ (1961 apud VIANA, 1987). No Brasil, os primeiros estudos sobre BFTs foram desenvolvidos por Viana (1987), na então Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), atual Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Chapallaz et al. (1992b) e Willians (2003) enumeram uma série de vantagens da utilização de BFTs em substituição às turbinas convencionais, sendo elas:

- Vantagens econômicas: como já mencionado, bombas são mais baratas que turbinas, uma vez que seu mercado consumidor é muito amplo, ocorrendo, portanto, produção em massa, o que não acontece com turbinas;
- Disponibilidade: a disponibilidade de bombas e suas peças de reposição é muito

⁹ KITTREDGE, C. P. Centrifugal pumps used as hydraulic turbines. *Journal of Engineering for Power*, [S. l.], jan. 1961.

- maior do que de turbinas, principalmente em países em desenvolvimento;
- Construção: bombas são simples e robustas, não exigindo conhecimento técnico altamente qualificado para sua manutenção;
 - Bombas e motores podem ser adquiridos em conjunto, formando um grupo gerador completo;
 - Bombas apresentam uma ampla faixa de tamanhos e potências, atendendo aos mais diversos tipos de aproveitamento hidrelétrico;
 - O tempo de entrega de bombas é infinitamente menor que o de turbinas;
 - A instalação de grupos moto-bomba é mais simples que a de grupos geradores convencionais;
 - Grupos moto-bomba, com acoplamento direto, reduzem as perdas na transmissão de potência através de correias, por exemplo.

O fato das bombas hidráulicas não serem produzidas especificamente para a geração de energia (operação em reverso) impõe alguns problemas quando estas são usadas como turbinas. O principal inconveniente é a não existência de sistemas de regulação de vazão. Esses sistemas têm a finalidade de manter a velocidade (rotação) do grupo gerador praticamente constante, mesmo quando a carga (demanda) da rede à qual o grupo está conectado varia.

A constância na velocidade do grupo gerador é uma necessidade tanto hidráulica (evitando, por exemplo, o disparo da turbina durante uma rejeição brusca da carga), quanto elétrica, uma vez que a rede e os equipamentos a ela interligados possuem uma frequência padrão. Segundo Macintyre (1983), um sistema de regularização de velocidade é composto basicamente por:

- Um órgão operador, que atua diretamente sobre o agente motor (no caso, a água). Em turbinas Francis e axiais, o órgão operador corresponde ao distribuidor, e em turbinas Pelton, ao bico injetor e agulha;
- Um regulador propriamente dito, que detecta a variação da velocidade e emite o comando para o mecanismo de transmissão;
- Um mecanismo de transmissão, que atua sobre o órgão operador. Em função dos grandes esforços necessários à movimentação dos distribuidores e agulhas, são empregados servo motores hidráulicos na transmissão.

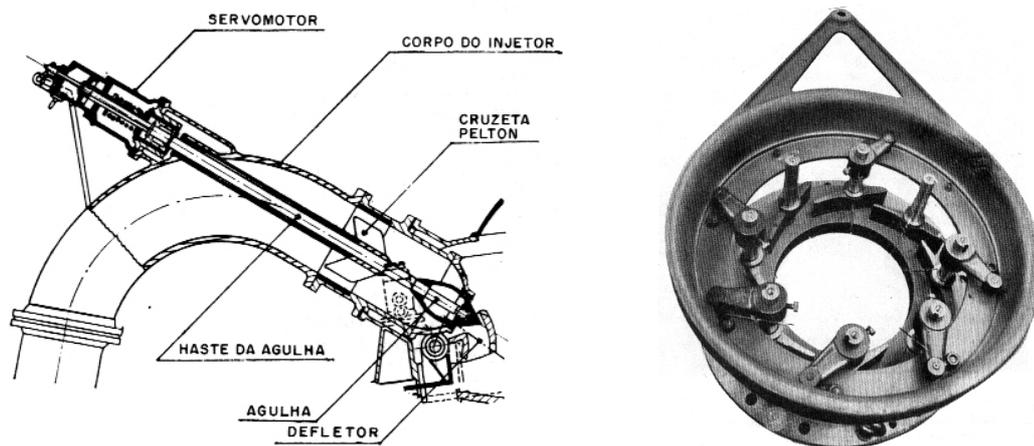


FIGURA 27 - Bico injetor (turbinas Pelton) e distribuidor (Turbina Francis) (fonte: Macintyre, 1983)

A inexistência do sistemas de regulação de velocidade em BFTs faz com que o equipamento, teoricamente, seja obrigado a operar com potência constante, não admitindo variações de carga (a não ser que se utilize um regulador de carga). Além disso, deve-se tomar cuidado especial durante os estudos hidrológicos do aproveitamento para a definição da vazão de projeto, uma vez que o rendimento de BFTs cai drasticamente quando estas não operam sob as condições para as quais elas foram selecionadas. Nesse sentido, considerando o fato de que microcentrais hidrelétricas quase sempre operam em sistemas isolados, a vazão de projeto deve

ser aquela que permita à central operar com um fator de capacidade próximo a 100%, considerando não somente a demanda e a sazonalidade das vazões, mas também, a faixa operativa da BFT. Uma forma de se atender a aproveitamentos cuja variação da vazão apresenta grande amplitude ao longo do ano hidrológico é a utilização de várias BFTs operando em paralelo.

Para a partida e parada de uma BFT, recomenda-se a instalação de uma válvula borboleta na entrada (VIANA, 2002).

A figura a seguir ilustra o campo de aplicação dos diferentes tipos de bombas para a operação como turbina, na faixa de 1 a 1.000 kW, permitindo a pré-seleção em função da vazão e queda:

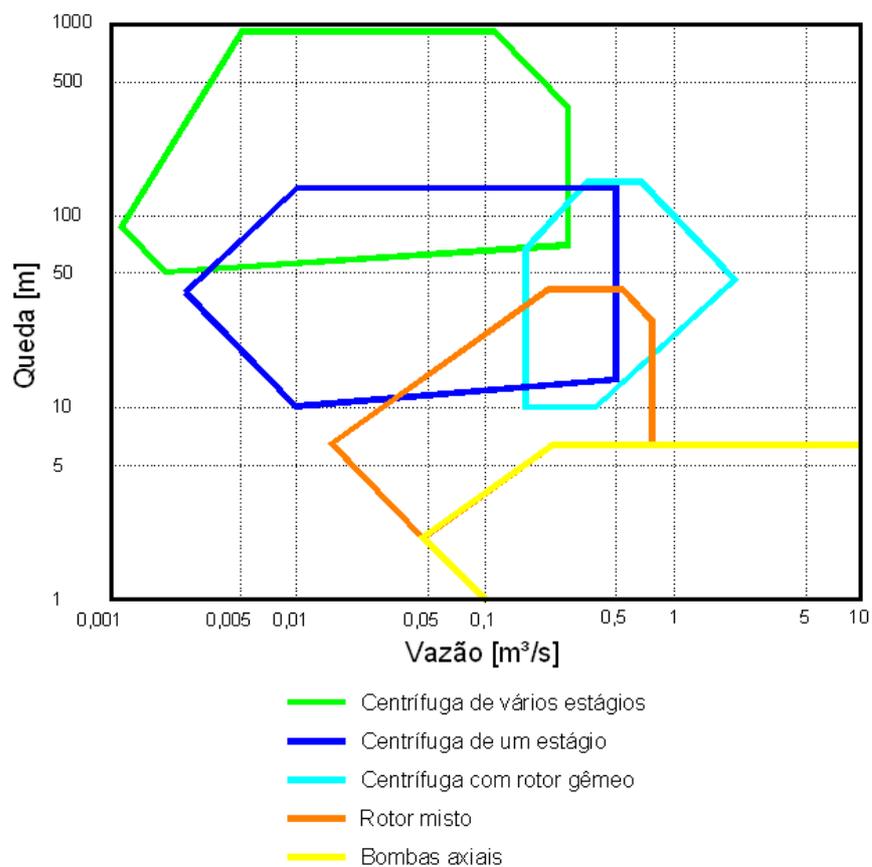


FIGURA 28 - Pré-seleção de BFTs (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992b)

Quando ocorre a inversão do escoamento para que uma bomba funcione como turbina, os triângulos de velocidade se invertem. As figuras 29 e 30 apresentam uma comparação entre o escoamento em rotores de bombas e BFTs:

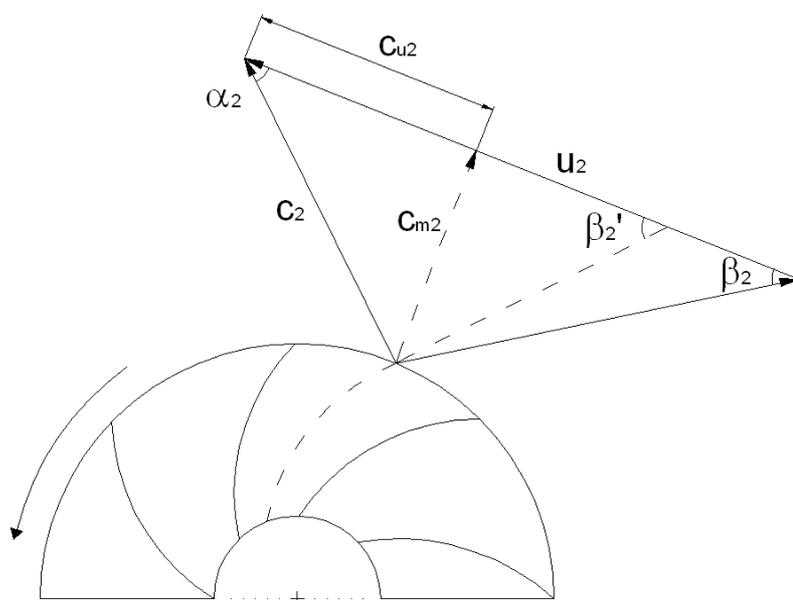


FIGURA 29 - Triângulo de velocidades de bomba centrífuga funcionando como bomba

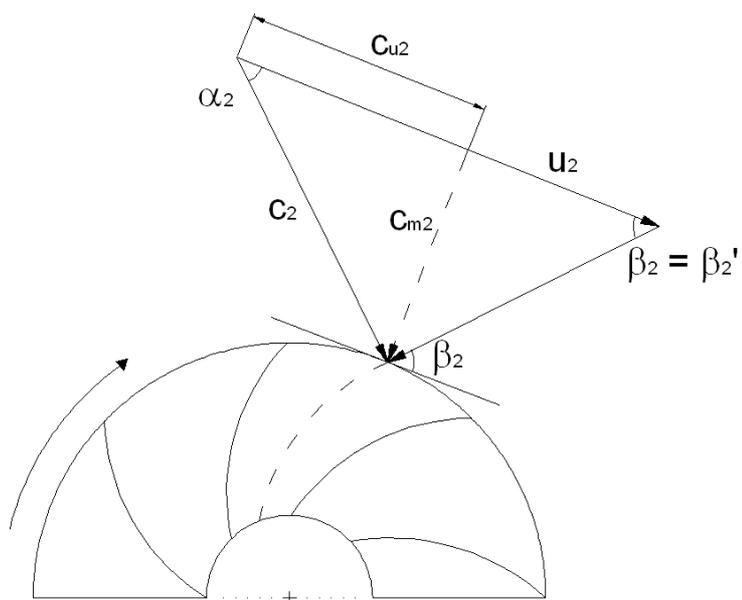


FIGURA 30 - Triângulo de velocidades de BFT

Nas figuras, β_2 representa os ângulos de entrada do escoamento na BFT e de saída na bomba funcionando com bomba, para a mesma rotação e em direções opostas. Quando a bomba passa a operar como turbina, a inversão dos triângulos de velocidade ocasionará choques do fluxo nas pás do rotor, provocando redução do rendimento da BFT, para a mesma rotação. Para se compensar a queda do rendimento, devem-se adotar procedimentos específicos no momento da seleção de uma BFT, sendo estes abordados a seguir.

4.1 COMPORTAMENTO HIDRÁULICO

São várias as abordagens e os autores que investigaram o comportamento hidráulico de BFTs, visando a definição de padrões que possibilitassem a seleção destes equipamentos para aplicação prática em centrais hidrelétricas. De forma geral, todos os trabalhos convergem para os seguintes pontos:

- O rendimento de uma BFT é inferior, ou no máximo, igual¹⁰ ao da bomba funcionando como tal;
- A BFT deve operar com vazão e queda superior aos valores nominais da bomba (com a mesma rotação), para se obter o mesmo rendimento.

Estudos teóricos de Stepanoff (1962)¹¹ indicam que a vazão e queda de BFTs atendem às seguintes relações:

¹⁰ Nos trabalhos experimentais de Viana (1987), em determinadas condições, as BFTs apresentaram rendimentos superiores ao da operação como bomba.

¹¹ STEPANOFF, A. T. **Centrifugal and axial flow pumps**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1957. ISBN 471-82137-3.

$$H_{nt} = \frac{H_{nb}}{\eta_{nb}} \quad (2)$$

$$Q_{nt} = \frac{Q_{nb}}{\sqrt{\eta_{nb}}} \quad (3)$$

sendo:

H_{nt} queda nominal da BFT [m];

H_{nb} queda nominal da bomba [m];

η_{nb} rendimento nominal da bomba [%];

Q_{nt} vazão nominal da BFT [m³/s];

Q_{nb} vazão nominal da bomba [m³/s].

O termo “nominal” diz respeito aos pontos de maior eficiência. Ensaios mais recentes demonstram que as relações de Stepanoff (1962) apresentam grande discrepância, não devendo ser utilizadas em projetos (CHAPALLAZ et al., 1992b).

Chapallaz et al. (1992b) cita um outro método, empírico, desenvolvido experimentalmente no México, denominado BUTU (abreviação de bomba funcionando como turbina, em espanhol). Neste, as relações entre potências de bombas funcionando como bombas e como turbinas foram correlacionadas, obtendo-se, por regressão, as seguintes equações:

$$\frac{P_{hnb}}{P_{hnt}} = 2 \cdot \eta_{nb}^{9,5} + 0,205 \quad (4)$$

$$\frac{H_{nb}}{H_{nt}} = 0,85 \cdot \eta_{nb}^5 + 0,385 \quad (5)$$

$$\eta_{nt} = \eta_{nb} - 3 \quad (6)$$

com:

P_{hnb} potência hidráulica nominal da bomba [W];

P_{hnt} potência hidráulica nominal da BFT [W];

η_{nt} rendimento nominal da BFT [%];

η_{nb} rendimento nominal da bomba [%];

Para operação fora do ponto de melhor rendimento, a metodologia impõe as seguintes equações:

$$\omega_{st} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{nt} \cdot \sqrt{\frac{P_{nt}}{\rho}}}{60 \cdot (g \cdot H_{nt})^{\frac{5}{4}}} \quad (7)$$

$$k = \frac{-1}{0,96 \cdot (\omega_{st} - 0,2)^{-0,92} + 0,13} \quad (8)$$

$$\frac{P_t}{P_{nt}} = (1-k) \cdot \left(\frac{Q_t}{Q_{nt}}\right)^2 + k \cdot \left(\frac{Q_t}{Q_{nt}}\right) \quad (9)$$

$$\frac{P_{ht}}{P_{hnt}} = \frac{e^{\left(0,37 \cdot \frac{P_t}{P_{nt}} - 1\right)} - 1}{0,37} + 1 \quad (10)$$

onde:

ω_{st} coeficiente de BUTU 1;

k coeficiente de BUTU 2;

n_{nt} rotação nominal da BFT [rps];

P_{nt}	potência de eixo nominal da BFT [W];
ρ	massa específica da água [kg/m ³];
g	aceleração da gravidade [m/s ²];
H_{nt}	queda nominal da BFT [m];
P_t	potência de eixo da BFT [W];
Q_t	vazão da BFT [m ³ /s];
Q_{nt}	vazão nominal da BFT [m ³ /s];
P_{ht}	potência hidráulica da BFT [W];
P_{hnt}	potência hidráulica nominal da BFT [W];

Segundo Chapallaz et al. (1992b), o método BUTU pode apresentar erros da ordem de 10 % em relação aos rendimentos determinados.

Willians (2003) apresenta uma metodologia simples, desenvolvida na Índia, para a seleção de BFTs, sendo que o rendimento da BFT se iguala ao rendimento máximo da bomba operando como bomba, quando obedecidas as seguintes condições:

$$Q_t = \frac{Q_{pmrb}}{\eta_{bm\acute{a}x}^{0,8}} \quad (11)$$

$$H_t = \frac{H_{pmrb}}{\eta_{bm\acute{a}x}^{1,2}} \quad (12)$$

sendo:

Q_t	vazão da BFT [m ³ /s];
Q_{pmrb}	vazão da bomba no ponto de melhor rendimento [m ³ /s];
$\eta_{bm\acute{a}x}$	rendimento máximo da bomba [%];

H_t queda da BFT [m];

$H_{p\text{mrb}}$ altura da bomba no ponto de melhor rendimento [m];

Percebe-se que as três metodologias até então apresentadas se baseiam na relação entre os parâmetros hidráulicos (vazão e queda) e o rendimento de bombas e BFTs. Em 1961, Kittredge deu início a pesquisas em torno da influência da rotação específica sobre a eficiência de BFTs, sendo este tipo de estudo desenvolvido posteriormente, também, por Shafer e Agostinelli (1981)¹², Bonadé (1980)¹³, Buse (1981)¹⁴, entre outros. Viana (1987), citando Shafer e Agostinelli (1981) e Bonadé (1980), diz que “[...] na operação da bomba centrífuga como turbina, na mesma rotação, a vazão e altura aumentam com relação ao funcionamento como bomba, para se obter o mesmo rendimento.”. Ainda, segundo Viana (1987), “A comparação entre os resultados de Shafer e Agostinelli (1981) com os de Bonadé (1980), mostram que o aumento da altura e da vazão é função do tipo de bomba, ou seja, da rotação específica.”.

Pioneiro no estudo de BFTs no Brasil, Viana (1987) ensaiou bombas funcionando como bomba e como turbina, com rotações de 1400 e 1650 rpm, buscando obter coeficientes de ajuste de vazão e queda, nos mesmos moldes dos trabalhos de Buse (1981), Bonadé (1981) e Kittredge (1961). Os coeficientes, calculados conforme as equações abaixo, foram obtidos da correlação entre vazões e alturas/quedas nos pontos de melhor rendimento, tanto da bomba, quanto da BFT.

¹² SHAFER, L.; AGOSTINELLI, A. Using pumps as small turbines. **Water power & dam construction**. [S.l.], 1981.

¹³ BONADÉ, A. **Microcentrales hydroélectriques, techniques de l'ingenieur**: Pompe centrifuge fonctionnant em turbine. [S.l.: s.n.], 1980.

¹⁴ BUSE, F. Using centrifugal pumps as hydraulic turbines. **Chemical engineering**, [S.l.], jan. 1981.

$$k_a = \frac{H_b}{H_t} \quad (13)$$

$$k_q = \frac{Q_b}{Q_t} \quad (14)$$

com:

k_a coeficiente de altura/queda [1];

H_b altura da bomba no ponto de melhor rendimento [m];

H_t queda da BFT no ponto de melhor rendimento [m];

k_q coeficiente de vazão [1];

Q_b vazão da bomba no ponto de melhor rendimento [m³/s];

Q_t vazão da BFT no ponto de melhor rendimento [m³/s].

A tabela abaixo compara os resultados dos experimentos dos autores citados, conforme o trabalho de Viana (1987):

TABELA 1 - Resultados experimentais de Viana

	Buse	Viana 1400 rpm	Viana 1650 rpm	Bonadé	Kittredge
n_{qa} (bomba)	75	138	138	180	195
n_{qa} (turbina)	64	88	95	-	187
k_a	0,704	0,629	0,526	0,741	0,700
k_q	0,807	0,873	0,816	0,714	0,641

Fonte: adaptado de Viana (1987)

Nos ensaios de Viana (1987), o ponto de melhor rendimento da bomba

apresentou uma eficiência de 65% (para 1650 rpm). Surpreendentemente, o rendimento para BFT, a 1400 rpm, foi de 72%.

No ano de 1982, a fabricante de bombas Worthington publicou um documento no qual apresentava os ensaios de inúmeras bombas de sua linha funcionando como turbina (WORTHINGTON GROUP, 1982). Extraíndo-se dados das curvas do documento citado (vide apêndice A), levantaram-se os coeficientes de vazão e altura para BFT (através dos pontos de melhor rendimento das bombas e BFTs), seguindo a mesma metodologia de Viana (1987). Os resultados são condensados nos gráficos abaixo:

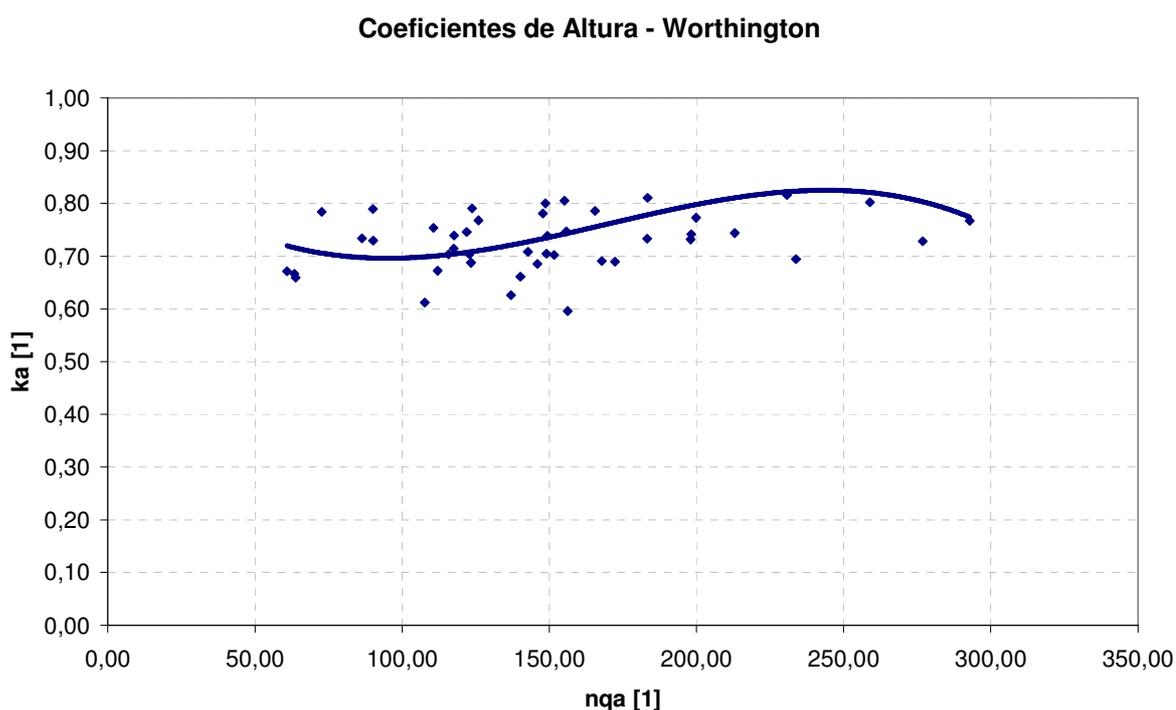


FIGURA 31 - Coeficientes de altura – Worthington

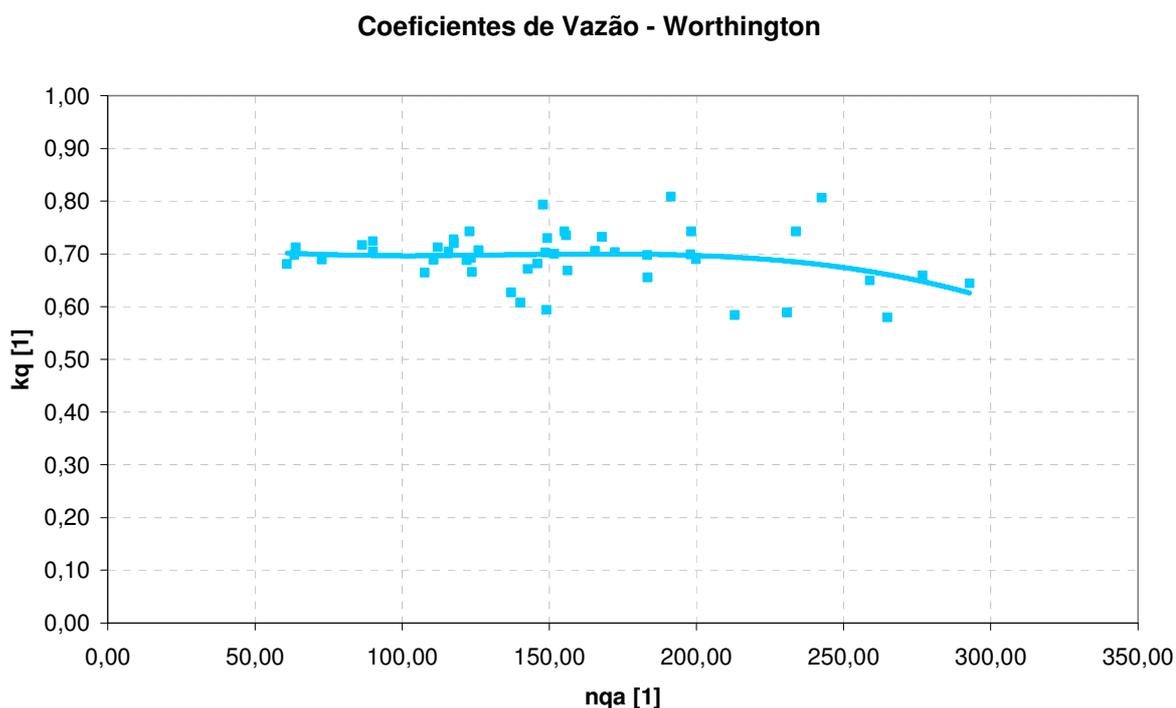


FIGURA 32 - Coeficientes de vazão – Worthington

Dos ensaios da Worthington (1982), obtém-se um coeficiente de altura médio de 0,74, com desvio padrão de 0,101. A média dos coeficientes de vazão é 0,69, para um desvio padrão de 0,052. Percebe-se uma extrema semelhança entre esses valores e aqueles apresentados na tabela 1. Ainda utilizando os dados da Worthington (1982), tentou-se estabelecer uma relação linear entre os máximos rendimentos das bombas funcionando como bomba (BFB) e BFTs, conforme a figura 33. Na figura, percebe-se que o rendimento das bombas operando como turbina, na mesma rotação, foram sempre inferiores aos da bomba operando como tal. As BFTs alcançaram um rendimento médio 6,1 % inferior ao das respectivas BFBs. O pior desempenho das BFTs ensaiadas foi 11 % inferior, e o melhor, 1,5 %.

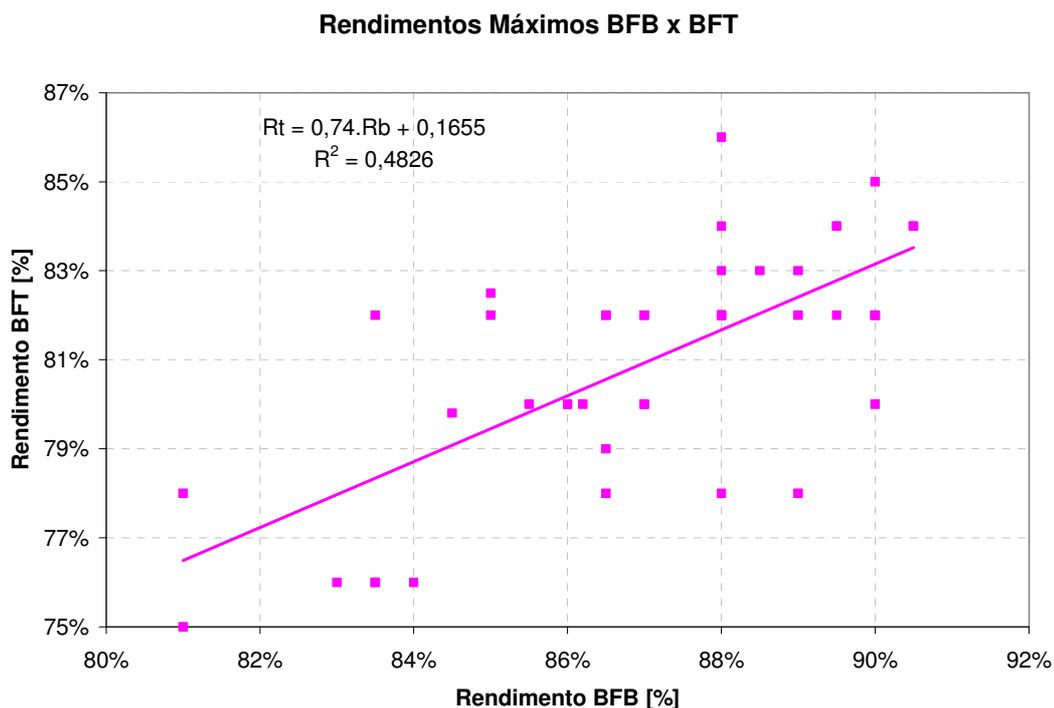


FIGURA 33 - Relação entre rendimentos de bombas e BFTs

4.2 MÉTODOS DE SELEÇÃO DE BFTS

São apresentadas a seguir, duas metodologias práticas para a seleção de BFTs.

4.2.1 MÉTODO DE VIANA

O método de seleção de BFTs desenvolvido por Viana (1987) consiste na definição da altura e vazão de bombas comerciais para operar em reverso, através da utilização de coeficientes obtidos experimentalmente pelo autor, e nos trabalhos de Kittredge (1961) e Buse (1981), sendo estes relacionados ao n_{qA} da BFT. O método é aplicável para n_{qA} na faixa de 40 a 200, sendo os coeficientes obtidos na

figura 34:

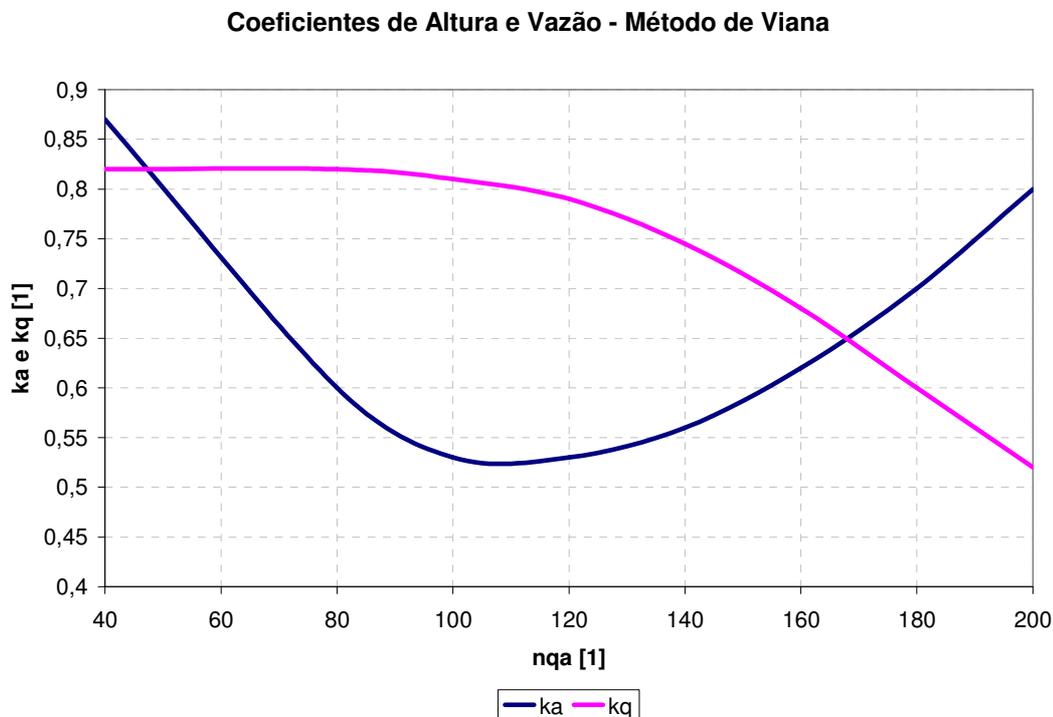


FIGURA 34 - Coeficientes de Viana (fonte: adaptado de VIANA; NOGUEIRA, 1990)

Dadas a vazão de projeto (Q_t) e a queda líquida do aproveitamento (H_L), calcula-se o n_{qA} , através da Equação (1), utilizando-se inicialmente a rotação (n_t) de 3600 rpm¹⁵. Caso a rotação específica não se encontre dentro da faixa de 40 a 200, recalcula-se o n_{qA} utilizando $n_t = 1800$ rpm. Com o n_{qA} , determinam-se na figura 34 os coeficientes de altura (k_a) e vazão (k_q). De posse dos coeficientes, seleciona-se, em gráficos fornecidos pelo fabricante, a BFT para o aproveitamento, sendo:

$$H_b = H_L \cdot k_a \quad (15)$$

¹⁵ As rotações de 3600 e 1800 rpm são adotadas prioritariamente por questões econômicas: quanto maior a rotação, mais barato será o grupo BFT/MIG. Em função das características do aproveitamento, pode-se adotar rotações síncronas inferiores.

$$Q_b = Q_t \cdot k_q \quad (16)$$

sendo:

H_b altura da bomba [m];

H_L queda líquida da BFT [m];

k_a coeficiente de altura de Viana [1];

Q_b vazão da bomba [m^3/s];

Q_t vazão de projeto da BFT [m^3/s];

k_q coeficiente de vazão de Viana [1];

Como as bombas geralmente operam com rotações um pouco diferentes de 1800 e 3600 rpm, deve-se corrigir a altura e vazão encontradas para a rotação nominal da bomba, com as fórmulas de afinidade:

$$H_{bc} = \left(\frac{n_{nb}}{n_t} \right)^2 \cdot H_b \quad (17)$$

$$Q_{bc} = \frac{n_{nb}}{n_t} \cdot Q_b \quad (18)$$

onde:

H_{bc} altura da bomba corrigida para a rotação nominal [m];

n_t rotação da BFT [preferencialmente 1800 ou 3600 rpm];

n_{nb} rotação nominal da bomba [rpm];

H_b altura da bomba [m];

Q_{bc} vazão da bomba corrigida para a rotação nominal [m^3/s];

Q_b vazão da bomba [m^3/s].

O rendimento da BFT será, teoricamente, o mesmo da bomba no ponto selecionado. Finalmente, para se evitar os efeitos da cavitação¹⁶, deve-se estipular a altura máxima de sucção da BFT, de acordo com as seguintes fórmulas, extraídas de Souza (1992):

$$\sigma = 0,0245 \cdot e^{0,00833 \cdot n_{qa}} \quad (19)$$

$$H_{sm\acute{a}x} = 10 - 0,00122 \cdot z - \sigma \cdot H_L \quad (20)$$

com:

σ coeficiente de cavitação de Thoma, para turbinas Francis [1];

n_{qa} rotação específica da BFT [1];

$H_{sm\acute{a}x}$ altura máxima de sucção [m];

z cota topográfica do nível mínimo do canal de fuga [m];

H_L queda líquida [m].

4.2.2 MÉTODO DE CHAPALLAZ

A metodologia proposta por Chapallaz et al. (1992b) assemelha-se à de Viana (1987), sendo, porém, aplicável a uma faixa maior de rotações específicas. Adotando-se a rotação da BFT de 1800 rpm¹⁷, define-se sua rotação específica no sistema técnico (n_{qt}):

¹⁶ Formação e implosão de bolhas, quando a pressão absoluta em determinado ponto (por exemplo, no tubo de sucção), atinge a pressão de vapor da água, produzindo vibração e desgaste (erosão cavital) nos equipamentos.

¹⁷ Assim como no método de Viana, as rotações de 3600 e 1800 rpm são adotadas por questões econômicas, podendo ser reduzidas em função das características do aproveitamento.

$$n_{qt} = n_t \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H_L^{\frac{3}{4}}} \quad (21)$$

sendo:

n_{qt} rotação específica da BFT no sistema técnico [1];

n_t rotação da BFT [rpm];

Q vazão de projeto da BFT [m³/s];

H_L queda líquida do aproveitamento [m].

Determina-se a rotação específica da bomba, conforme a equação abaixo:

$$n_{qbt} = \frac{n_{qt}}{0,89} \quad (22)$$

onde:

n_{qbt} rotação específica da bomba no sistema técnico [1];

n_{qt} rotação específica da BFT no sistema técnico [1].

Estima-se então a vazão da bomba:

$$Q_{nb} = \frac{Q_t}{1,3} \quad (23)$$

com:

Q_{nb} vazão nominal estimada da bomba [m³/s];

Q_t vazão de projeto da BFT [m³/s];

Com a vazão da bomba e sua rotação específica, estima-se o rendimento teórico da BFT, com auxílio da figura 35:

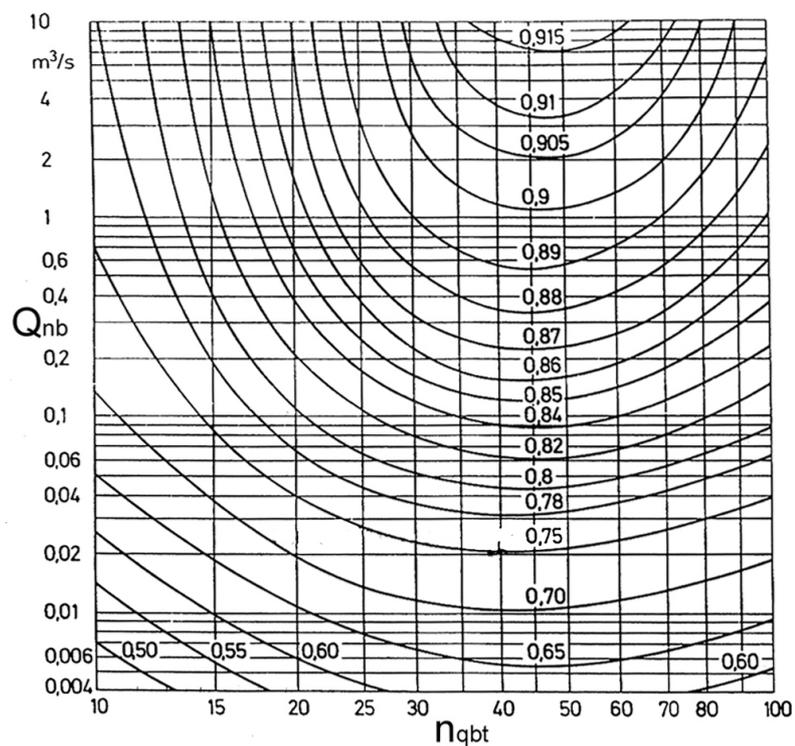


FIGURA 35 - Estimativa de rendimento de BFT (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992b)

Utilizando-se a n_{qbt} e o rendimento teórico, interpolam-se nas figuras 36 e 37 os coeficiente de altura e vazão:

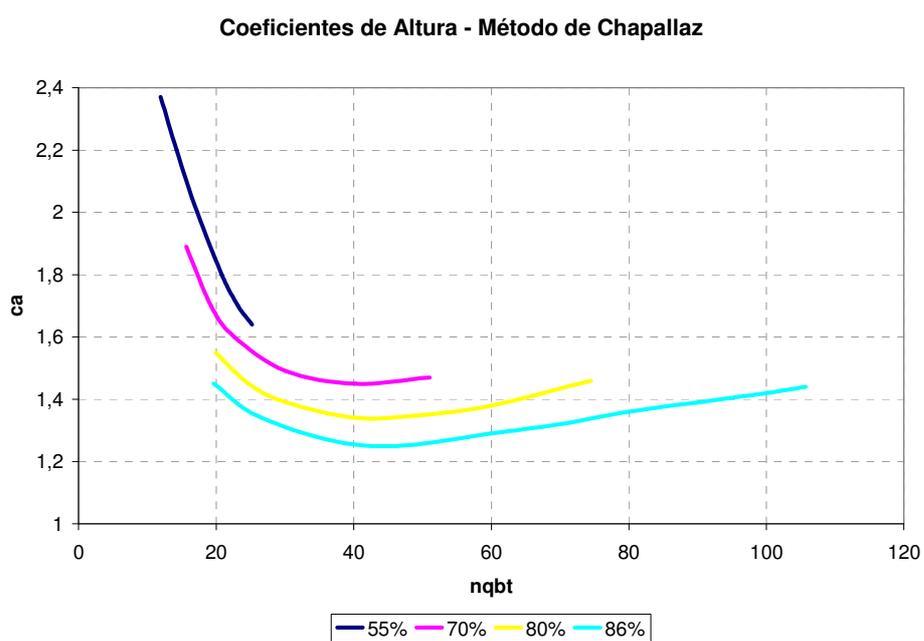


FIGURA 36 - Coeficientes de altura de Chapallaz (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992b)

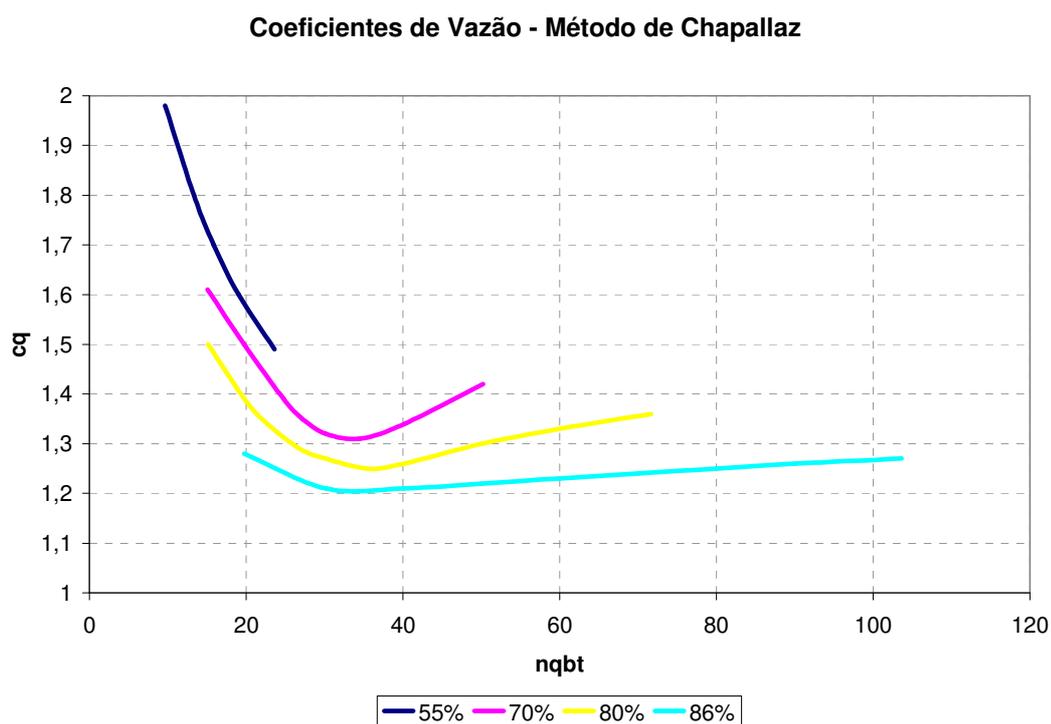


FIGURA 37 - Coeficientes de vazão de Chapallaz (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992b)

Determinam-se, então, a altura e vazão da bomba, através das expressões:

$$H_b = \frac{H_L}{c_a} \quad (24)$$

$$Q_b = \frac{Q_t}{c_q} \quad (25)$$

sendo:

H_b altura da bomba [m];

H_L queda líquida do aproveitamento [m];

c_a coeficiente de altura de Chapallaz [1];

Q_b vazão da bomba [m^3/s];

Q_t vazão de projeto da BFT [m^3/s];

c_q coeficiente de vazão de Chapallaz [1];

Quando necessário, corrigi-se a altura e a vazão estipuladas pelas equações 24 e 25 para a rotação nominal da bomba, de acordo com as leis de afinidades, estipuladas nas equações 17 e 18. Com os valores corrigidos, obtém-se no gráfico do fabricante o rendimento real da BFT, considerado igual ao da bomba no ponto determinado.

Assim como no método de Viana, deve-se definir a altura máxima de sucção da BFT, para se evitar a cavitação, através das equações 19 e 20.

4.3 RECOMENDAÇÕES PARA APLICAÇÃO PRÁTICA DE BFTS

Conforme apresentado na seção 4.1, a seleção de uma bomba para funcionar como turbina consiste basicamente num subdimensionamento da mesma em relação aos parâmetros do aproveitamento. Dessa maneira, para que um equipamento com características padronizadas comercialmente possa operar sem nenhuma alteração em sua estrutura, deve se realizar algumas verificações. Além disso, deve-se valer de alguns artifícios para suprir a ausência do sistema de regulação de velocidade. Descrevem-se, a seguir, as principais verificações e artifícios utilizados para a utilização prática de BFTs.

4.3.1 TENSÃO MÁXIMA NO EIXO DA BFT

A operação da BFT implica num aumento de sua potência de eixo, quando comparado ao funcionamento como bomba. Sendo assim, Viana (1987) propõe a

verificação da máxima sollicitação do eixo, através da inequação abaixo:

$$\tau_{\text{máxe}} < \tau_{\text{adm}} \quad (26)$$

sendo:

$\tau_{\text{máxe}}$ tensão máxima aplicada no eixo [N/m²];

τ_{adm} tensão admissível do material do eixo [N/m²].

A $\tau_{\text{máxe}}$ pode ser calculada pela equação 27:

$$\tau_{\text{máxe}} = 0,81 \cdot \frac{P_e}{n \cdot D_e^3} \quad (27)$$

onde:

$\tau_{\text{máxe}}$ tensão máxima aplicada no eixo [N/m²];

P_e potência de eixo da BFT [W];

n rotação da BFT [rps];

D_e diâmetro do eixo [m].

4.3.2 ROTAÇÃO DE DISPARO

Rotação de disparo é a máxima rotação atingida por uma turbina hidráulica trabalhando em vazio (sem fornecer potência), com o distribuidor totalmente aberto e sem atuação do sistema de regulação de velocidade (SOUZA, 1992). A importância de seu cálculo reside na necessidade de se verificar a rotação manipulada pelo mancal. Souza et al. (1999) recomenda que a rotação de disparo de uma turbina hidráulica, no caso BFT, seja determinada, de forma prática, pela equação 28:

$$n_e = n_{11e} \cdot \frac{\sqrt{H_L}}{D_r} \quad (28)$$

com:

n_e rotação de disparo da turbina [rps];

n_{11e} rotação de disparo do modelo da turbina, calculado em ensaio [rps];

H_L queda líquida do aproveitamento [m];

D_r diâmetro do rotor [m].

4.3.3 TUBO DE SUCÇÃO

Além de permitir que o escoamento atinja o nível de jusante de maneira uniforme, o tubo de sucção, quando em formato tronco-cônico, permite a recuperação de parte da energia cinética do fluído que deixa o rotor. Segundo Chapallaz et al. (1992b), a parcela recuperada dessa energia varia de 5 a 50 %.

O comprimento do tubo de sucção deve ser estimado em função do arranjo da casa de força e da altura máxima de sucção.

Macintyre (1983) recomenda que, para turbinas lentas e normais, a velocidade de saída seja a metade da velocidade de entrada. Com isso, os diâmetros de saída e entrada do tubo de sucção podem ser obtidos pela manipulação da equação da continuidade:

$$D_{ts} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} \quad (29)$$

sendo:

D_{ts} diâmetro do tubo de sucção na seção considerada [m];

- Q vazão turbinada pela BFT [m³/s];
 v velocidade recomendável para o escoamento na seção [m/s].

O mesmo Macintyre (1983) propõe uma fórmula geral para a velocidade na saída do tubo de sucção de turbinas Francis, apresentada a seguir:

$$v_4 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(0,008 + \frac{0,04}{H_L} \right) \cdot H_L} \quad (30)$$

onde:

- v_4 velocidade na saída do tubo de sucção [m/s];
 g aceleração da gravidade [m/s²];
 H_L queda líquida [m].

Considerando BFTs, especificamente, Chapallaz et al. (1992b) propõe as seguintes relações para um dimensionamento econômico do tubo de sucção:

$$v_{4a} = \sqrt{2 \cdot g \cdot 0,05 \cdot H_L} \quad (31)$$

$$v_{4b} = \sqrt{2 \cdot g \cdot f_q \cdot H_L} \quad (32)$$

com:

- v_{4a} velocidade na saída do tubo de sucção para altas quedas ($n_{qt} < 20$) [m/s];
 v_{4b} velocidade na saída do tubo de sucção para baixas quedas ($n_{qt} > 20$) [m/s];
 f_q fator de queda, variando entre 0,01 e 0,03 [1];
 H_L queda líquida [m].

$$L \leq 9 \cdot D_3 \quad (33)$$

sendo:

L comprimento do tubo de sucção [m];

D_3 diâmetro da entrada do tubo de sucção [m].

$$A_4 \leq 4 \cdot A_3 \quad (34)$$

onde:

A_4 área da saída do tubo de sucção [m²];

A_3 área da entrada do tubo de sucção [m²].

$$S_{\min} \geq 0,3[m] \quad (35)$$

com:

S_{\min} submergência ou afogamento mínimo do tubo de sucção [m].

$$F_{\min} \geq 0,6 \cdot D_4 \quad (36)$$

sendo:

F_{\min} distância entre a saída do tubo de sucção e o fundo do canal de fuga [m].

4.3.4 PRESSÃO NA CAIXA ESPIRAL

A pressão hidrostática máxima não deve ser superior a 1,5 vezes a pressão admissível da bomba (VIANA, 1987).

4.3.5 CONTROLE E OPERAÇÃO

A partida de uma BFT ocorre de forma semelhante à de uma turbina convencional, sendo realizada através da válvula de controle ao invés do distribuidor (VIANA, 2002).

Quanto à regulação de velocidade, essa é conseguida de duas formas: pelo controle da vazão turbinada ou pelo controle das cargas. No caso típico de geração em um sistema isolado, a possibilidade de se regular a vazão manualmente, através do estrangulamento da válvula de controle existe, apesar de não se mostrar prática.

A utilização de reguladores eletrônicos de carga juntamente a cargas de lastro é viável, apresentando o inconveniente de não se atuar na vazão utilizada.

5 MOTORES DE INDUÇÃO OPERANDO COMO GERADOR

A utilização de motores de indução operando como gerador (MIGs) ocorre de forma análoga à de BFTs. Assim como nos processos de conversão hidromecânicos realizados por bombas e turbinas, os motores e geradores desempenham funções exatamente opostas no que diz respeito à conversão eletromecânica. Além disso, essas máquinas apresentam aspectos construtivos extremamente semelhantes. Sendo assim, os MIGs se tornam o complemento ideal às BFTs na formação de um grupo gerador para MCHs.

As vantagens da utilização de MIGs são praticamente as mesmas de BFTs, sendo a principal, o custo reduzido em relação a geradores convencionais.

Da mesma forma do que o exposto anteriormente em relação aos geradores de indução propriamente ditos, segundo Rezende et al. (2001) o motor de indução “[...] funcionando como gerador não tem a capacidade de gerar potência reativa [...]”. Essa potência reativa vem da rede, no caso da geração interligada, ou de um banco de capacitores, por exemplo, para sistemas isolados.

5.1 SELEÇÃO DE MIGS

Chapallaz et al. (1992a) desenvolveu um método empírico para a seleção de MIGs, baseando-se em ensaios por ele realizados. Vale salientar que tais ensaios foram realizados com motores de 4 pólos e freqüência de 50 Hz. Aplicações práticas demonstram, porém, que sua extensão para a freqüência de 60 Hz pode ser feita, implicando em erros aceitáveis. Inicialmente, deve-se calcular a potência de eixo fornecida pela BFT (P_{et}):

$$P_{et} = \rho \cdot g \cdot Q_t \cdot H_L \cdot \eta_t \quad (37)$$

onde:

P_{et} potência de eixo fornecida pela turbina ou BFT [W];

ρ massa específica da água [kg/m³];

g aceleração da gravidade [m/s²];

Q_t vazão de projeto da turbina ou BFT [m³/s];

H_L queda líquida [m];

η_t rendimento da turbina ou BFT [%].

Calculada a P_{et} , define-se pela figura 38 a sua relação com a potência nominal do MIG (P_{ng}). Visando abranger toda a faixa de potência inerente às MCHs, extrapolou-se a relação para potências de eixo entre 35 e 100 kW. A extrapolação foi feita por regressão linear, utilizando-se os dados entre 5 e 35 kW, através dos quais obteve-se a seguinte relação:

$$k_{p1} = 0,002 \cdot P_{et} + 1,06 \quad (38)$$

com:

k_{p1} coeficiente de relação entre P_{et} e P_{ng} extrapolada (entre 35 e 100 kW) [1];

P_{et} potência de eixo fornecida pela turbina ou BFT, entre 5 e 100 kW [kW];

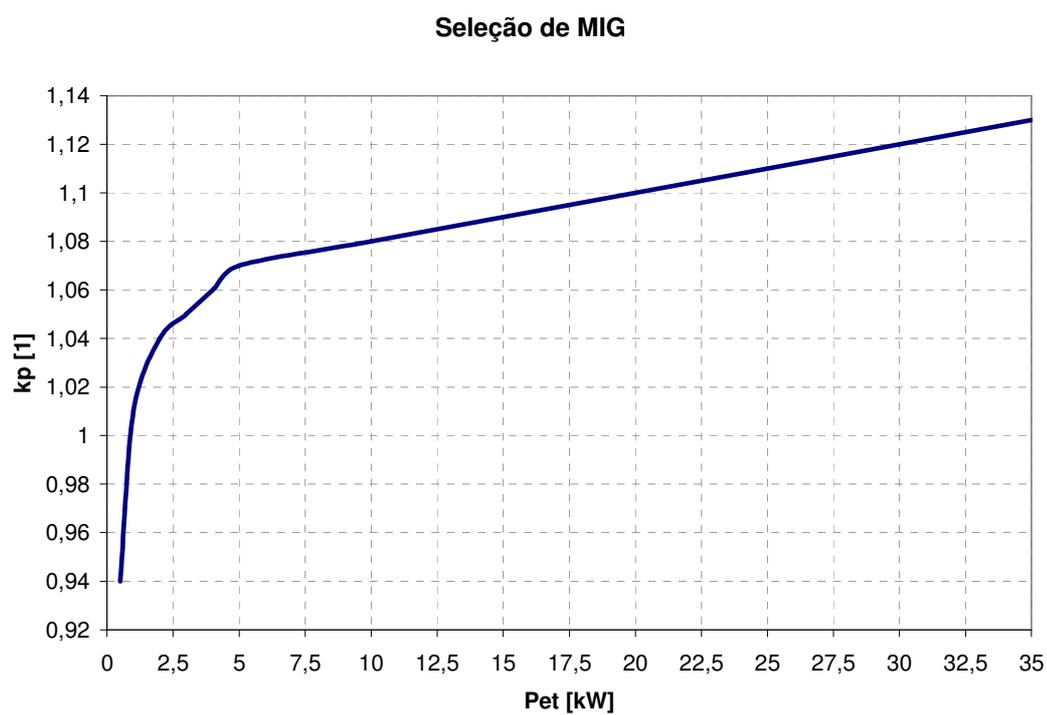


FIGURA 38 - Seleção de MIG (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1990a)

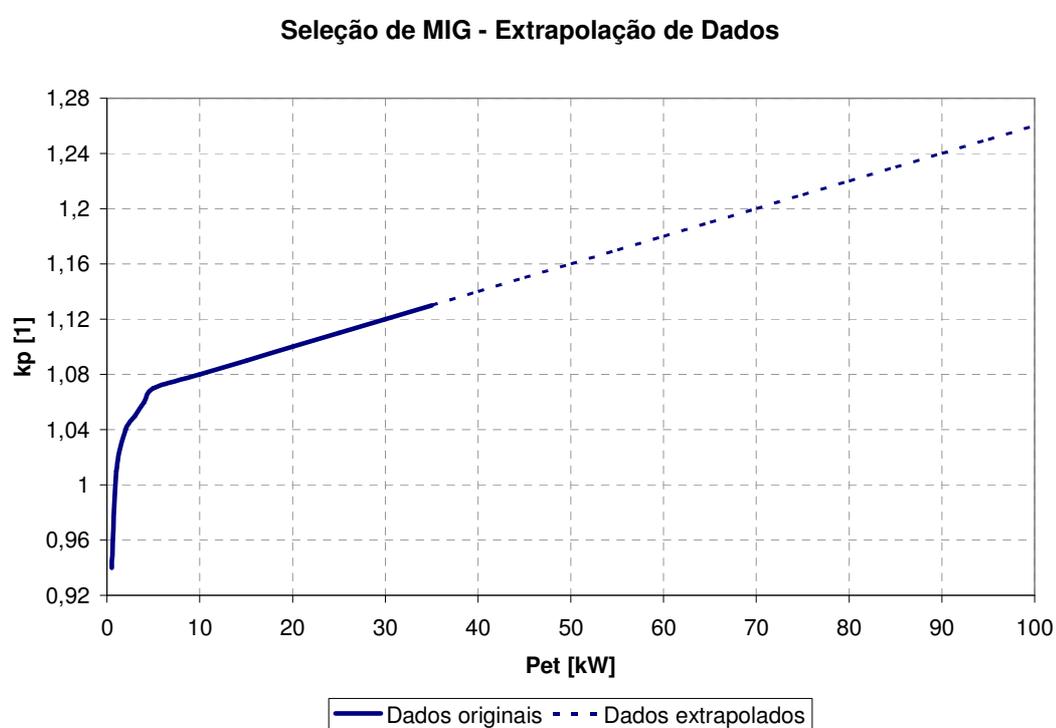


FIGURA 39 - Seleção de MIG – Dados extrapolados

Com a relação k_p obtida nas figuras 38 e 39 define-se a potência nominal do MIG, com a equação 39:

$$P_{ng} = \frac{P_{et}}{k_p} \quad (39)$$

sendo:

P_{ng} potência nominal do motor (MIG) [kW];

P_{et} potência de eixo fornecida pela turbina/BFT [kW];

k_p coeficiente de relação entre P_{et} e P_{ng} [1];

Definida a P_{ng} , seleciona-se o modelo comercial, através de catálogos fornecidos por fabricantes de motores. De acordo com a disponibilidade, deve-se selecionar o modelo com a P_{ng} imediatamente superior àquela calculada pela equação 39.

Parte-se então, para a especificação do banco de capacitores que permitirá a excitação do MIG. Para tanto, utiliza-se novamente um método empírico proposto por Chapallaz et al. (1992a). De posse de P_{ng} , determina-se, no gráfico abaixo o fator k_ϕ , definido pela equação 40:

$$k_\phi = \frac{\text{sen } \phi_{mig}}{\text{sen } \phi_m} \quad (40)$$

com:

k_ϕ relação experimental de senos [1];

ϕ_{mig} ângulo fasorial do gerador/MIG [°];

ϕ_m ângulo fasorial do motor [°].

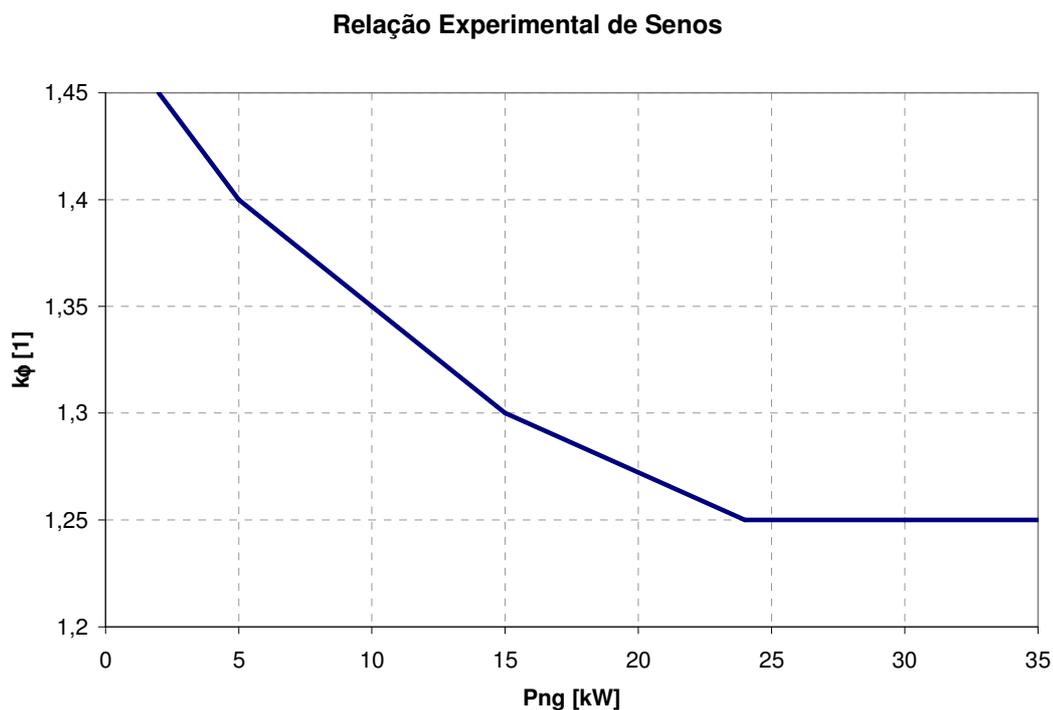


FIGURA 40 - Relação experimental de senos (fonte: adaptado de CHAPALLAZ et al., 1992a)

Verifica-se na figura 40 uma clara tendência à estabilização da curva a partir de 25 kW, no valor de 1,25. Assumindo-se essa tendência como verdadeira, extrapola-se a curva até 100 kW:

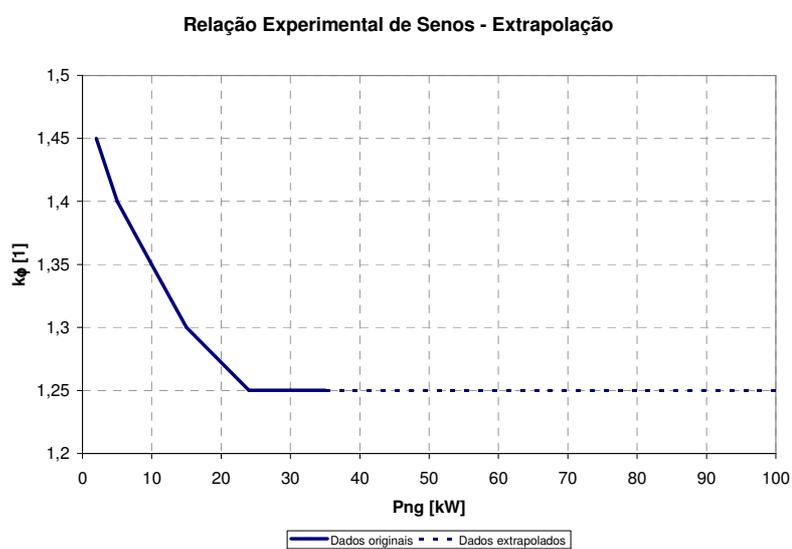


FIGURA 41 - Relação experimental de senos – Extrapolação

Com os dados fornecidos pelo catálogo do fabricante, ou na placa do motor, define-se seu rendimento (η_m) e fator de potência ($\cos \phi$). O fator de potência, numericamente igual ao cosseno do ângulo fasorial, é expresso por:

$$\cos \phi = \frac{P_a}{S} \quad (41)$$

sendo:

- $\cos \phi$ fator de potência [1];
 P_a potência ativa¹⁸ [W];
 S potência aparente¹⁹ [VA].

Sendo assim, o ângulo fasorial do motor é obtido através do arco cosseno de seu fator de potência. A potência elétrica demandada pelo motor (P_{elm}) é dada por:

$$P_{elm} = \frac{P_{ng}}{\eta_m} \quad (42)$$

onde:

- P_{elm} potência elétrica demandada pelo motor [W];
 P_{ng} potência nominal do motor (MIG) [kW];
 η_m rendimento do motor à plena carga [%].

Determina-se então a potência reativa²⁰ (Q_m) do motor:

¹⁸ A potência ativa pode ser entendida como a real capacidade de se produzir trabalho, ou seja, a potência útil.

¹⁹ A potência aparente é obtida a partir da multiplicação da tensão pela corrente do sistema.

²⁰ Teoricamente, a potência reativa representa a energia armazenada que é devolvida à fonte durante cada ciclo de corrente alternada.

$$Q_m = P_{elm} \cdot \text{tg } \phi_m \quad (43)$$

com:

- Q_m potência reativa do motor [kVAr];
 P_{elm} potência elétrica demandada pelo motor [kW];
 ϕ_m ângulo fasorial do motor [°].

Com o coeficiente k_ϕ extraído da figura 40 ou 41, obtém-se a potência reativa do MIG (Q_g):

$$Q_g = k_\phi \cdot Q_m \quad (44)$$

sendo:

- Q_g potência reativa do MIG [kVAr];
 Q_m potência reativa do motor [kVAr];
 k_ϕ relação experimental de senos [1];

Calcula-se então a capacitância para excitação do MIG (C_{60}), para uma frequência de 60 Hz, pela equação:

$$C_{60} = 0,6944 \cdot \frac{Q_g}{300 \cdot V^2 \cdot \pi} \cdot 10^9 \quad (45)$$

onde:

- C_{60} capacitância para excitação do MIG em 60 Hz [$\mu\text{F}/\text{fase}$];
 Q_g potência reativa do MIG [kVAr];
 V tensão de linha [V].

Finalmente, deve-se estimar a potência elétrica produzida pelo MIG. Uma vez que k_ϕ e ϕ_m são conhecidos, obtém-se, da equação 40, o $\sin \phi_{mig}$, e através de seu arco seno, ϕ_{mig} . Substituindo-se os dados na equação 46, tem-se:

$$P_{el} = \frac{P_{ng}}{\eta_m} \cdot \frac{\cos \phi_{mig}}{\cos \phi_m} \quad (46)$$

com:

P_{el} potência elétrica fornecida pelo MIG [kW];

P_{ng} potência nominal do motor (MIG) [kW];

η_m rendimento do motor à plena carga [%].

ϕ_{mig} ângulo fasorial do gerador/MIG [°];

ϕ_m ângulo fasorial do motor [°].

A potência de eixo absorvida pelo MIG é dada pela seguinte expressão:

$$P_{emig} = P_{el} + P_{ng} \cdot \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (47)$$

sendo:

P_{emig} potência de eixo absorvida pelo MIG [kW];

P_{el} potência elétrica fornecida pelo MIG [kW];

P_{ng} potência nominal do motor (MIG) [kW];

η_m rendimento do motor à plena carga [%].

O rendimento do MIG é dado pela equação 48:

$$\eta_{\text{mig}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{emig}}} \quad (48)$$

onde:

η_{mig} rendimento do MIG [%];

P_{el} potência elétrica fornecida pelo MIG [kW];

P_{emig} potência de eixo absorvida pelo MIG [kW].

6 APLICAÇÃO DE GRUPOS MOTO-BOMBA EM MCHS

Este capítulo apresenta o estudo de caso e as metodologias utilizadas para a verificação do comportamento de um grupo gerador BFT/MIG em condições reais, bem como para a quantificação dos benefícios econômicos da tecnologia.

6.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

No final do ano de 2005, foi firmado entre a Universidade Federal de Itajubá e o Ministério de Minas e Energia (MME), através de sua Coordenação-Geral de Fontes Alternativas, o Convênio de Cooperação Técnica-Financeira 12/2005, tendo como objetivo a avaliação do comportamento de BFTs e MIGs em campo, de forma que a tecnologia pudesse ser agregada aos esforços de universalização da energia elétrica promovidos pelo governo.

Os resultados dos trabalhos de Viana (1987) e de outros pesquisadores estrangeiros, as bem sucedidas experiências internacionais e, principalmente, as enormes vantagens econômicas da tecnologia foram os fatores motivadores da parceria, que resultou no Projeto BFT/MIG.

De acordo com o cronograma previsto, o projeto dividiu-se em algumas etapas:

- Seleção de um aproveitamento para instalação do grupo gerador BFT/MIG;
- Projeto e construção da MCH;
- Ensaio no grupo BFT/MIG;

- Análise dos resultados.

A importância do projeto reside nos testes do grupo BFT/MIG numa situação real, sem o controle e as facilidades inerentes aos ensaios de laboratório. A análise dos resultados e acompanhamento da operação da MCH constitui a última etapa para que a tecnologia possa ser popularizada, beneficiando principalmente comunidades rurais e isoladas, sendo esta a intenção do MME.

6.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O aproveitamento escolhido para o projeto encontra-se no município de Delfim Moreira – MG, numa fazenda localizada no alto da Serra da Mantiqueira, cujas principais atividades são o turismo e a piscicultura. Existia no local uma MCH em péssimas condições de conservação e manutenção, operando muito abaixo de sua capacidade instalada (25 kW), devido à deterioração de equipamentos e estruturas. A figura 42 apresenta uma visão geral da MCH:

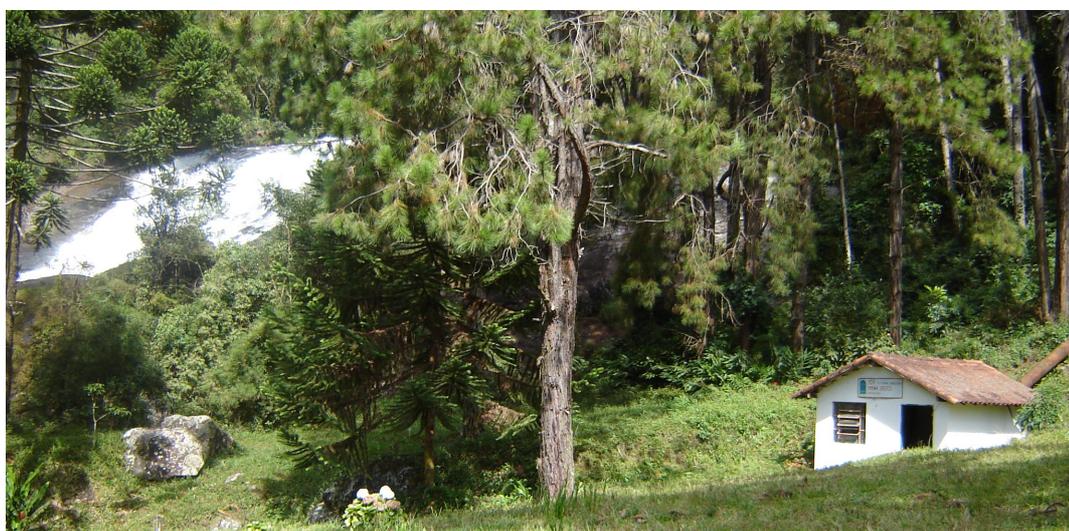


FIGURA 42 - Microcentral do Projeto BFT/MIG



FIGURA 43 - Desfavoráveis condições do grupo gerador e casa de força

6.1.2 REPROJETO E REFORMA DA MCH

Para que o Projeto BFT/MIG pudesse ser desenvolvido no aproveitamento escolhido, foi necessário o reprojeto e reforma da MCH existente. Os trabalhos se iniciaram com o georreferenciamento e levantamentos topográficos na área da central.



FIGURA 44 - Georreferenciamento da central através de GPS de precisão



FIGURA 45 - Levantamento topográfico utilizando estação total

Do levantamento topográfico e manipulação dos dados em computador, definiu-se a queda bruta da MCH, de 22,85 m, além de seu arranjo, típico de uma central de desvio. A barragem vertedoura possui aproximadamente 7 metros de comprimento, e 30 cm de altura média. Junto a essa localiza-se a tomada d'água, em formato e com acessórios clássicos. O canal de adução, de seção retangular, tem extensão aproximada de 35 m, com área molhada em torno de 1 m², sendo finalizado por uma câmara de carga. O conduto forçado possui diâmetro externo de 350 mm, em quase 40 metros de comprimento. A figura 46 ilustra o arranjo descrito.

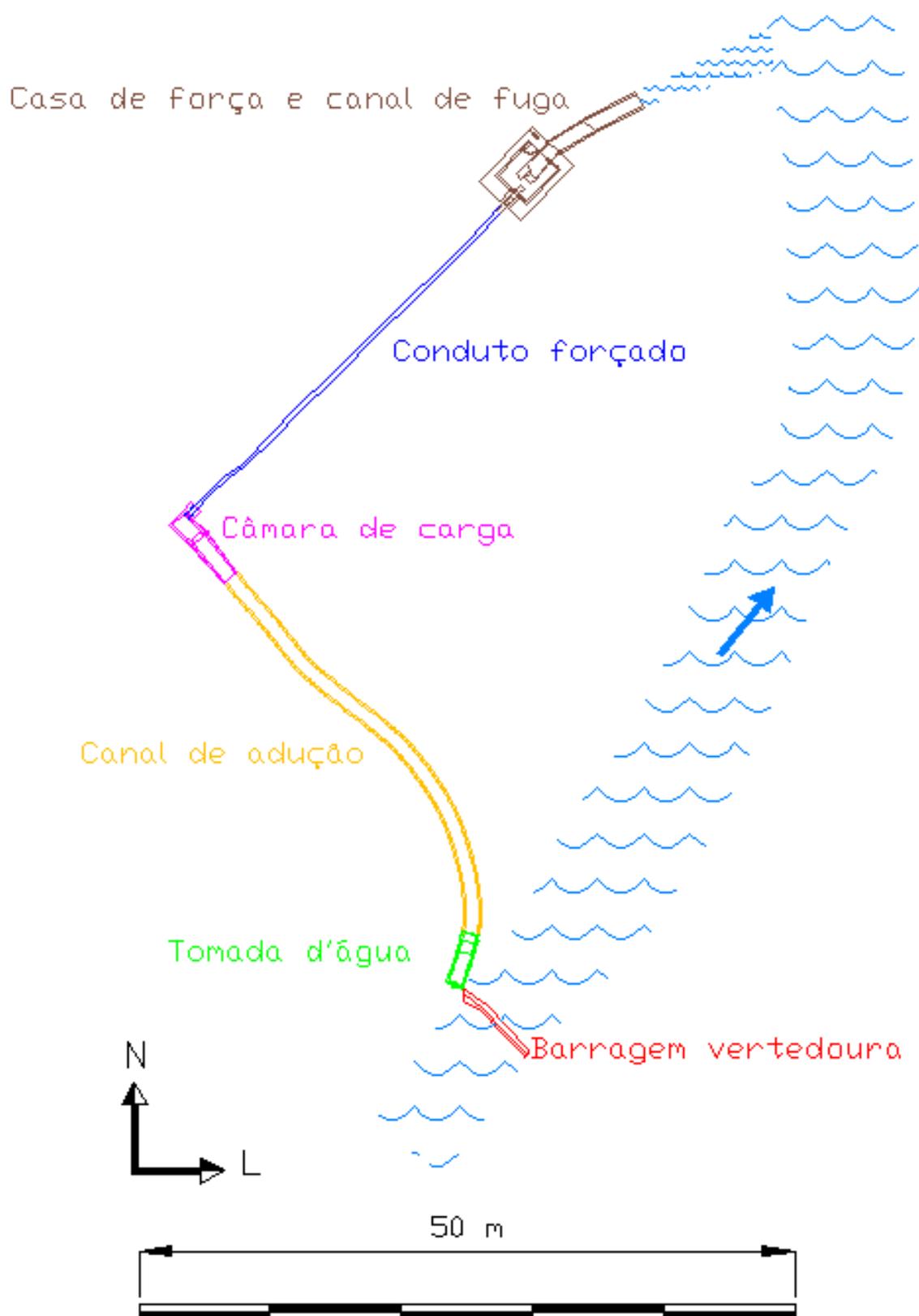


FIGURA 46 - Arranjo da MCH

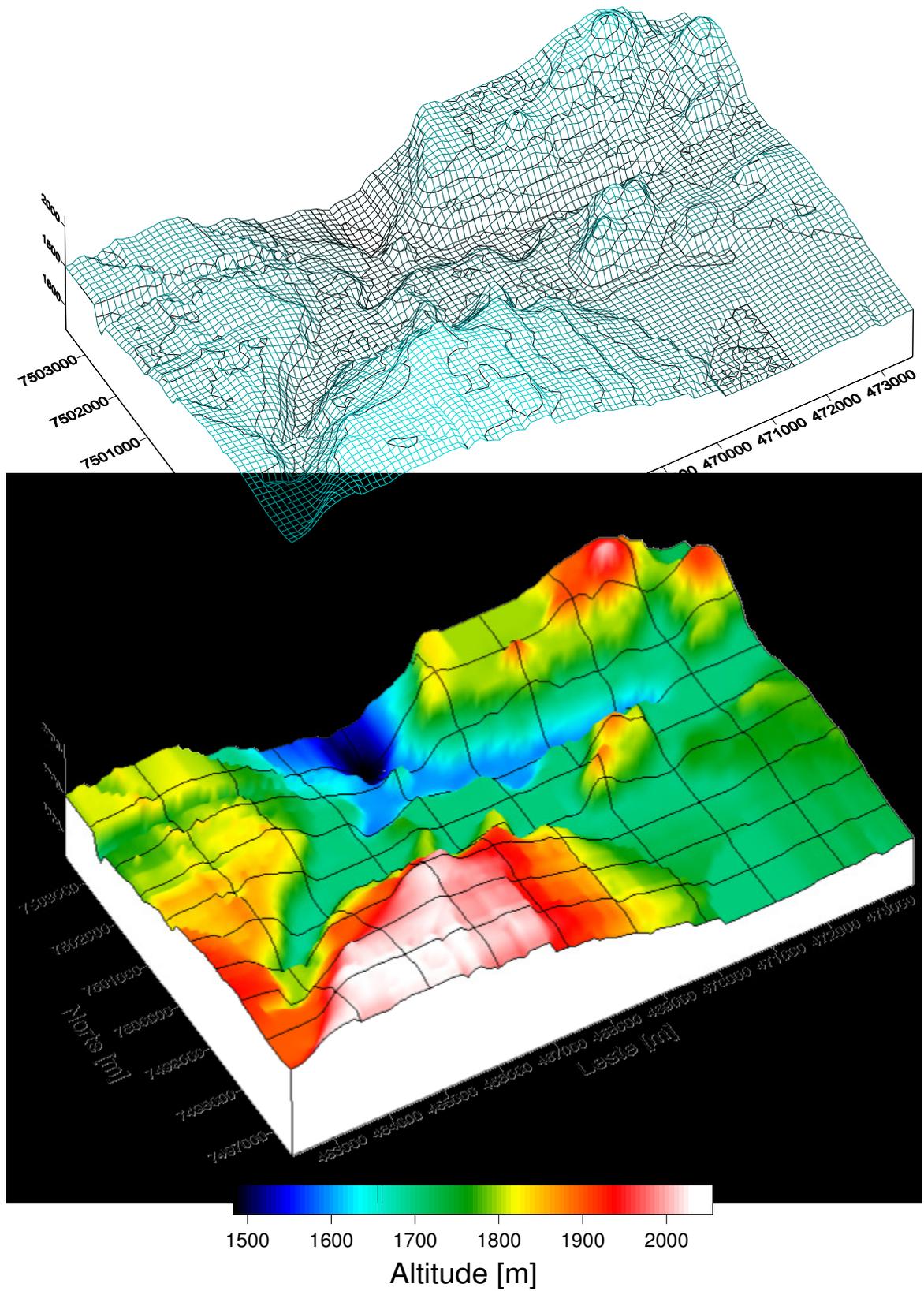


FIGURA 47 - Modelagem digital da bacia de contribuição da central

O georreferenciamento permitiu obter a área de drenagem do aproveitamento,

de 36,4 km², sendo a tomada d'água localizada no Córrego Boa Vista, um dos principais afluentes do Rio de Bicas (Bacia do Rio Sapucaí).

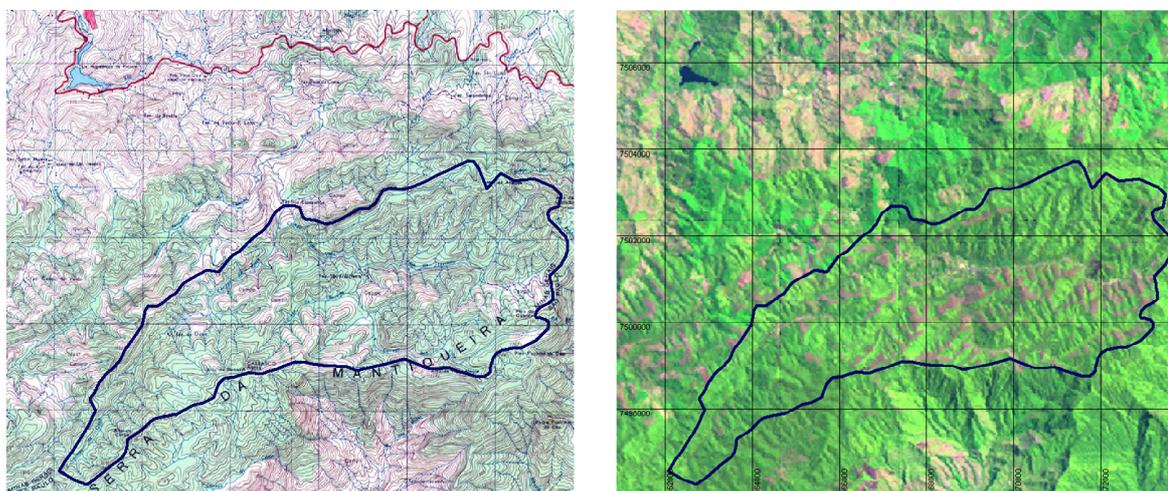


FIGURA 48 - Área de drenagem da MCH, plotada sobre folha topográfica e imagem de satélite

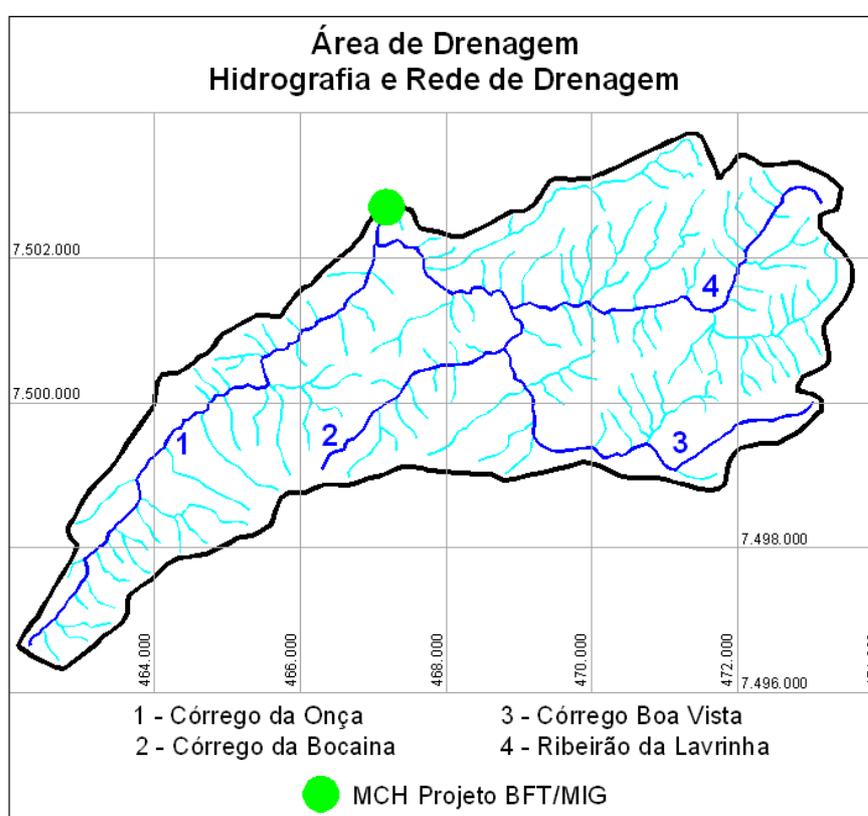


FIGURA 49 - Hidrografia e rede de drenagem

Com base na área de drenagem, partiu-se para os estudos hidrológicos, visando determinar a vazão disponível para a geração. Foi necessária a transposição de dados hidrológicos para o local do aproveitamento, devido à inexistência de estação fluviométrica no local. Os dados foram transpostos a partir da série da PCH REPI, em Wenceslau Braz – MG, segundo os trabalhos de Ricardo (2005). Cabe salientar que todos os estudos hidroenergéticos foram desenvolvidos considerando apenas 40 % de toda a vazão disponível no curso d'água, de forma a se manter todo o equilíbrio biótico no trecho de vazão reduzida e os aspectos paisagísticos do local. As figuras 50 e 51 sintetizam os resultados dos estudos hidrológicos.

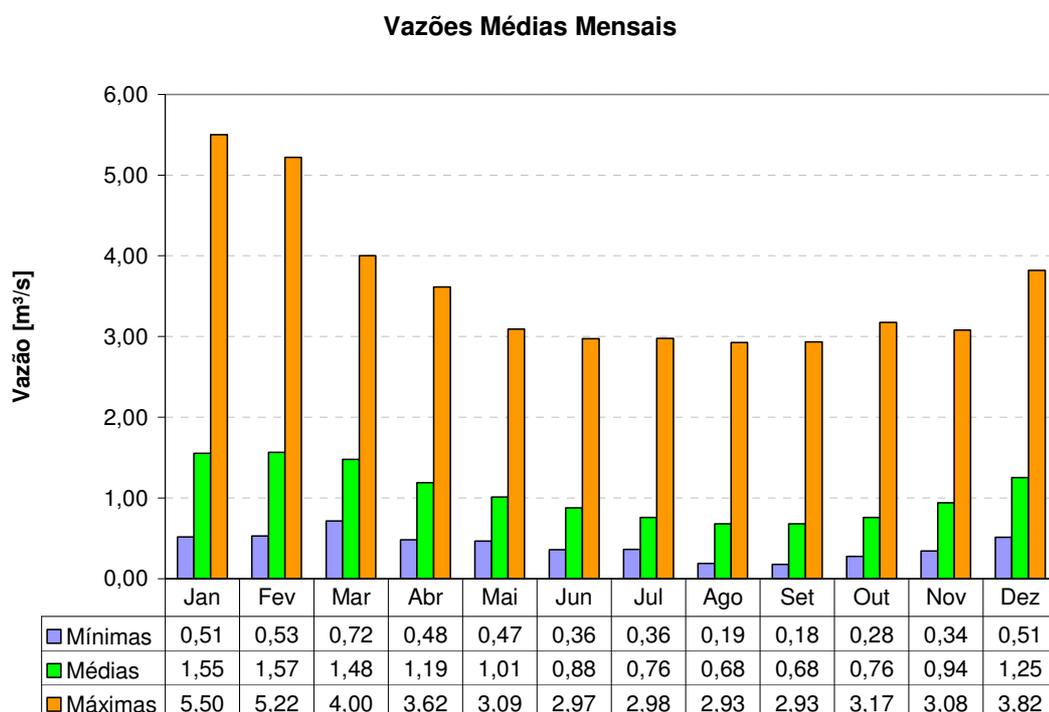


FIGURA 50 - Hidrograma de vazões médias mensais transpostas para a central

Curva de Permanência de Vazões

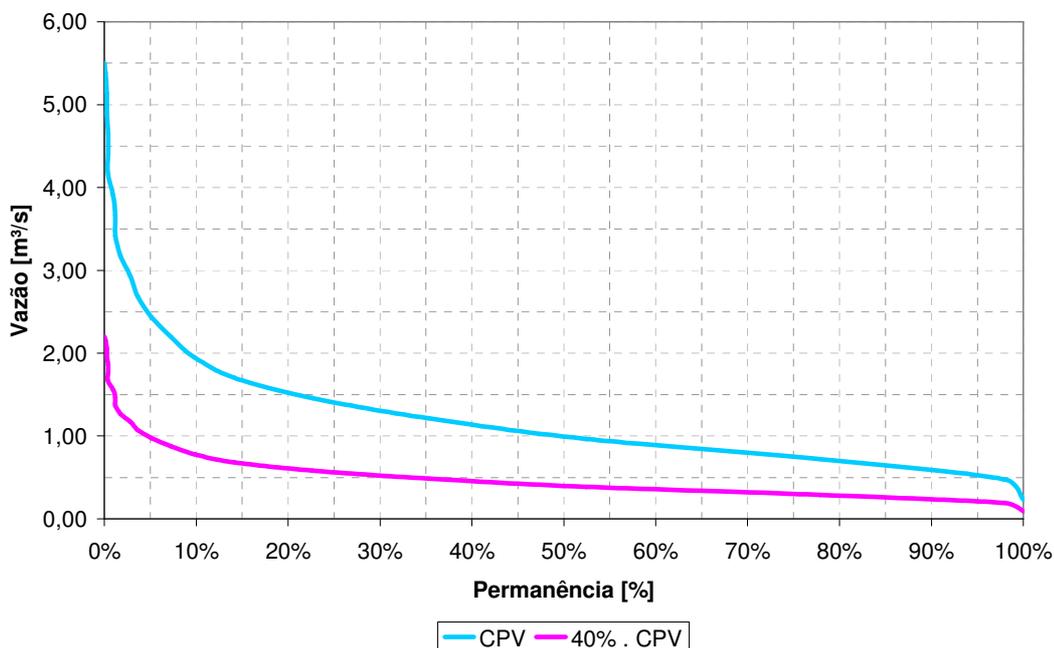


FIGURA 51 - Curva de permanência de vazões da central

A vazão média de longo termo da central, de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ apresentou-se próxima à vazão com permanência de 50 % (Q_{50}), da ordem de $0,98 \text{ m}^3/\text{s}$. A vazão com duração de 95 % (Q_{95}), por vezes utilizada como vazão de projeto de MCHs, é de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para se comprovar a coerência dos estudos hidrológicos, e, principalmente, da transposição de dados hidrológicos, realizaram-se algumas campanhas hidrométricas no local, tendo as vazões instantâneas medidas apresentado variações inferiores a 5% em relação à vazão média mensal do mês considerado, confirmando a validade dos dados transpostos.



FIGURA 52 - Campanha hidrométrica

A potência instalada na central, com o grupo gerador BFT/MIG, foi definida através de um levantamento de todas as cargas da fazenda, e simulação da situação mais crítica, com utilização simultânea de todos os equipamentos. A demanda máxima, nessa situação, é de 38 kW. Decidiu-se instalar uma potência de 43 kW, 5 kW superior à demanda calculada, de forma a atender o aumento de cargas previsto para o local. Após simulação hidráulica das perdas de carga no sistema de adução, e adotando-se os rendimentos da BFT e MIG de 82 % e 90 %, respectivamente, definiram-se os parâmetros de projeto, apresentados na tabela 2:

TABELA 2 - Principais parâmetros de projeto da MCH

Parâmetro	Valor
Vazão de projeto [m ³ /s]	0,273

Parâmetro	Valor
Queda bruta [m]	22,85
Queda líquida [m]	21,80
Potência elétrica [kW]	43,0
Fator de capacidade ²¹ [%]	100

Fonte: autoria própria

De posse dos parâmetros do aproveitamento, realizou-se o reprojeto da central, englobando as seguintes etapas:

- Reforma e reestruturação das estruturas civis;
- Substituição dos componentes hidromecânicos;
- Ampliação da câmara de carga;
- Instalação de um novo conduto forçado para o grupo BFT/MIG;
- Reforma e ampliação da casa de força.

As figuras 53 e 54 ilustram o reprojeto da câmara de carga e da casa de força, respectivamente:

²¹ O fator de capacidade expressa a relação entre a energia média gerada ($kW_{\text{médios}}$) e a potência instalada (kW).

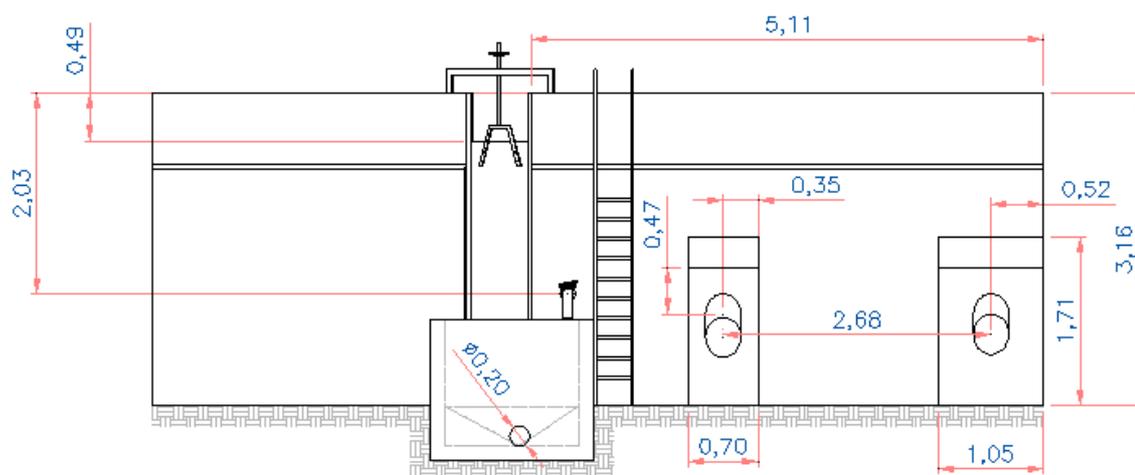


FIGURA 53 - Reprojetado da câmara de carga

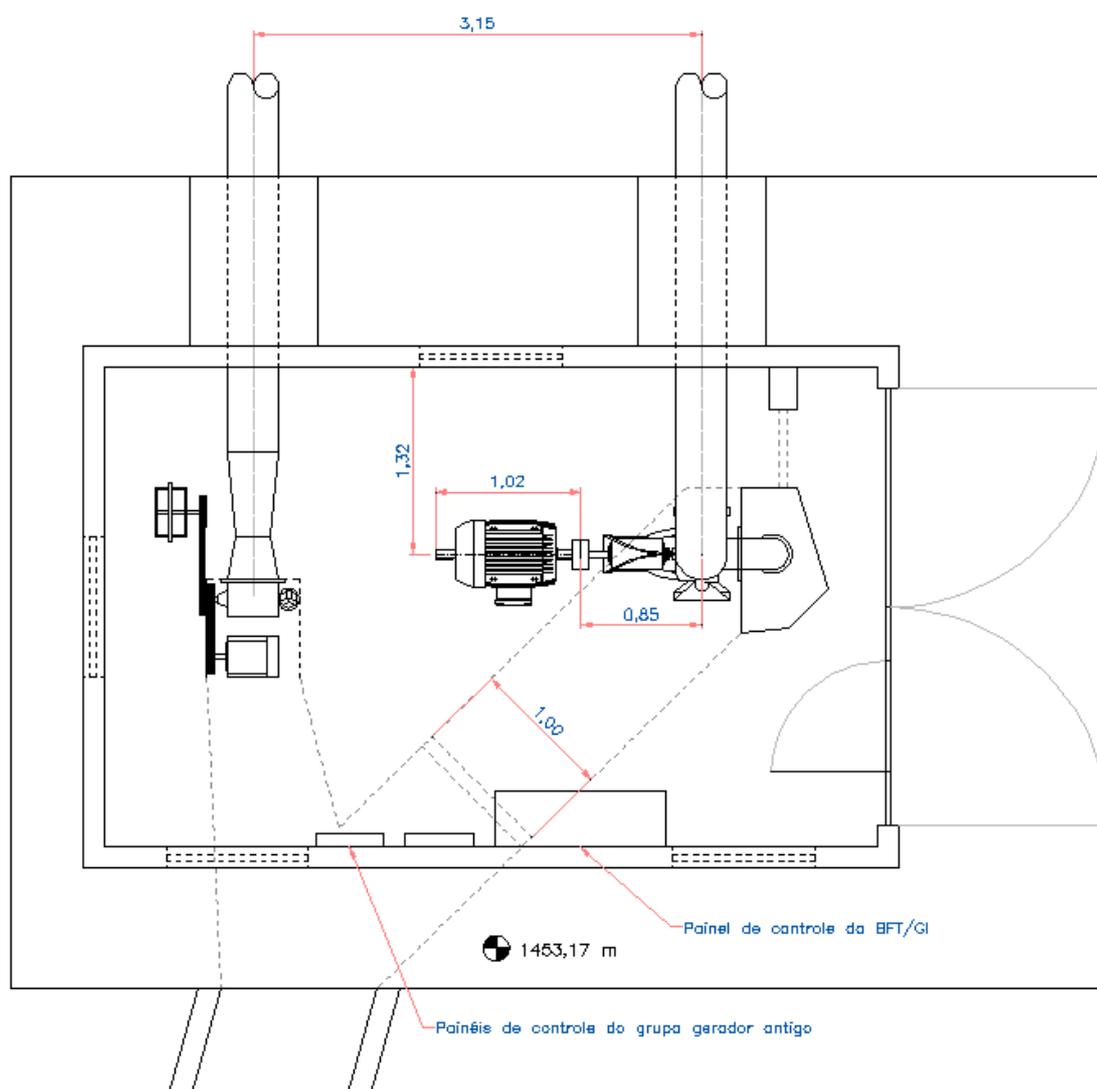


FIGURA 54 - Planta da casa de força reformada

6.1.3 SELEÇÃO DA BFT

Utilizou-se para a seleção da BFT o método de Chapallaz, uma vez que o n_{qA} se mostrou superior a 200 ($n_{qA} = 3 \cdot n_{qt}$), inviabilizando a aplicação do método de Viana . Os parâmetros de seleção são apresentados na tabela 3:

TABELA 3 - Parâmetros de seleção da BFT

Parâmetro	Valor
Vazão de projeto [m ³ /s]	0,273
Queda líquida [m]	21,8
Rotação da BFT [rpm]	1.800
n_{qt} [1]	93,21
n_{qbt} [1]	104,73
Vazão estimada da bomba [m ³ /s]	0,210
Rendimento estimado da BFT [%]	83,5
Coeficiente de altura [1]	1,500
Coeficiente de vazão [1]	1,325
Altura da bomba [m]	14,54
Vazão da bomba [m]	0,206
Rotação nominal da bomba [rpm]	1.750
Altura da bomba corrigida p/ 1.750 rpm [m]	13,74
Vazão da bomba corrigida p/ 1.750 rpm [m ³ /s]	0,200
Rendimento real da BFT [%]	83,5

Fonte: autoria própria

As curvas da bomba selecionada, fornecidas pelo fabricante, podem ser visualizadas no Anexo B.

6.1.4 SELEÇÃO DO MIG

A seleção do MIG também ocorreu segundo o método proposto por Chapallaz et al. (1992a), detalhado anteriormente, de acordo com os seguintes parâmetros:

TABELA 4 - Parâmetros de seleção do MIG

Parâmetro	Valor
Potência de eixo fornecida pela BFT [kW]	48,6
Coefficiente de relação entre potência de eixo e potência nominal do motor [1]	1,14
Potência nominal do motor [kW]	42,6
Potência nominal comercial do motor [kW]	45,0
Rendimento do motor [%]	93,0
Fator de potência do motor [1]	0,87
Relação experimental de senos [1]	1,22
Potência elétrica demandada pelo motor [kW]	48,3
Ângulo fasorial do motor [°]	29,5
Potência reativa do motor [kVAr]	27,3
Potência reativa do MIG [kVAr]	33,3
Capacitância para excitação do MIG a 60 Hz [μ F/fase]	507
Potência reativa para excitação do MIG a plena carga a 60 Hz [kVAr]	22,7
Ângulo fasorial do MIG [°]	36,9

Parâmetro	Valor
Fator de potência do MIG [1]	0,8
Potência elétrica gerada pelo MIG [kW]	44,0
Potência de eixo demandada pelo MIG [kW]	47,3
Rendimento do MIG [%]	93,0

Fonte: dados do Projeto BFT/MIG

Os dados do MIG, fornecidos pelo fabricante, são apresentados nos anexos C e D.

6.1.5 ENSAIOS NO GRUPO GERADOR

Visando determinar o desempenho do grupo gerador BFT/MIG, no tocante ao seu rendimento, realizaram-se ensaios no mesmo. Nestes, a BFT é considerada hidraulicamente semelhante a uma turbina de reação do tipo Francis, sendo toda a instrumentação e equacionamento realizados com base nessa premissa.

6.1.5.1 Normatização dos ensaios

A norma brasileira que rege, de forma geral, os ensaios em turbinas hidráulicas é a NBR 11374 (Turbinas hidráulicas: ensaio de campo). Essa norma é baseada no documento internacional IEC 60041 (Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines). Segundo Souza (1999), pode-se constatar algumas diferenças entre a NBR 11374 e a IEC 60041:

- enquanto a NBR 11374 propõe que as medições ocorram de forma clássica, através de medições diretas com equipamentos analógicos, a IEC 60041 permite o uso de *softwares* para aquisição de dados através de transdutores de pressão, por exemplo;
- a IEC 60041 inclui, entre os métodos aplicáveis para medição de vazão, a utilização de equipamentos ultra-sônicos. Nesse sentido, a NBR 11374 prevê a possibilidade de utilização de métodos ainda não aceitos universalmente, em casos especiais mediante acordo entre as partes (contratante e executor dos ensaios).

Os ensaios realizados no grupo gerador BFT/MIG estudado seguiram o equacionamento e as recomendações previstas na NBR 11374, agregando recomendações da IEC 60041, principalmente no tocante à aquisição de dados através de pacotes computacionais e utilização de técnicas modernas de medição de vazão, conforme apresentado a seguir.

6.1.5.2 Descrição teórica e parâmetros aquisitados

O objetivo específico do ensaio é determinar o rendimento do grupo gerador BFT/MIG como um todo (sem a discretização dos rendimentos individuais da BFT e do MIG). Para tanto, vale-se da seguinte equação:

$$\eta_{\text{BFT/MIG}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{HL}}} \cdot 100 \quad (49)$$

onde:

$\eta_{\text{BFT/MIG}}$ rendimento do grupo gerador BFT/MIG [%];

- P_{el} potência elétrica fornecida pelo MIG [kW];
- P_{HL} potência hidráulica líquida absorvida pela BFT [kW].

A potência elétrica é obtida diretamente, através da instalação e leitura de um medidor de grandezas elétricas. Já a potência hidráulica é quantificada de forma indireta, através da equação 50:

$$P_{HL} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_L \quad (50)$$

sendo:

- P_{HL} potência hidráulica líquida absorvida pela BFT [W];
- ρ massa específica da água [kg/m³];
- g aceleração da gravidade [m/s²];
- Q vazão turbinada [m³/s];
- H_L altura de queda líquida [m].

A massa específica da água (ρ) é considerada 1.000 kg/m³, uma vez que tabelas disponíveis para sua correção em função da altitude, latitude e temperatura são válidas para água destilada (ABNT, 1990). A aceleração da gravidade (g), para uma latitude aproximada de 22° S e altitude média de 1.500 m foi interpolada em 9,7819 m/s² (média das acelerações da gravidade p/ 20° de latitude e altitudes de 1.000 e 2.000 m) (ABNT, 1990). A vazão turbinada (Q) é medida.

A altura de queda líquida (H_L) é calculada indiretamente, segundo equacionamento para turbinas de reação de eixo horizontal presente na NBR 11374 (ABNT, 1990):

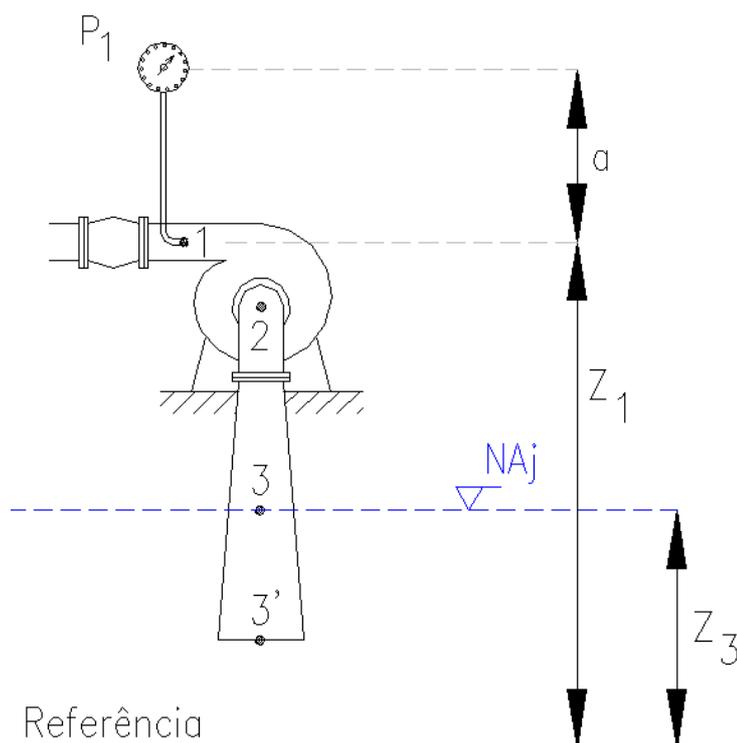


FIGURA 55 - Referências geométricas para ensaio de turbinas de reação, segundo NBR 11374

$$H_L = (z_1 + a - z_3) + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \left(\frac{v_1^2 - v_{3'}^2}{2 \cdot g} \right) \quad (51)$$

onde:

- H_L queda líquida [m];
- z_1 cota da entrada da turbina/BFT [m];
- a diferença de nível entre a entrada da turbina/BFT e o manômetro (ou transdutor de pressão [m];
- z_3 cota do nível d'água de jusante [m];
- P_1 pressão na entrada da turbina/BFT [Pa];
- ρ massa específica da água [kg/m³];
- g aceleração da gravidade [m/s²];
- v_1 velocidade na entrada da turbina/BFT [m/s];
- $v_{3'}$ velocidade na saída do tubo de sucção [m/s].

Na figura 55, a referência (cota zero) corresponde ao nível do transdutor de pressão instalado no canal de fuga, através do qual se obtém as medidas da cota z_3 . A partir da referência, definem-se as cotas fixas da entrada da turbina (z_1) e do manômetro/transdutor de pressão nessa seção (a). A pressão na entrada da turbina (P_1) é lida ou aquisitada por manômetro ou transdutor de pressão, respectivamente. Conhecendo-se os diâmetros de entrada (D_1) e do tubo de sucção ($D_{3'}$), e medindo-se a vazão turbinada (Q), obtêm-se as velocidades na entrada (v_1) e saída ($v_{3'}$), a partir da equação da continuidade adaptada:

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_1^2} \quad (52)$$

$$v_{3'} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{3'}^2} \quad (53)$$

com:

- v_1 velocidade na entrada da turbina [m/s];
- Q vazão turbinada [m³/s];
- D_1 diâmetro da entrada da turbina [m];
- $v_{3'}$ velocidade na saída do tubo de sucção [m/s];
- $D_{3'}$ diâmetro da saída do tubo de sucção [m].

6.1.5.2.1 Grupo gerador convencional – Turbina Michell-Banki

A determinação do rendimento do grupo gerador convencional existente na MCH, utilizando uma turbina Michell-Banki, ocorre de forma semelhante à do grupo BFT/MIG, diferindo apenas no equacionamento para o cálculo da altura de queda

líquida (H_L). Sendo a Michell-Banki uma turbina de ação tem-se, de acordo com o esquema da figura 56, o cálculo de H_L :

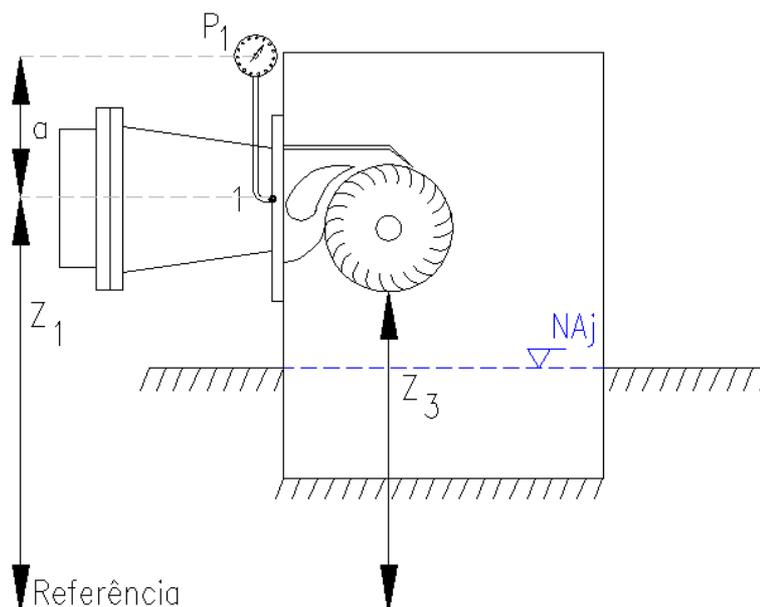


FIGURA 56 - Referências geométricas para ensaio de turbinas de ação, segundo NBR 11374

$$H_L = (z_1 + a - z_3) + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \quad (54)$$

onde:

H_L queda líquida [m];

z_1 cota da entrada da turbina [m];

a diferença de nível entre a entrada da turbina e o manômetro (ou transdutor de pressão [m];

z_3 cota da saída do rotor [m];

P_1 pressão na entrada da turbina/BFT [Pa];

ρ massa específica da água [kg/m³];

g aceleração da gravidade [m/s²];

v_1 velocidade na entrada da turbina [m/s];

Na figura 56, a referência (cota zero) foi adotada ao nível da saída do rotor, de forma que z_3 assumia valor nulo. A partir desta referência, definem-se as cotas fixas da entrada da turbina (z_1) e do manômetro/transdutor de pressão nessa seção (a). A pressão na entrada da turbina (P_1) é lida ou adquirida por manômetro ou transdutor de pressão, respectivamente. Conhecendo-se o diâmetro de entrada (D_1) e medindo-se a vazão turbinada (Q), obtém-se as velocidades na entrada (v_1), a partir da equação da continuidade adaptada:

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_1^2} \quad (55)$$

com:

v_1 velocidade na entrada da turbina [m/s];

Q vazão turbinada [m³/s];

D_1 diâmetro da entrada da turbina [m];

$D_{3'}$ diâmetro da saída do tubo de sucção [m].

6.1.5.3 Caracterização do sistema ensaiado

A tabela 5 apresenta os parâmetros fixos utilizados no ensaio do grupo BFT/MIG, conforme descritos teoricamente na seção 6.1.5.2:

TABELA 5 - Características geométricas para ensaio do grupo BFT/MIG

D_1 [m]	$D_{3'}$ [m]	z_1 [m]	a_{MAN} [m]	a_{TRA} [m]
-----------	--------------	-----------	---------------	---------------

D_1 [m]	D_3' [m]	z_1 [m]	a_{MAN} [m]	a_{TRA} [m]
0,2136	0,2840	1,290	0,1000	0,000

Fonte: dados do Projeto BFT/MIG

6.1.5.3.1 Grupo gerador – Turbina Michell-Banki

A tabela 6 apresenta os parâmetros fixos utilizados no ensaio do grupo convencional (turbina Michell-Banki) BFT, conforme descritos teoricamente na seção 6.1.5.2.1. Não foi possível se obter os dados nominais (de placa) do grupo gerador convencional, uma vez que este foi reformado.

TABELA 6 - Características geométricas para ensaio do grupo gerador – Michell-Banki

D_1 [m]	z_1 [m]	a_{MAN} [m]	z_3 [m]	a_{TRA} [m]
0,2514	0,620	0,1000	0,00	0,000

Fonte: dados do Projeto BFT/MIG

6.1.5.4 Equipamentos utilizados

Descrevem-se a seguir as principais características dos equipamentos utilizados nos ensaios.

6.1.5.4.1 Medidor de vazão ultra-sônico por tempo de trânsito

As vazões foram obtidas através de medidores ultra-sônicos não intrusivos

por tempo de trânsito, que “[...] se baseiam na medição dos tempos que ondas acústicas emitidas simultaneamente no sentido do escoamento e contra o mesmo [...]” levam para percorrer o diâmetro da tubulação (SOUZA; BORTONI, 2006).

Utilizou-se um equipamento da marca Thermo Electron Corporation, modelo Polysonics DCT7088, com exatidão de $\pm 1\%$ do valor medido ou $\pm 0,03$ m/s (vide especificações no anexo H).



FIGURA 57 - Medidor de vazão ultra-sônico Polysonics DCT7088 (fonte: THERMO, 2007)

6.1.5.4.2 Medidor de espessura de condutos forçados

A espessura do conduto forçado (que deve ser fornecida ao medidor ultra-sônico de vazão para o cálculo da vazão) foi obtida através de um medidor de espessura, também ultra-sônico, da marca Homis Controle e Instrumentação, modelo TT100, cujas especificações se encontram no anexo I.



FIGURA 58 - Medidor de espessura de conduto forçado Homis TT100 (fonte: HOMIS, 2007)

6.1.5.4.3 Manômetro de Bourdon

O manômetro de Bourdon é um dos medidores de pressão mais comuns, consistindo basicamente num tubo curvo, flexível e de seção transversal oval. Quando a pressão é aplicada a esse sistema, o tubo tende a se tornar circular havendo deflexão da extremidade livre (SOUZA; BORTONI, 2006). Essa deflexão é associada à pressão aplicada, sendo associada a um ponteiro que permite a medição.

Utilizaram-se nos ensaios manômetros da marca Homis, com fundo de escala de 40 m.



FIGURA 59 - Manômetro de Bourdon

6.1.5.4.4 Transdutores de pressão

Para a aquisição de pressões, utilizaram-se dois tipos de transdutores:

- marca Smar, com fundo de escala de 40 m e saída de 4 a 20 mA;
- marca Gulton, com fundo de escala de 50 m e saída de 4 a 20mA.



FIGURA 60 - Transdutores de pressão

6.1.5.4.5 Medidor de grandezas elétricas

A potência elétrica fornecida foi medida através de um medidor de grandezas elétricas da marca Yokogawa, modelo CW140. As principais especificações do equipamento se encontram no anexo J.



FIGURA 61 - Medidor de grandezas elétricas Yokogawa CW140 (fonte: CLAMP-ON, 2007)

6.1.5.4.6 Tacômetro digital

A rotação da BFT foi medida com um tacômetro digital.



FIGURA 62 - Tacômetro digital

6.1.5.4.7 Sistema de aquisição de dados

Para a composição do sistema de aquisição de dados, foram utilizados os seguintes componentes:

- Módulo SCXI-1125, da *National Instruments*: é um módulo condicionador de sinais analógicos com 8 canais de entrada isolados, com configurações programáveis de ganho e filtros em cada canal.



FIGURA 63 - Módulo SCXI-1125, National Instruments (fonte: SCXI-1125, 2007)

- Bloco de entrada de corrente SCXI-1338, da *National Instruments*: módulo constituído por oito resistores de precisão de 249Ω , para a conversão de de corrente em tensão.

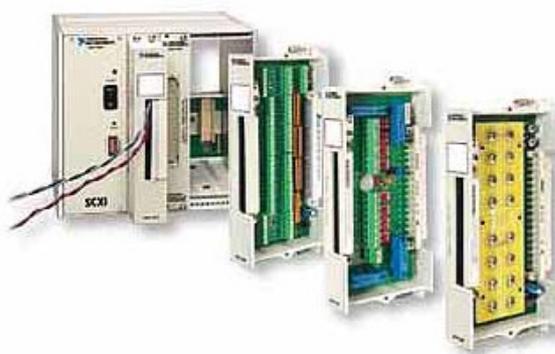


FIGURA 64 - Bloco SCXI-1338, National Instruments (fonte: SCXI-1338, 2007)

- Módulo SCXI-1102, da *National Instruments*: modulo para condicionamento de sinais de termopares, tensões com pequena largura de banda e de fontes com baixíssimas tensões (milivolts).

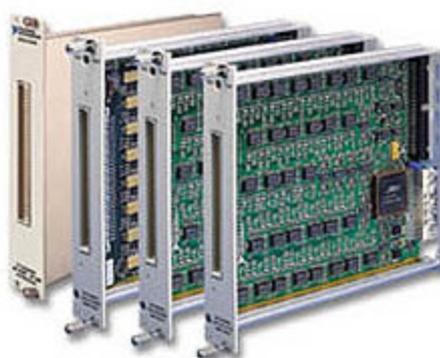


FIGURA 65 - Módulo SCXI-1102, National Instruments (fonte: SCXI-1102, 2007)

- Bloco terminal SCXI-1300, da *National Instruments*: bloco para conexão de sinais.
- Módulo SCXI-1600, da *National Instruments*: módulo de aquisição de dados e controle USB de 16-bit, com entrada e saída analógicas e digitais.



FIGURA 66 - Módulo SCXI-1600, National Instruments (fonte: USB, 2007)

6.1.5.4.8 Software para aquisição de dados LabVIEW

O LabVIEW é um *software*, desenvolvido pela *National Instruments*, que permite a aquisição, processamento e visualização de dados, através de uma interface gráfica simples e intuitiva. Os sinais captados pelos sensores são pré-processados pelo módulo de aquisição, e convertidos em sinais elétricos. Através de rotinas internas criadas pelo usuário, o LabVIEW converte tais sinais em valores das grandezas físicas medidas (pressão, por exemplo). O programa permite a visualização das medições em gráficos e telas customizadas.

6.1.5.5 Instrumentação e aquisição de dados

De acordo com os parâmetros necessários para a determinação do rendimento dos grupos geradores, conforme a NBR 11374, preparou-se o arranjo do ensaio, conforme figuras 67 e 68:

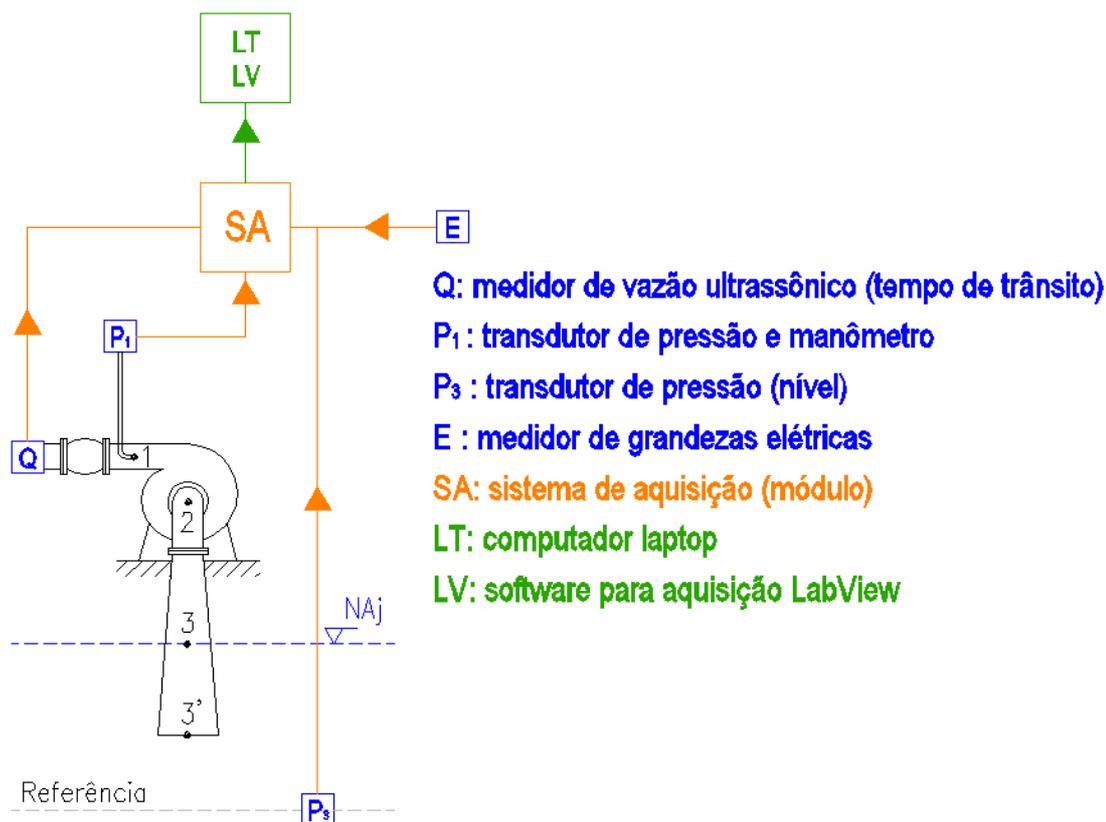


FIGURA 67 - Esquema de medição e aquisição de dados do grupo BFT/MIG

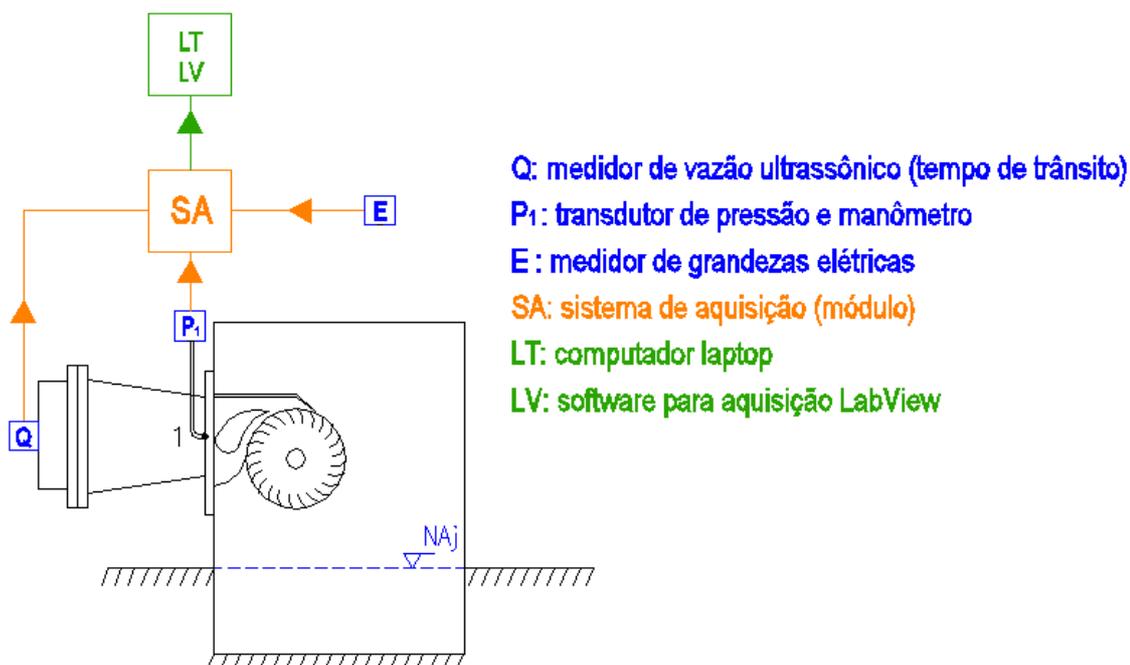


FIGURA 68 - Esquema de medição e aquisição de dados do grupo Michell-Banki/Gerador



FIGURA 69 - Transdutores do medidor de vazão ultra-sônico, entrada da BFT



FIGURA 70 - Medidor ultra-sônico de vazão, entrada da turbina Michell-Banki



FIGURA 71 - Transdutor de pressão e manômetro de Bourdon, entrada da BFT



FIGURA 72 - Transdutor de pressão e manômetro de Bourdon, entrada da turbina Michell-Banki



FIGURA 73 - Transdutor de pressão em poço tranquilizador, canal de fuga



FIGURA 74 - Alicates para medição de grandezas elétricas

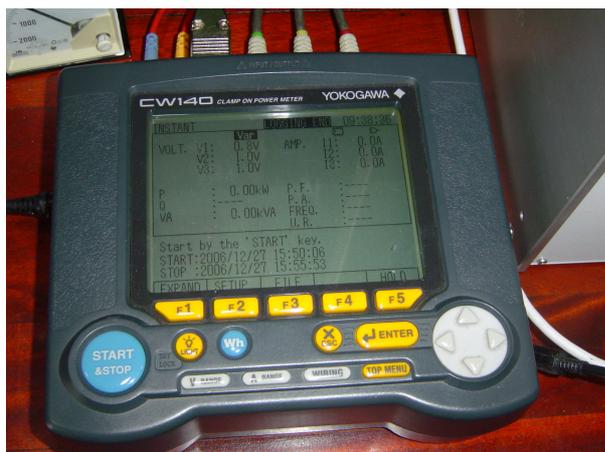


FIGURA 75 - Medidor de grandezas elétricas



FIGURA 76 - Módulo de aquisição de dados



FIGURA 77 - Computador laptop com o software LabVIEW

6.1.5.6 Execução dos ensaios – procedimentos

A simulação de cargas para a execução dos ensaios se deu por meio de resistências inseridas em caixas d'água, para dissipação da energia gerada.

Variou-se, tanto para o grupo BFT/MIG quanto para o grupo com turbina Michell-Banki, a vazão turbinada, obtendo-se vários pontos de leitura dos parâmetros hidráulicos e elétricos necessários à determinação dos rendimentos dos grupos. No caso da BFT, o controle da vazão se deu por meio de uma válvula borboleta instalada no conduto forçado. Para a turbina Michell-Banki, utilizou-se sua própria pá diretriz.

6.2 ANÁLISE DE BENEFÍCIOS ECONÔMICOS

Após analisadas as questões técnicas envolvendo a tecnologia BFT/MIG, parte-se para a avaliação de seus benefícios econômicos. Conforme comentado em seções anteriores, a principal motivação para a aplicação desse tipo de equipamento reside no seu baixo custo, quando comparado com às tecnologias convencionais. Pretende-se nesse capítulo quantificar o impacto econômico de BFTs e MIGs sob duas ópticas:

- custo de grupos geradores convencionais;
- redução do custo índice de MCHs;

6.2.1 CUSTOS DE GRUPOS GERADORES

O grupo gerador é o componente fundamental da geração hidrelétrica. De acordo com o arranjo de cada aproveitamento, pode representar mais de 40 % do custo total de uma central hidrelétrica.

Dos trabalhos realizados durante o Projeto BFT/MIG, obteve-se a cotação do conjunto moto-bomba utilizado como grupo gerador (vide Anexo E), de R\$ 12.108,00²². Somando-se a esse valor os custos do tubo de sucção, atinge-se o custo de R\$ 15.430,00 (US\$ 7.303,10, conforme cotação do dólar em 27/04/2006). O custo do grupo gerador BFT/MIG, por kW instalado foi, no caso, de US\$ 169,84, condizente com os resultados obtidos por Balarim et al. (2004). Neste trabalho, Balarim et. al. (2004) conclui que o custo índice de equipamentos eletromecânicos²³ para MCHs, utilizando BFTs, varia dentro de 3 faixas de potência instalada:

- Até 1 kW: US\$ 2.212,00 por kW instalado;
- Entre 1 e 25 kW: de US\$ 2.212,00 a US\$ 150,00 por kW instalado;
- De 25 kW a 150 kW: US\$ 150,00 por kW instalado.

O custo de um grupo gerador composto por uma turbina Michell-Banki acoplada a um gerador síncrono, para os mesmos 43 kW, foi cotado²⁴ em R\$ 37.000,00 (US\$ 17.535,54, para cotação do dólar também em 27/04/2006), implicando num custo por kW instalado de US\$ 407,80.

²² Valor para potência instalada de 43 kW.

²³ O custo inclui: BFT e gerador síncrono (não foi utilizado MIG), regulador de carga, válvula borboleta, tubo de sucção, grade e quadro de comando.

²⁴ Cotação sem registro, obtida verbalmente por contato telefônico com a empresa RM Equipamentos LTDA (Varginha – MG).

No caso apresentado acima, a utilização do grupo BFT/MIG representou uma economia de 58,35 % em relação ao custo do grupo gerador com turbina Michell-Banki²⁵.

Para que fosse possível a generalização dos custos de grupos geradores convencionais e com tecnologia BFT/MIG, tornou-se necessária a obtenção de uma amostra representativa de valores, para diversas situações de queda e vazão, o que possibilitaria a determinação de custos índices confiáveis. Optou-se, então, por uma pesquisa de mercado.

Na primeira etapa, foram propostos diversos aproveitamentos hidrelétricos com potência inferior a 100 kW, de acordo com duas referências:

- Queda líquida variando de 10 a 100 m;
- Vazões variando de 0,025 a 0,4 m³/s.

Propostos os cenários, selecionou-se, para cada um, a BFT aplicável, de acordo com o Método de Viana. Quando o método não se apresentou aplicável, partiu-se para o Método de Chapallaz. As BFTs selecionadas são apresentadas nos apêndices B e C.

A próxima etapa consistiu na seleção do MIG para cada aproveitamento simulado. Uma vez que até então não se conheciam os rendimentos das BFTs selecionadas, e estes eram requeridos para a seleção do MIG (considerando-se que um dos seus parâmetros de seleção é a potência de eixo) optou-se por implementar, em planilha eletrônica Excel, um algoritmo através do qual o MIG seria

²⁵ Cabe salientar que turbinas Michell-Banki são equipamentos considerados baratos, quando comparados, por exemplo, com turbinas Francis e Pelton, considerados convencionais.

automaticamente selecionado a partir dos dados da BFT, conforme o diagrama de blocos exposto na figura 78:

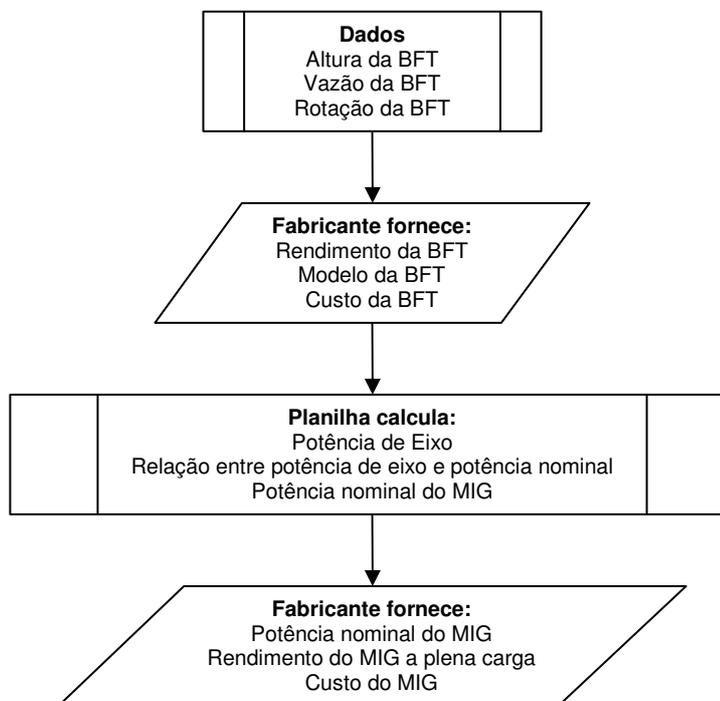


FIGURA 78 - Processo de seleção de BFTs e MIGs para cotação

As planilhas de seleção foram enviadas para 7 fabricantes nacionais de bombas hidráulicas, tendo, porém, somente a Schneider Motobombas e Imbil Bombas Hidráulicos retornado a solicitação. Cotou-se também, juntamente à WEG Equipamentos Elétricos SA, o valor de motores²⁶ adquiridos separadamente, através do distribuidor da empresa no Sul de Minas, Fábio Marinato Representações LTDA (vide anexo G). Foram levantados também os custos de grupos geradores convencionais. Os valores foram fornecidos pela empresa Betta Hidroturbinas, apresentados no anexo F.

Os dados obtidos foram trabalhados de forma a se obterem relações práticas,

²⁶ As cotações fornecidas são de motores padrão IP 55, de 60 Hz, 2 e 4 pólos.

aplicáveis no momento do estudo de viabilidade de MCHs, bem como para comparar os custos de grupos BFT/MIG com os de grupos geradores convencionais. Os dados obtidos e calculados estão compilados nos apêndices D e E.

Cabem algumas observações em relação aos apêndices D e E:

- O algoritmo empregado no cálculo dos parâmetros do MIG correspondem à seqüência apresentada na seção 5.1;
- Para simplificação dos cálculos, e considerando resultados práticos de outros trabalhos, o rendimento do MIG (η_{mig}) foi considerado 97% do rendimento nominal a plena carga de cada motor avaliado;
- O parâmetro potência elétrica nominal gerada pelo MIG (P_{elg}) é definido pela seguinte equação:

$$P_{elgc} = P_{ngc} \cdot \eta_{mig} \quad (56)$$

sendo:

P_{elgc} potência elétrica nominal gerada pelo MIG [kW];

P_{ngc} potência nominal comercial do MIG [kW];

η_{mig} rendimento do MIG [%].

- A potência elétrica fornecida pelo MIG (P_{el}), numericamente igual à potência instalada da MCH (P_{inst}), é dada por:

$$P_{elg} = P_{inst} = p \cdot g \cdot Q_t \cdot H_L \cdot \eta_t \cdot \eta_{mig} \quad (57)$$

onde:

P_{el} potência elétrica fornecida pelo MIG [kW];

- P_{inst} potência instalada da MCH [kW];
- ρ massa específica da água [considerada, no caso, 1.000 kg/m³];
- g aceleração da gravidade [considerada, no caso, 9,81 m/s²];
- Q_t vazão de projeto [m³/s];
- H_L queda líquida do aproveitamento [m];
- η_t rendimento da BFT [%];
- η_{mig} rendimento do MIG [%].

- O custo índice é calculado dividindo-se o custo de implantação (no caso, o custo do grupo BFT/MIG) pela potência instalada da MCH, de acordo com a equação 58:

$$CI = \frac{C_{BFT/MIG}}{P_{inst}} \quad (58)$$

com:

- CI custo índice [R\$/kW instalado];
- $C_{BFT/MIG}$ custo do grupo gerador BFT/MIG [R\$];
- P_{inst} potência instalada na MCH.

- Os custos dos motores de indução cotados individualmente não foram utilizados na definição de custos índices dos grupos BFT/MIG;
- A comparação entre custos ocorreu para quedas líquidas inferiores a 40 m, em função dos dados de grupos geradores convencionais disponíveis;
- Foram utilizados nos cálculos custos de bombas mancalizadas e monobloco.

Em relação aos custos de grupos geradores convencionais, realizou-se a cotação junto à Betta Hidroturbinas, que forneceu a tabela de valores relacionados à potência gerada, conforme anexo F²⁷. Os custos separados de turbinas e geradores (incluindo painel elétrico e regulador de velocidade) foram definidos de acordo com as seguintes condições, também fornecidas pelo fabricante:

- Turbinas monobloco fundidas: custo da turbina corresponde a 50 % do total do grupo;
- Turbinas Pelton: custo da turbina é igual a 55 % do total do grupo;
- Demais turbinas (Potência gerada inferior a 50 kVA): preço da turbina representa 70 % do custo do grupo;
- Demais turbinas (Potência gerada superior a 50 kVA): preço da turbina representa 60 % do custo do grupo.

6.2.2 CUSTOS DE MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS

A definição de um custo índice (R\$/kW instalado) de referência para microcentrais hidrelétrica não é tarefa simples. A dificuldade em se estabelecerem bases comparativas entre diversas centrais remete às especificidades de cada arranjo, bem como às externalidades características de cada região (por exemplo, custos com frete e disponibilidade de mão-de-obra). Num país de dimensões continentais como o Brasil, a variação de preços torna-se ainda mais acentuada.

Khennas e Barnett (2000) apresentam em seu trabalho o custo de 2

²⁷ Segundo informações da empresa, o fator de potência dos geradores é de 0,9 para equipamentos até 15 kVA, e 0,8 para potências superiores.

microcentrais hidrelétricas implantadas no Peru, entre 1992 e 1998, com potências instaladas de 11 e 35 kW. Os custos índice²⁸ dessas centrais foram, respectivamente, de US\$ 3.371,00 e US\$ 2.358,00.

Dados do ano de 2001 relacionam os custos de centrais hidrelétricas com potência inferior a 250 kW com a queda bruta do aproveitamento (ESHA, 2005), conforme o gráfico a seguir:

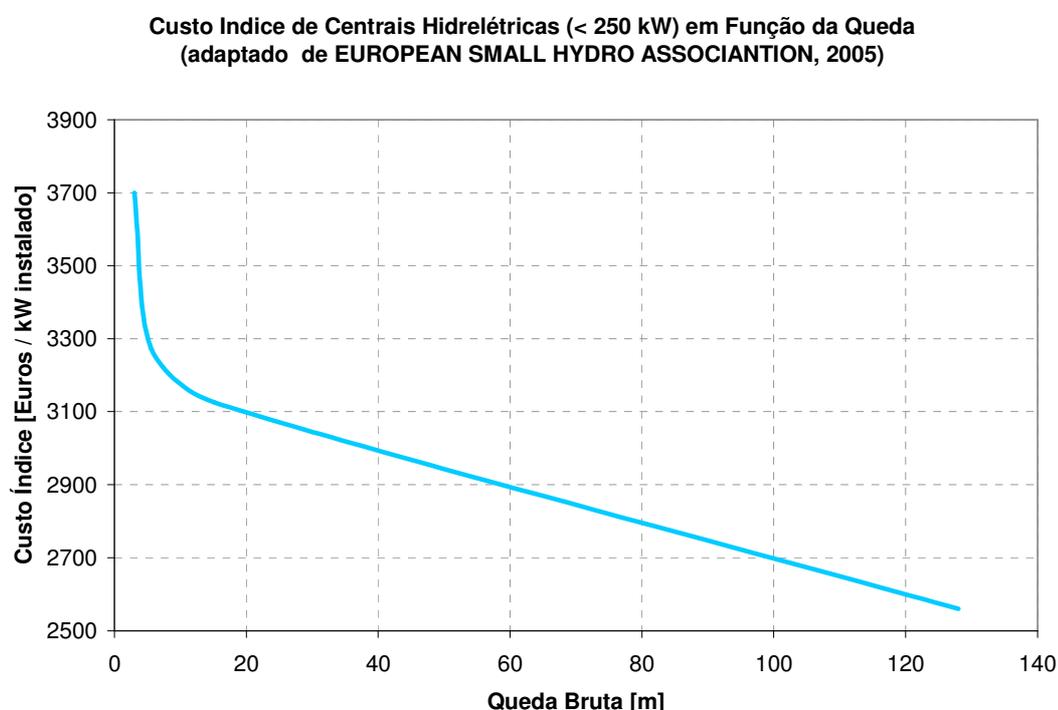


FIGURA 79 - Custo índice de MCHs em função da queda bruta (fonte: adaptado de ESHA, 2005)

O *Community Research & Development Information Service* (2002) também apresenta vários índices²⁹ sobre pequenas e microcentrais hidrelétricas, inclusive com estimativas para o ano de 2010, conforme tabela abaixo:

²⁸ Valores expressos em dólares americanos, cotados em 1998.

²⁹ Os custos são apresentados para projetos no sistema *turn-key*, incluindo todas as despesas (engenharia, materiais, mão de obra, etc), sendo a central entregue pronta para o início da operação.

TABELA 7 - Custos índices de MCHs e previsão para 2010

Faixa de Potência	Custo Índice [€/kW instalado]	Custo Índice Estimado para
		2010 [€/kW instalado]
1 a 10 MW	De 600 a 2.000	-
500 a 1.000 kW	De 1.300 a 4.500	De 1.000 a 3.000
100 a 500 kW	De 1.500 a 6.000	De 900 a 3.500
Inferior a 100 kW	De 1.500 a 6.000	De 900 a 3.500

Fonte: Community Research & Development Information Service, 2002

TABELA 8 - Custos índices de MCHs, por equipamento

Componentes	Custos de Microcentrais Hidrelétrica [US\$ e %]					
	3,5 kW		10 kW		50 kW	
	H [m]	Q [m ³ /s]	H [m]	Q [m ³ /s]	H [m]	Q [m ³ /s]
	50	0,014	32	0,062	85	0,1
Conduto	1.600,00 (12 %)		3.500,00 (14 %)		24.000,00 (36 %)	
Grupo gerador	3.300,00 (25 %)		6.000,00 (23 %)		9.500,00 (14 %)	
Controlador	1.900,00 (15 %)		3.600,00 (14 %)		5.400,00 (8 %)	
Linha de distribuição	1.500,00 (12 %)		3.500,00 (14 %)		7.500,00 (11 %)	
Casa de força	1.000,00 (8 %)		3.000,00 (12 %)		4.500,00 (7 %)	
Despesas gerais	1.650,00 (13 %)		1.800,00 (7 %)		4.500,00 (7 %)	
Instalação	2.000,00 (15 %)		4.500,00 (17 %)		10.500,00 (16 %)	
Custo índice [US\$ / kW]	3.700,00		2.590,00		1.318,00	

Fonte: Natural Resources Canada, 2004

Em relação ao mercado brasileiro, encontrou-se enorme dificuldade na

obtenção, junto a empresas, de custos de MCHs. Os únicos valores conseguidos foram fornecidos pelo Centro Nacional de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH), sendo estes, porém, referentes a usinas implantadas na região amazônica, onde as características geográficas e logísticas impedem que estes sejam tomados como referência para o resto do país.

Diante da grande variabilidade de custos de MCHs, devido às particularidades de cada arranjo e características regionais, Balarim (1999) apresentou uma metodologia para a estimativa de custos de centrais com até 100 kW, baseada em um projeto-padrão para estudo de viabilidade do Manual de Microcentrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 1985). Primeiramente, Balarim (1999) realizou o pré-dimensionamento de estruturas e componentes de MCHs, para condições padrões, seguindo as diretrizes de ELETROBRÁS (1985), simulando-se várias potências e quedas. Para cada um dos cenários simulados, foi feita a composição de preços para estruturas e equipamentos, com base em custos unitários obtidos no ano de 1998. Através de regressão, foram obtidas funções que correlacionam os custos de cada estrutura/equipamento com os parâmetros básicos de projeto, facilitando a estimativa do investimento necessário à implantação da central. As funções de custo obtidas por Balarim (1999) são apresentadas a seguir:

$$C_{bc} = (55,2965 \cdot H_{bc}^2 + 23,6985 \cdot H_{bc} + 88,4744) \cdot L_{bc} \quad (59)$$

onde:

C_{bc} ³⁰ custo de barragem de concreto [R\$];

H_{bc} altura da barragem de concreto [m];

L_{bc} comprimento da barragem de concreto [m].

³⁰ O custo já inclui vertedor/extravador, mão-de-obra e serviços.

$$C_{bpa} = (24,033 \cdot H_{bpa}^2 + 28,8396) \cdot L_{bpa} \quad (60)$$

com:

C_{bpa} ³¹ custo de barragem de pedra argamassada [R\$];

H_{bpa} altura da barragem de pedra argamassada [m];

L_{bpa} comprimento da barragem de pedra argamassada [m].

$$C_{btva} = (110,9675 \cdot H_{btva}^2 + 208,88) \cdot L_{btva} \quad (61)$$

sendo:

C_{btva} ³² custo da barragem de terra com vertedor em canal de alvenaria [R\$];

H_{btva} altura da barragem de terra com vertedor em canal de alvenaria [m];

L_{btva} comprimento da barragem de terra com vertedor em canal de alvenaria [m].

$$C_{btvt} = (43,8813 \cdot H_{btvt}^2 + 82,6) \cdot L_{btvt} \quad (62)$$

onde:

C_{btvt} ³³ custo da barragem de terra com vertedor em canal de terra [R\$];

H_{btvt} altura da barragem de terra com vertedor em canal de terra [m];

L_{btvt} comprimento da barragem de terra com vertedor em canal de terra [m].

$$C_{ta} = 221,67 + (Q \cdot 1705,1) \quad (63)$$

com:

C_{ta} custo da tomada d'água [R\$];

Q vazão de projeto [m³/s].

³¹ Idem à nota 21.

³² Idem à nota 21.

³³ Idem à nota 21.

$$C_{cra} = (13,87 + Q \cdot 34,8) \cdot L_{car} \quad (64)$$

sendo:

C_{car} custo do canal de adução revestido de alvenaria [R\$];

Q vazão de projeto [m^3/s];

L_{car} comprimento do canal de adução revestido de alvenaria [m].

$$C_{ct} = 890,7 \cdot Q^{0,344} \cdot L_{ct} \quad (65)$$

onde:

C_{ct} custo do canal de adução de terra [R\$];

Q vazão de projeto [m^3/s];

L_{ct} comprimento do canal de adução de terra [m].

$$C_{cl} = 20147 \cdot Q^{0,52} \cdot L_{cl} \quad (66)$$

com:

C_{cl} custo do conduto livre de ferro dúctil [R\$];

Q vazão de projeto [m^3/s];

L_{cl} comprimento do conduto livre de ferro dúctil [R\$].

$$C_{cc} = 465,5246 + Q \cdot 1612,6 \quad (67)$$

onde:

C_{cc} custo da câmara de carga [R\$];

Q vazão de projeto [m^3/s].

$$C_{c_{off}} = 231,1489 \cdot P^{0,5563} \cdot H_B^{-0,6239} \cdot L_{c_{off}} \quad (68)$$

com:

- C_{cff} custo do conduto forçado de ferro dúctil [R\$];
 P potência instalada [kW];
 H_B queda bruta [m];
 L_{cff} comprimento do conduto forçado de ferro dúctil [m].

$$C_{\text{cfpvc}} = 197,6425 \cdot P^{0,9049} \cdot H_B^{-1,2641} \cdot L_{\text{cfpvc}} \quad (69)$$

sendo:

- C_{cfpvc} custo do conduto forçado de PVC [R\$];
 P potência instalada [kW];
 H_B queda bruta [m];
 L_{cfpvc} comprimento do conduto forçado de PVC [m].

$$C_{\text{cm}} = 16052,839 \cdot P^{0,1873} \cdot H_B^{-0,27} \quad (70)$$

onde:

- C_{cm} custo da casa de máquinas [R\$];
 P potência instalada [kW];
 H_B queda bruta [m].

$$C_{\text{tf}} = 17321,1746 \cdot P^{0,6294} \cdot H_B^{-0,6186} \quad (71)$$

com:

- C_{tf} custo dos equipamentos eletromecânicos, turbina Francis [R\$];
 P potência instalada [kW];
 H_B queda bruta [m].

$$C_{\text{tmb}} = 4969,0055 \cdot P^{0,5839} \cdot H_B^{-0,4035} \quad (72)$$

sendo:

C_{imb} custo dos equipamentos eletromecânicos, turbina Michell-Banki [R\$];

P potência instalada [kW];

H_B queda bruta [m].

$$C_{\text{tbft}} = 2440,0309 \cdot 1,0252^P \quad (73)$$

onde:

C_{tbft} custo dos equipamentos eletromecânicos, BFT [R\$];

P potência instalada [kW].

$$C_{\text{rd}} = 8,0253 \cdot 1,0141^P \cdot L_{\text{rd}} \quad (74)$$

com:

C_{rd} custo da rede de distribuição [R\$];

P potência instalada [kW];

L_{rd} comprimento da rede de distribuição [m].

O custo do canal de fuga é idêntico ao do canal de adução, de acordo com o tipo de canal.

O fato das cotações de equipamentos presentes no trabalho de Balarim (1999) terem sido realizadas em 1998 faz com que a aplicação das funções para a estimativa de custos, atualmente, apresente distorções em relação aos valores reais. Uma alternativa para se contornar esse inconveniente é a dolarização das funções de custo, assumindo-se que, nessa moeda, os custos apresentam uma estabilidade. Para tanto, adotou-se a cotação média do dólar indicada por Balarim (1999), de R\$ 1,13 por dólar.

Baseando-se nas mesmas premissas consideradas na seção 6.2.1, onde se fez necessária a simulação de vários aproveitamentos para a definição dos custos índices de grupos geradores convencionais e BFT/MIG, adota-se uma metodologia semelhante para a definição dos custos índices de MCHs, que permite a análise dos impactos de BFTs e MIGs sobre estes.

Inicialmente, implementaram-se as funções de custos propostas por Balarim (1999) em planilha eletrônica, cuja interface pode ser visualizada no apêndice F. As funções relativas ao custo de equipamentos eletromecânicos (para turbinas Michell-Banki e BFT) foram substituídas por aquelas obtidas no presente trabalho (figuras 103 a 109).

A partir da planilha, foram simulados alguns arranjos de MCHs, e seus respectivos custos. Todos os aproveitamentos apresentaram, em comum, os seguintes parâmetros:

- Altura da barragem (soleira): 1 m;
- Comprimento da barragem: 10 m;
- Tipo de barragem: concreto;
- Tipo de sistema de adução em baixa pressão: canal de adução com revestimento em alvenaria;
- Comprimento do canal: 30 m;
- Material do conduto forçado: ferro dúctil;
- Comprimento da rede de distribuição: 100m;
- Comprimento do canal de fuga: 5 m;
- Rendimento do sistema de adução: 97 %;
- Rendimento total da central: 70 %.

Com base nessas constantes, realizou-se a variação da queda bruta (entre 20 e 40 m), e da vazão, de forma que a potência instalada se mantivesse inferior a 100 kW. Variou-se também o comprimento do conduto forçado, em função da queda bruta. As centrais simuladas, com seus respectivos custos, são apresentadas no apêndice G.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Faz-se, a seguir, uma análise dos principais resultados dos estudos técnicos e econômicos desenvolvidas.

7.1 VIABILIDADE TÉCNICA

7.1.1 ENSAIOS NO GRUPO BFT/MIG

Apresentam-se os gráficos ilustrativos dos resultados dos ensaios realizados no grupo gerador BFT/MIG. Os gráficos foram traçados com os valores médios dos dados aqisitados para cada ponto de ensaio, sendo estes apresentados, em forma tabular, no apêndice H.

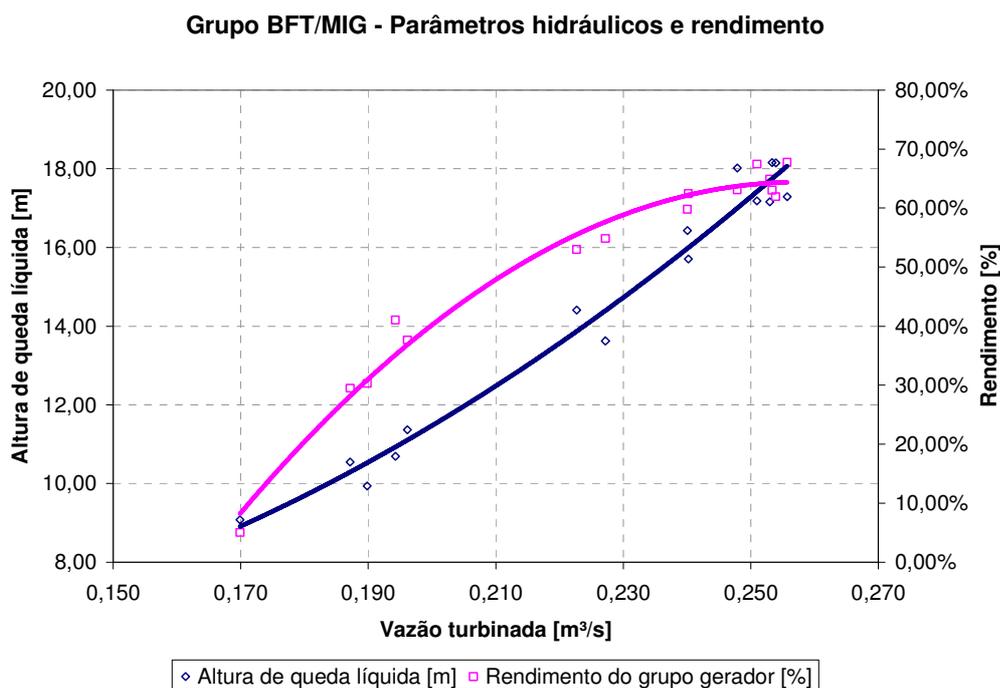


FIGURA 80 – Parâmetros hidráulicos, grupo BFT/MIG

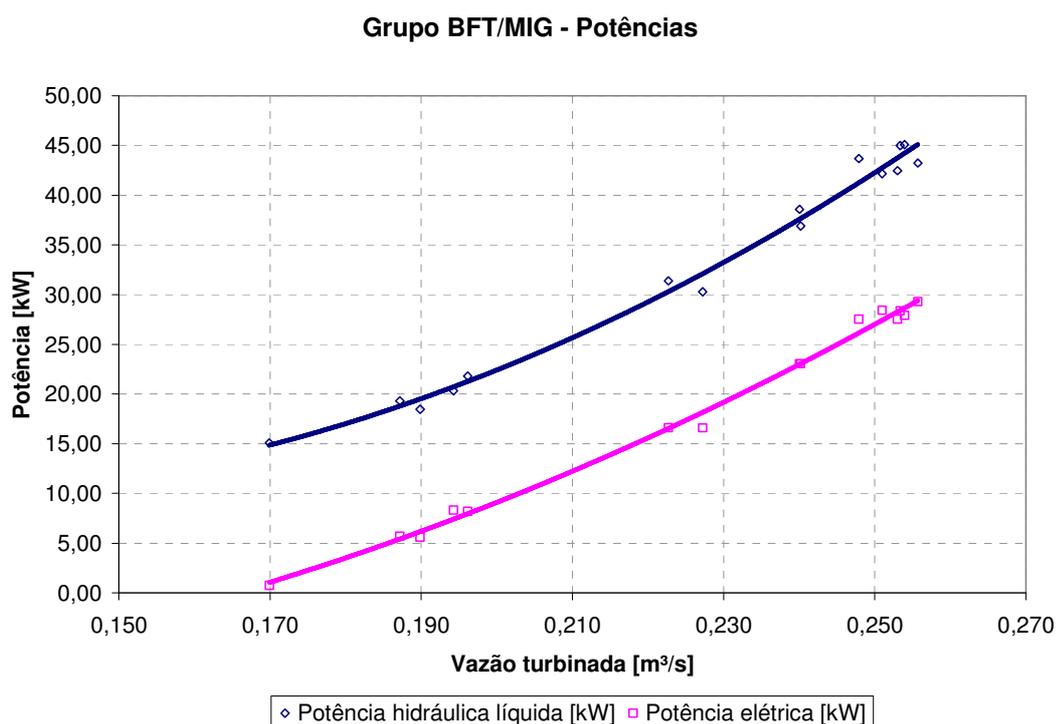


FIGURA 81 – Potências, grupo BFT/MIG

7.1.1.1 Análise dos resultados e comparação com os resultados teóricos esperados

Através da figura 80, percebe-se que o rendimento do grupo BFT/MIG apresenta grande sensibilidade à variação de vazão, sendo este comportamento esperado, com base na bibliografia revisada.

Durante os ensaios, não foi possível atingir a vazão e a altura de queda líquida nominais da BFT, respectivamente $0,273 \text{ m}^3/\text{s}$ e $21,8 \text{ m}$. Essa limitação ocorreu em função da elevada perda de carga proveniente da válvula borboleta instalada à jusante da BFT, que extrapolou os valores previstos no projeto. No ponto nominal, o rendimento teórico da BFT é de $83,5\%$, e o do MIG de $93,0\%$, resultando num rendimento teórico do grupo gerador de $77,7\%$, sendo ambos os rendimentos estimados pelo método de Chapallaz. Na figura 80, percebe-se que o máximo

rendimento alcançado pelo grupo BFT/MIG (sem se atingir o ponto de funcionamento de projeto), foi de 67,8%. Considerando a relação empírica obtida a partir dos ensaios da empresa Worthington (figura 33), estima-se que o rendimento real da BFT, no ponto nominal, seria de aproximadamente 78,3%, resultando num rendimento do grupo gerador de 72,8%.

Tem-se uma diferença de aproximadamente 5,0% entre o rendimento teórico do grupo BFT/MIG para o ponto de funcionamento nominal, obtido pelo método de Chapallaz e aperfeiçoado pela relação experimental da Worthington, e o máximo rendimento real alcançado pelo grupo (com vazão e altura de queda líquida inferiores às de projeto). Diante disso, e admitindo-se que a diferença pode ser minimizada ao se atingir o ponto nominal de funcionamento do grupo BFT/MIG, considera-se que o desempenho do grupo ensaiado foi satisfatório em relação ao rendimento teórico esperado.

7.1.2 ENSAIOS NO GRUPO GERADOR COM TURBINA MICHELL-BANKI

As figura 82 a 85 apresentam os resultados dos ensaios no grupo gerador convencional (turbina Michell-Banki), estando as respectivas tabelas de dados na apêndice I.

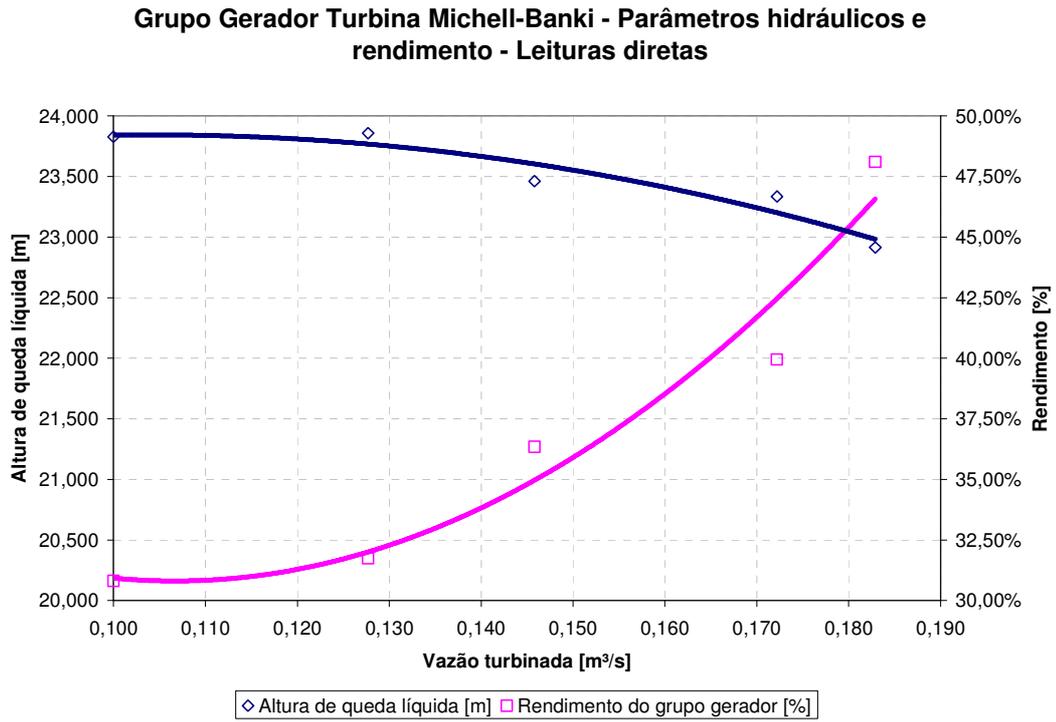


FIGURA 82 – Parâmetros hidráulicos, grupo gerador com Michell-Banki – Leituras diretas

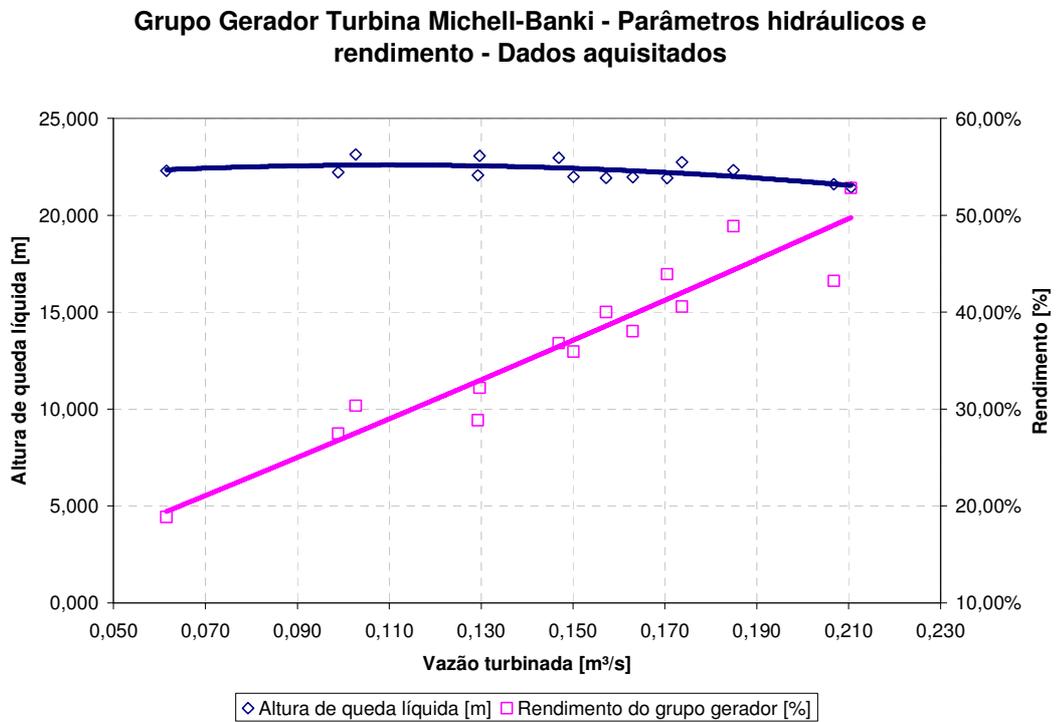


FIGURA 83 – Parâmetros hidráulicos, grupo gerador com Michell-Banki – Dados aquisitados

Grupo Gerador Turbina Michell-Banki - Potências - Leituras diretas

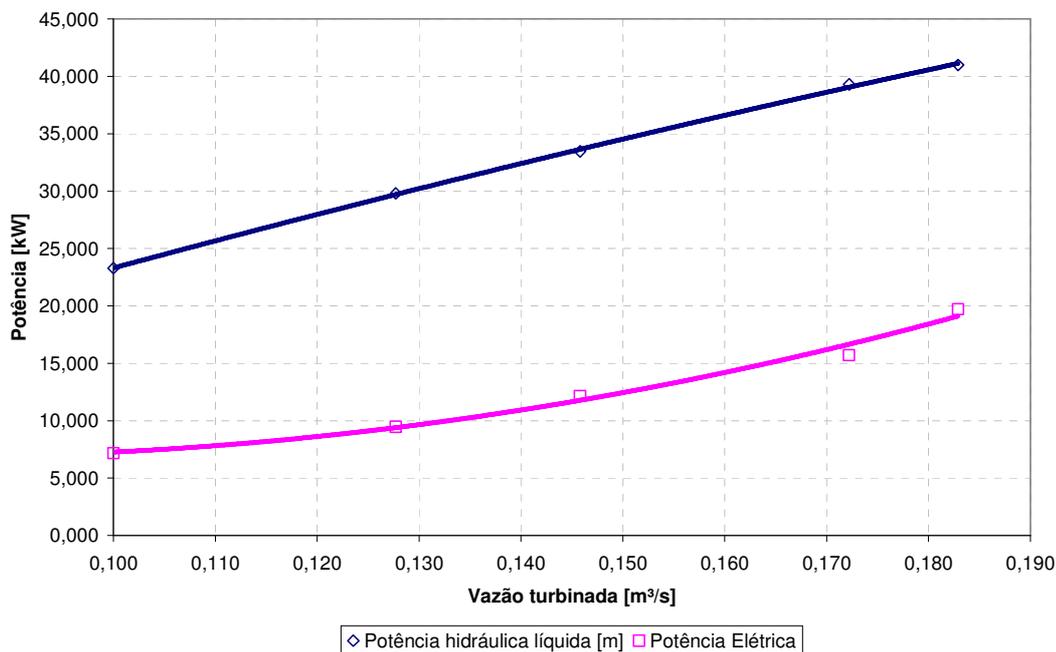


FIGURA 84 – Potências, grupo gerador com Michell-Banki – Leituras diretas

Grupo Gerador Turbina Michell-Banki - Potências - Dados aquisitados

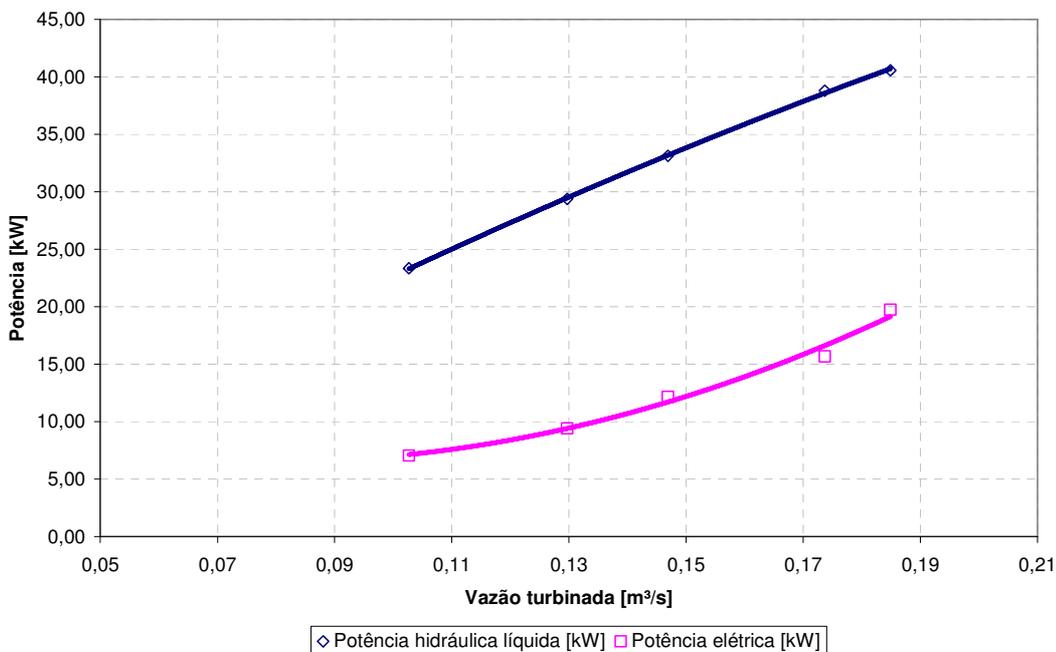


FIGURA 85 – Potências, grupo gerador com Michell-Banki – Dados aquisitados

O grupo gerador com Michell-Banki, no qual a vazão foi variada através da pá do distribuidor, com rotação constante mantida pelo sistema de cargas por resistência líquida, apresentou um rendimento máximo de 48%. Nessa condição, com o distribuidor totalmente aberto, obteve-se a vazão de 0,183 m³/s, correspondente a uma queda líquida de 22,0 m, potência hidráulica de 44 kW e potência elétrica de 23 kW. Considerando-se um rendimento de 85% para o gerador, a turbina Michell-Banki apresentou um rendimento de 57%, considerado satisfatório para turbinas nacionais desse tipo, segundo estudos e experiências práticas desenvolvidos na UNIFEI.

7.1.2.1 Análise dos resultados e comparação com o grupo BFT/MIG

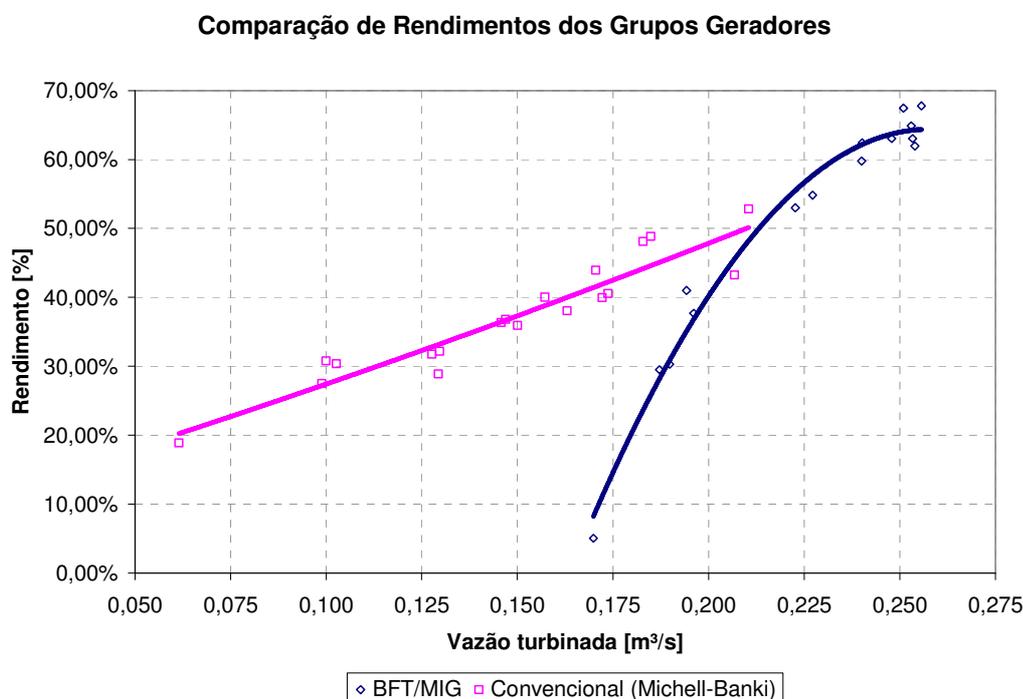


FIGURA 86 – Comparação de rendimentos dos grupos geradores

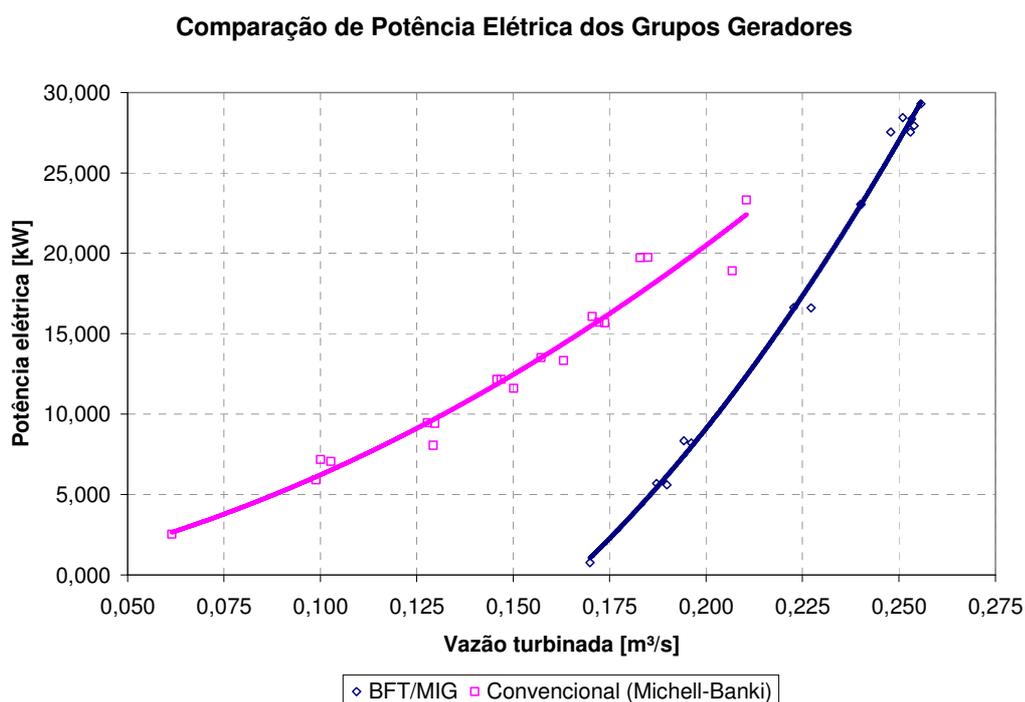


FIGURA 87 – Comparação de potências elétricas dos grupos geradores

Observando-se a figura 86, percebe-se que o grupo gerador formado pela turbina Michell-Banki e o gerador convencional é mais robusto que o grupo BFT/MIG no tocante à sensibilidade do rendimento em relação à variação de vazão. Sendo assim deve-se, no momento do projeto para a utilização de BFTs, dar atenção especial aos estudos hidrológicos do aproveitamento, para a definição precisa das vazões mínimas. As BFTs devem ser selecionadas para operar em vazões com permanência próxima a 100%, de forma que se evite a acentuada queda de rendimento em períodos secos. Fica claro também que o máximo rendimento alcançado pelo grupo BFT/MIG (mesmo sem se atingir o ponto nominal de funcionamento) é superior ao do grupo convencional. Deve-se salientar que a turbina Michell-Banki foi reformada antes dos ensaios, estando em boas condições durante estes.

7.2 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DA TECNOLOGIA

7.2.1 CUSTO ÍNDICE DE GRUPOS BFT/MIG

Com base no exposto na seção 6.2.1, foram obtidas várias relações de custo de BFTs e MIGs. Pretende-se que tais relações possam ser utilizadas no momento dos estudos de viabilidade e projeto básico de MCHs. Além disso, tais relações permitem aferir o impacto da tecnologia BFT/MIG sobre os custos de MCHs. As relações são expressas pelos gráficos a seguir:

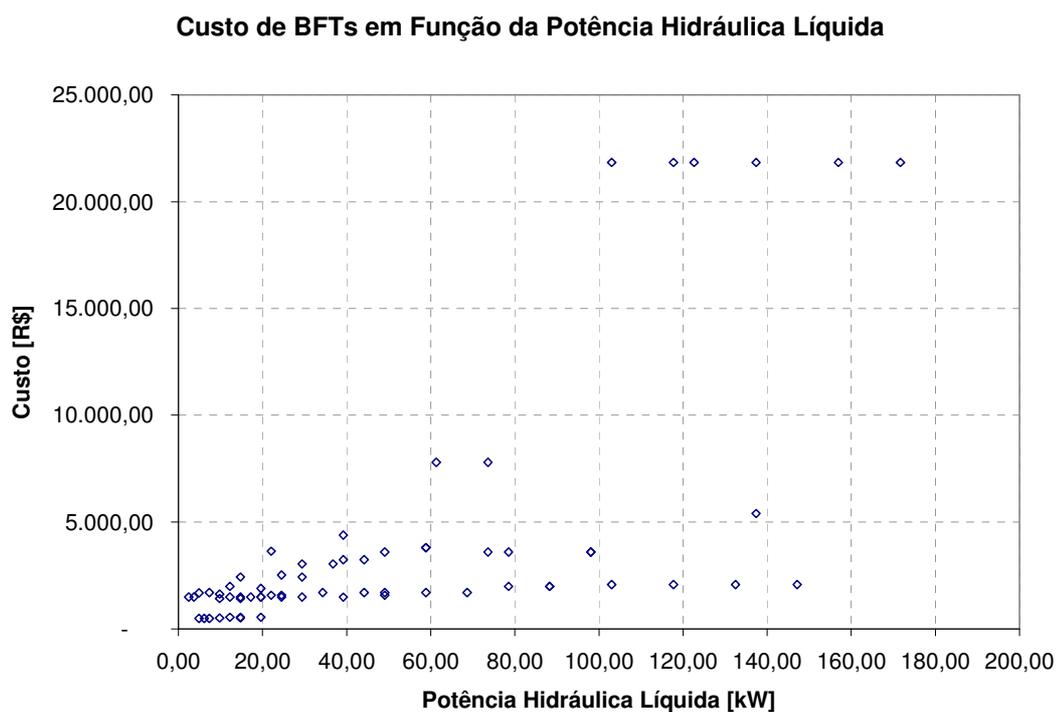


FIGURA 88 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida

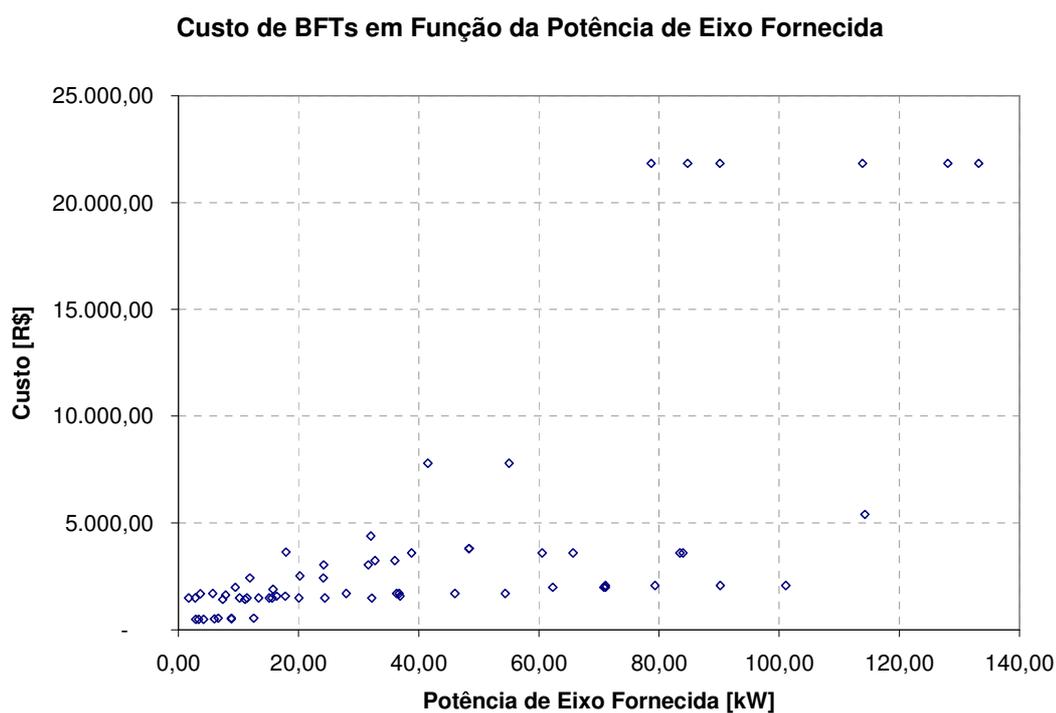


FIGURA 89 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida

Percebe-se não haver uma correlação bem definida entre os custos de BFTs e as potências hidráulica líquida e de eixo fornecidas. A explicação para esse fato reside na grande influência que a altura de elevação (no caso, queda líquida) exerce sobre o custo de bombas centrífugas, para uma mesma potência. Para se obter a correlação desejada, realizaram-se regressões por faixa de queda:

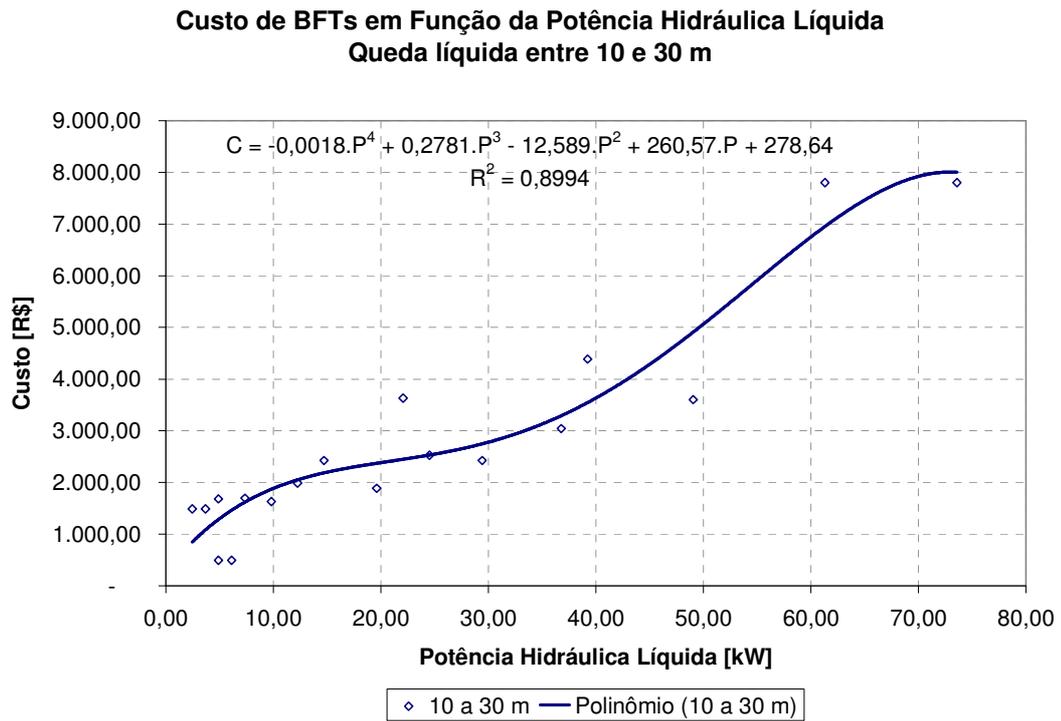


FIGURA 90 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 10 e 30 m)

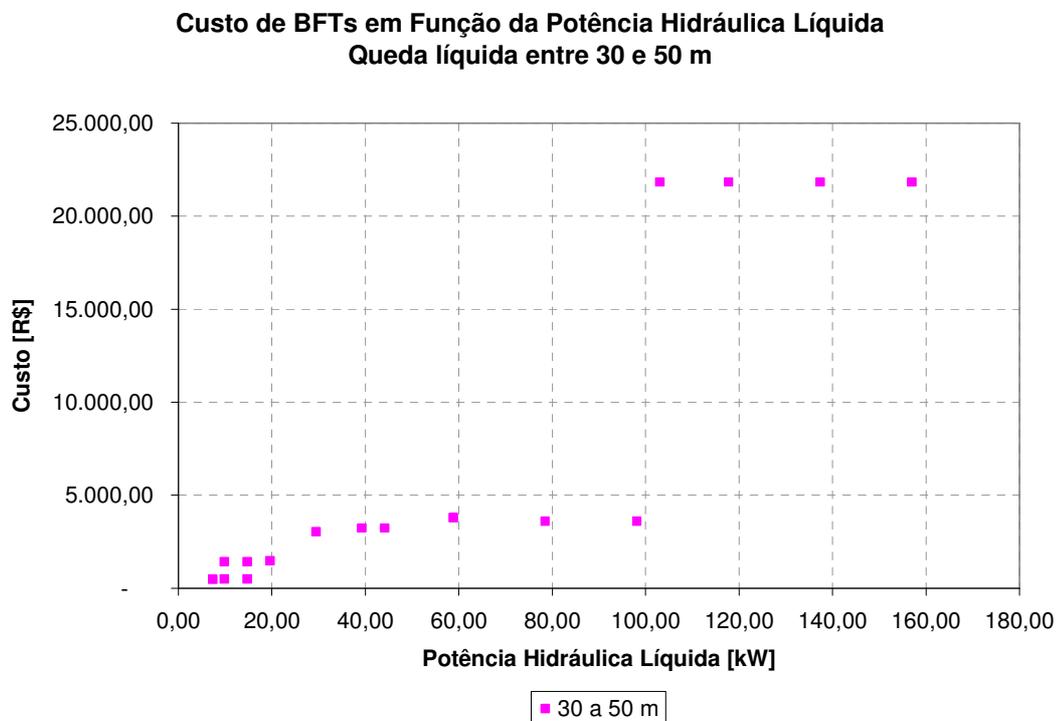


FIGURA 91 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 30 e 50 m)

Percebe-se na figura 91 uma clara mudança de tendência de custos para potências hidráulicas líquidas superiores a 100 kW. Analisando-se as duas faixas separadamente, obtêm-se as seguintes relações:

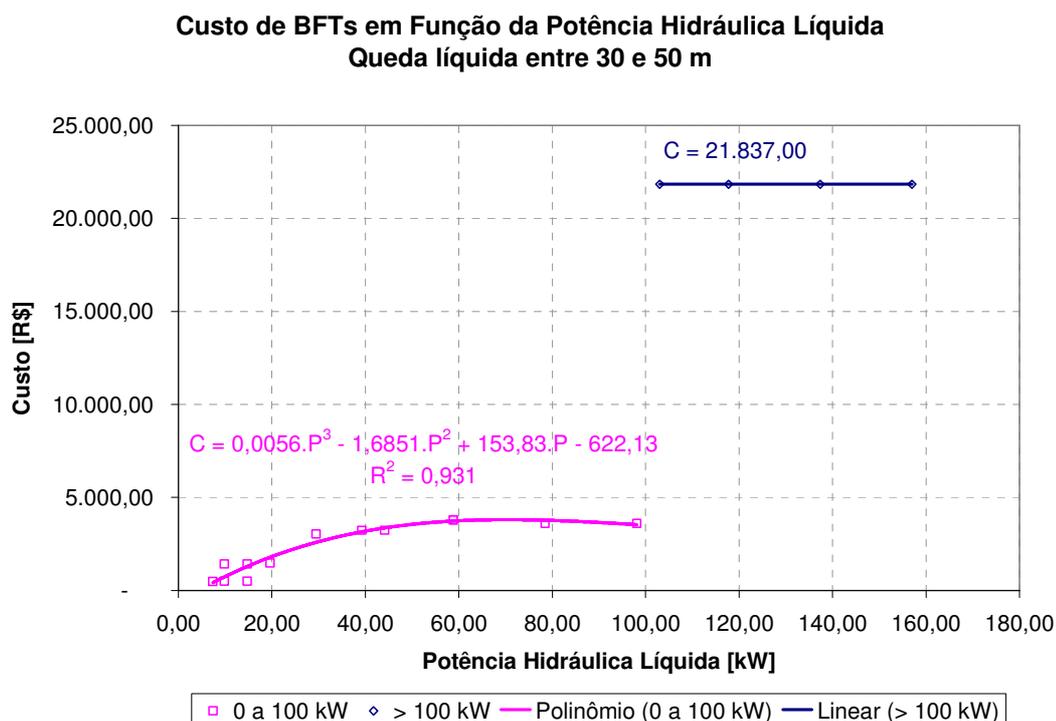


FIGURA 92 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 30 e 50 m)

A constância dos custos para potências hidráulicas líquidas superiores a 100 kW se deve ao fato de um mesmo modelo de BFT atender aos pontos avaliados nessa faixa.

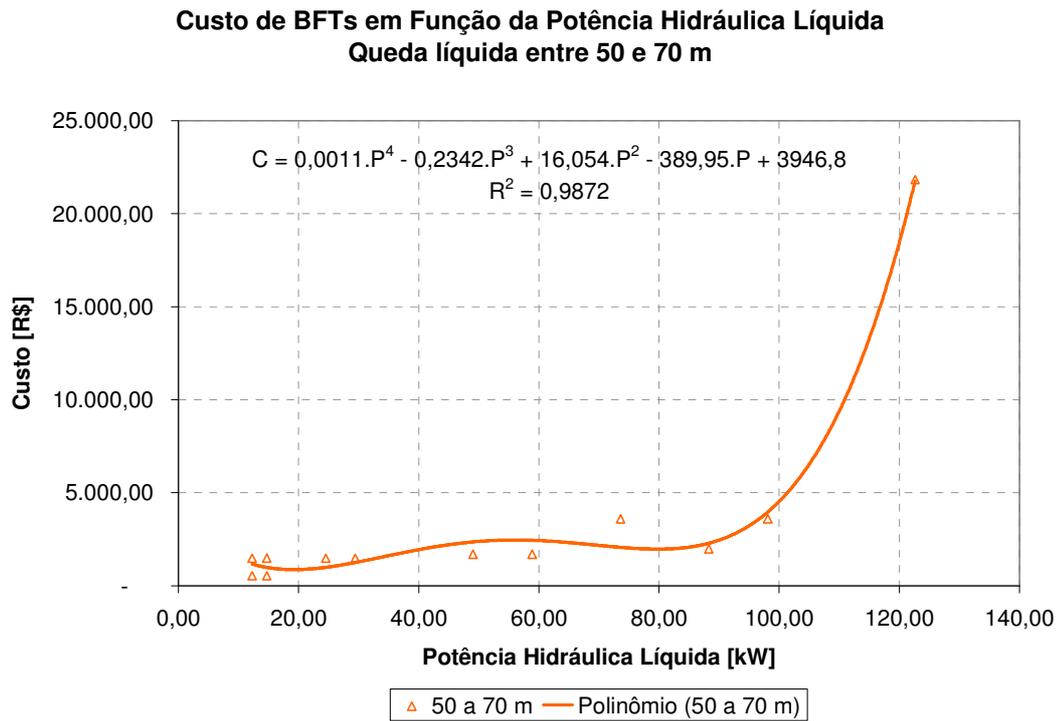


FIGURA 93 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 50 e 70 m)

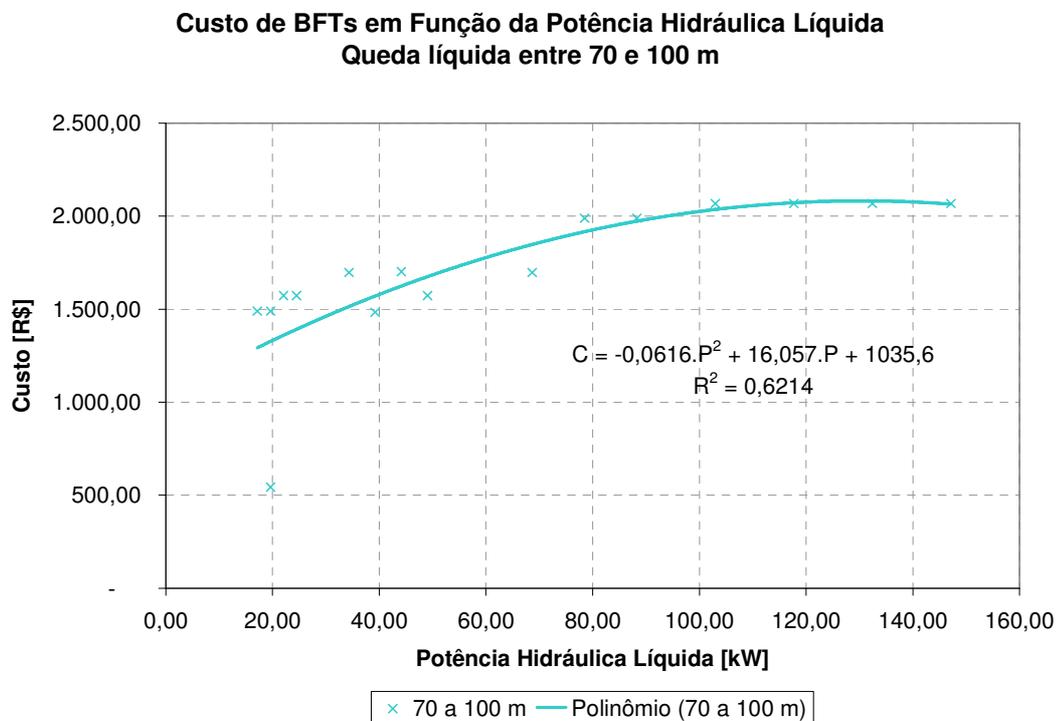


FIGURA 94 - Custo de BFTs em função da potência hidráulica líquida (queda líquida entre 70 e 100

m)

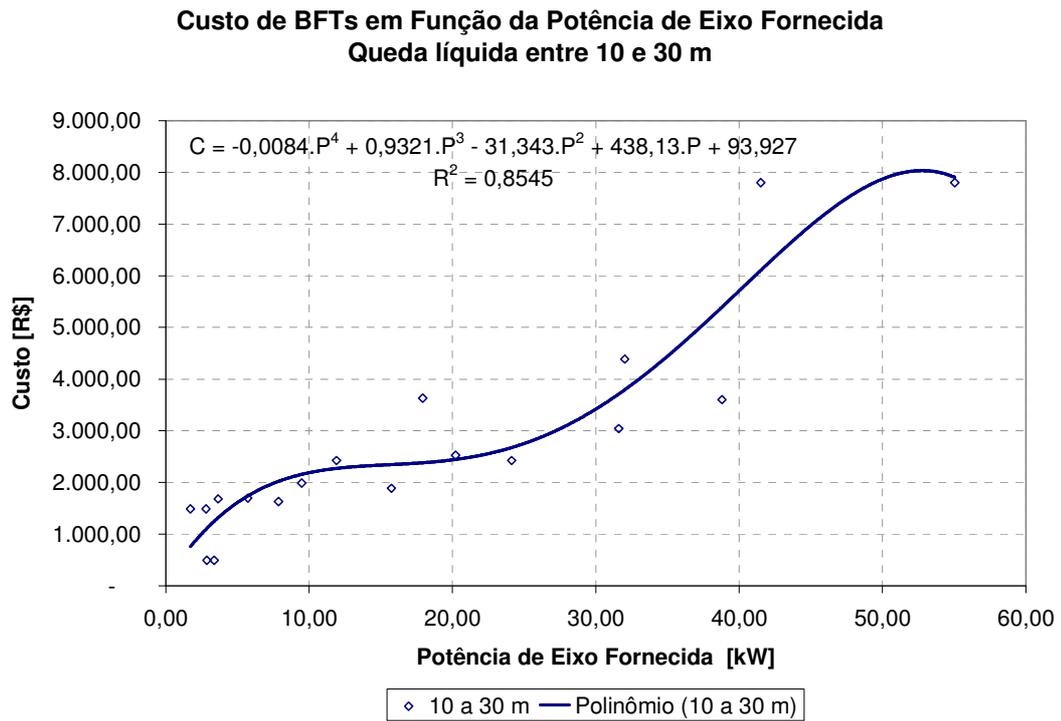


FIGURA 95 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida (queda líquida entre 10 e 30 m)

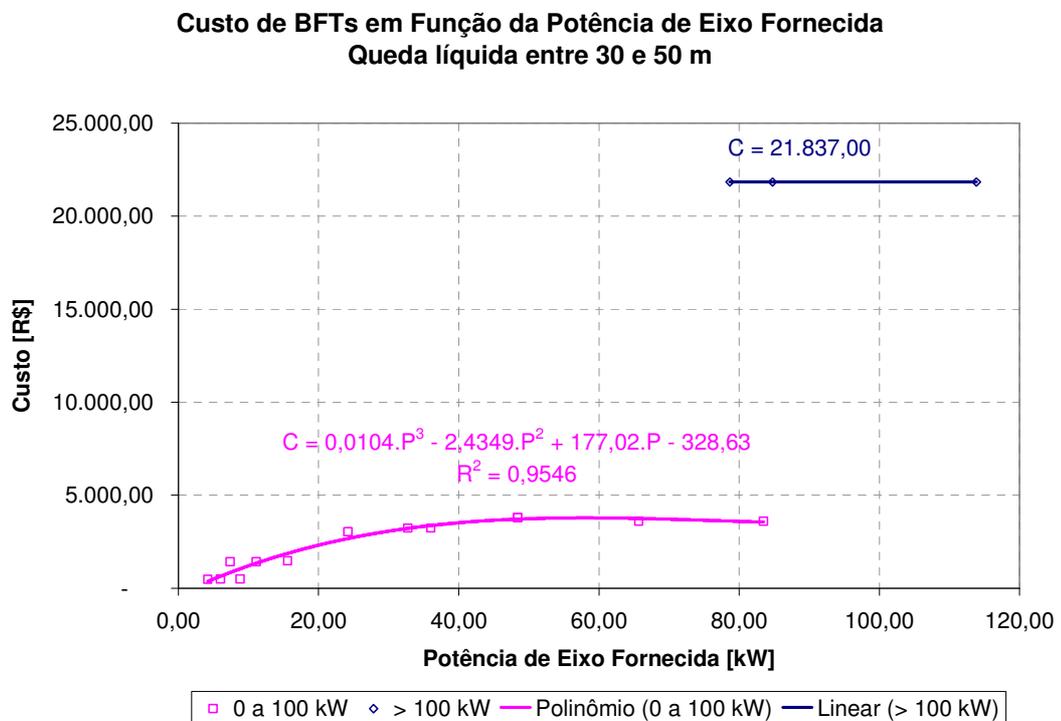


FIGURA 96 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida (queda líquida entre 30 e 50 m)

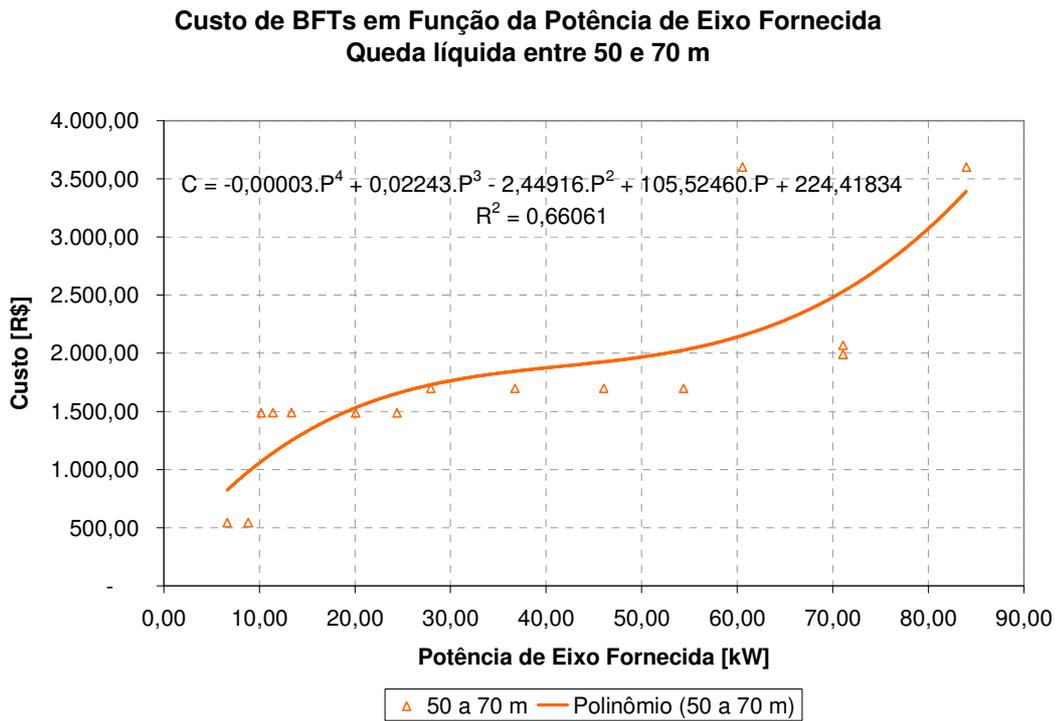


FIGURA 97 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida (queda líquida entre 50 e 70 m)

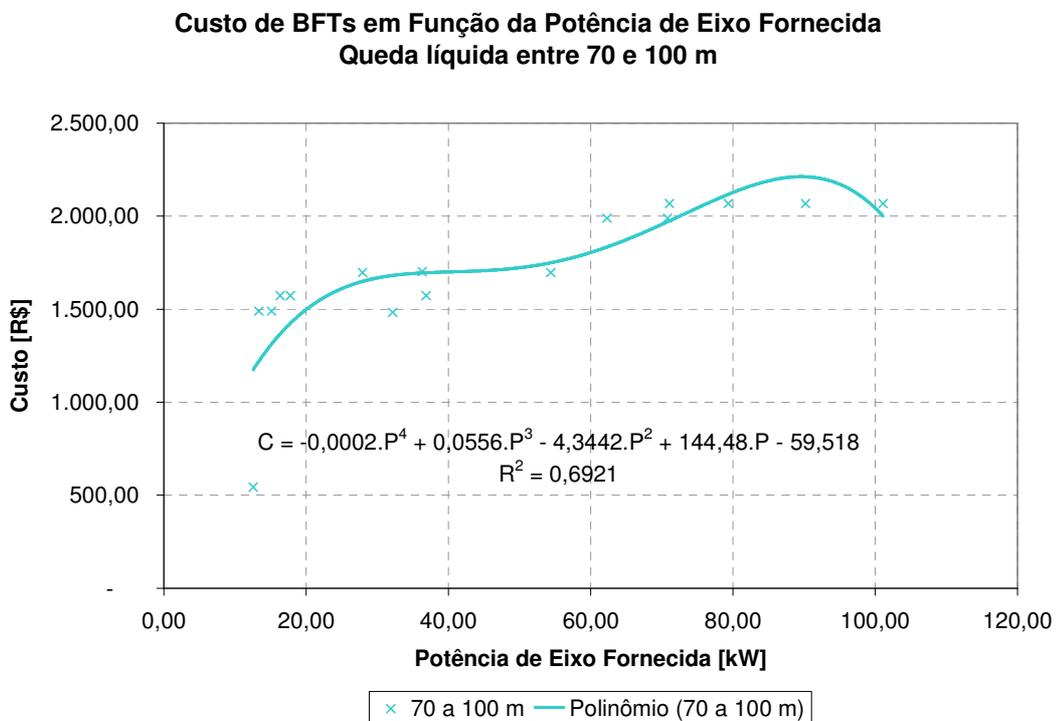


FIGURA 98 - Custo de BFTs em função da potência de eixo fornecida (queda líquida entre 70 e 100

m)

Os gráficos $\text{Custo} = f(\text{Potência Hidráulica Líquida})$ são úteis numa pré-análise de custos. De posse dos dois parâmetros básicos de qualquer aproveitamento hidrelétrico, queda líquida e vazão de projeto, pode-se, através dos gráficos, estimar o custo da BFT aplicável. Já as relações $\text{Custo} = f(\text{Potência de Eixo Fornecida})$ permitem analisar os custos da BFT juntamente ao do MIG ou gerador convencional ao qual ela será acoplada, bem como a valoração de bombas funcionando como motor hidráulico (para geração de energia mecânica).

A seguir, são apresentados os gráficos que exprimem os custos índice de BFTs, em função da queda líquida:

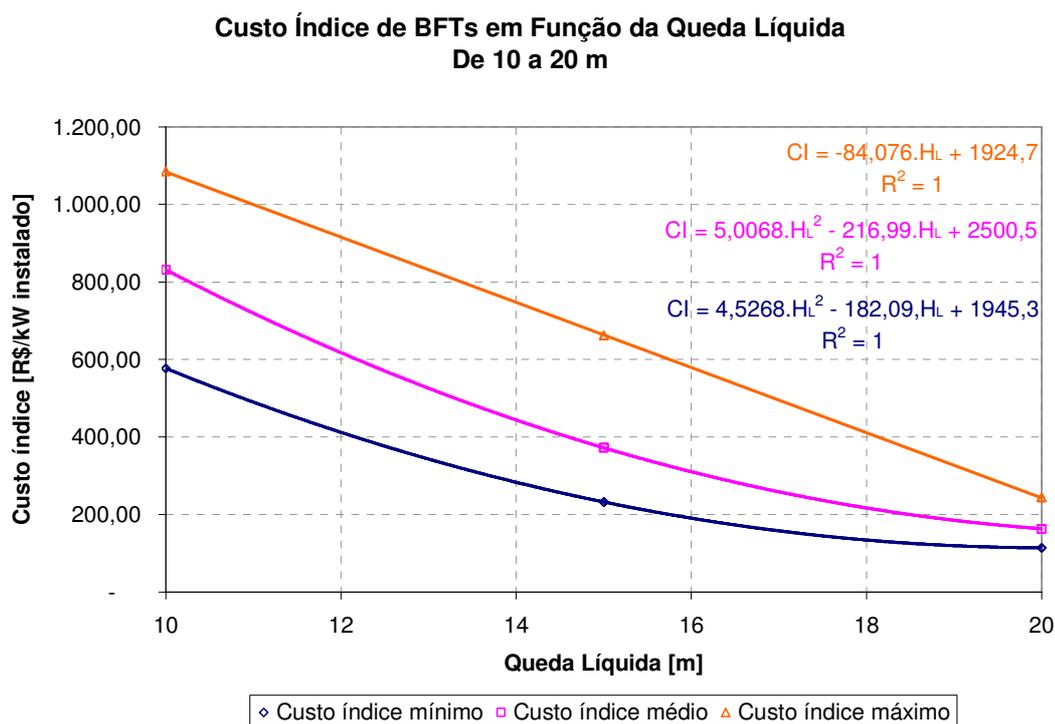


FIGURA 99 - Custo índice de BFTs em função da queda líquida (de 10 a 20 m)

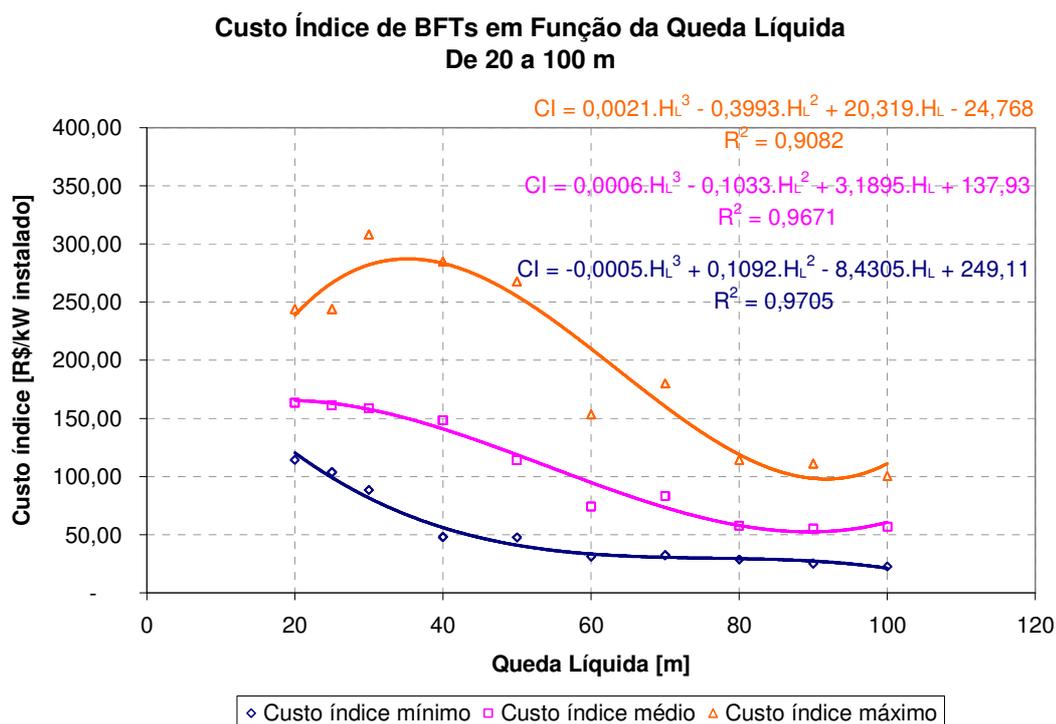


FIGURA 100 - Custo índice de BFTs em função da queda líquida (de 20 a 100 m)

Os custos de MIGs são apresentados nas figuras 101 e 102:

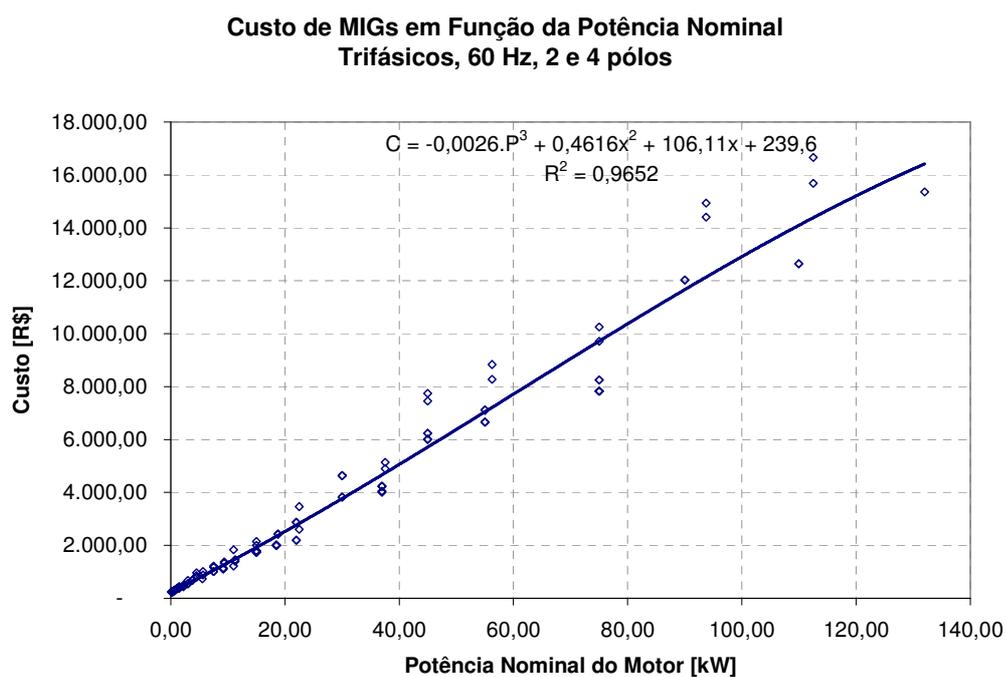


FIGURA 101 - Custo de MIGs em função da potência nominal

Custo de MIGs em Função da Potência Elétrica Gerada Trifásicos, 60 Hz, 2 e 4 polos

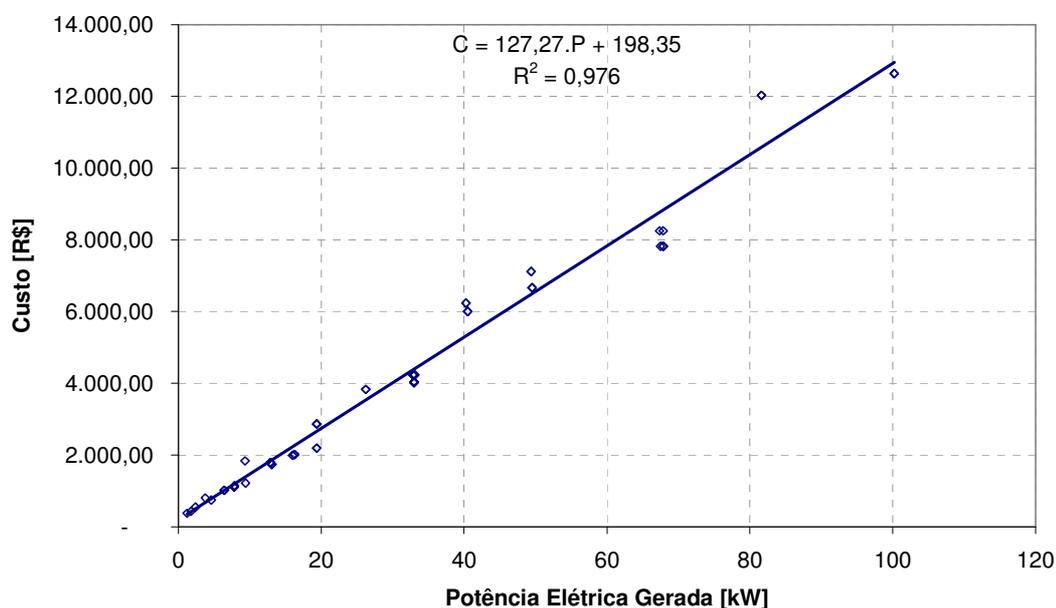


FIGURA 102 - Custo de MIGs em função da potência elétrica gerada

A correlação $\text{Custo} = f(\text{Potência Nominal})$ permite a cotação do MIG de posse da potência de eixo fornecida pela BFT. As figuras 101 e 102 demonstram que os custos de MIGs apresentam uma relação bem definida tanto com sua potência nominal quanto com a potência elétrica gerada.

De posse dos dados fornecidos pelos fabricantes, pôde-se determinar as curvas com os custos índices de grupos geradores BFT/MIG. Os gráficos, apresentados abaixo, foram divididos em faixas de 10 a 20 m, e de 20 a 100 m, para que as regressões realizadas apresentassem melhor coeficiente de determinação (R^2)³⁴. Buscando manter a validade dos dados para futuras consultas, são apresentados também os valores em dólar, para cotação de R\$ 2,063 / US\$, em

³⁴ O coeficiente de determinação “[...] deve ser interpretado como a proporção da variação total da variável dependente y que é explicada pela variação da variável independente x.” (LAPPONI, 2000). O R^2 , igual ao quadrado do coeficiente de correlação, expressa a qualidade do ajuste de uma função de regressão. Quanto mais próximo a 1, melhor o ajuste.

27/03/2007.

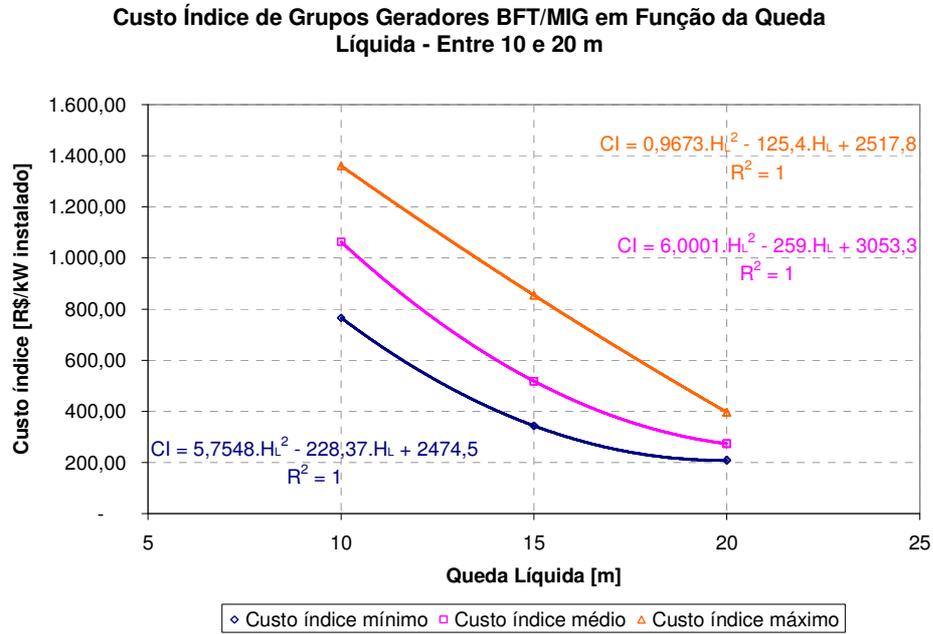


FIGURA 103 - Custo índice de grupos geradores BFT/MIG em função da queda líquida (entre 10 e 20 m)

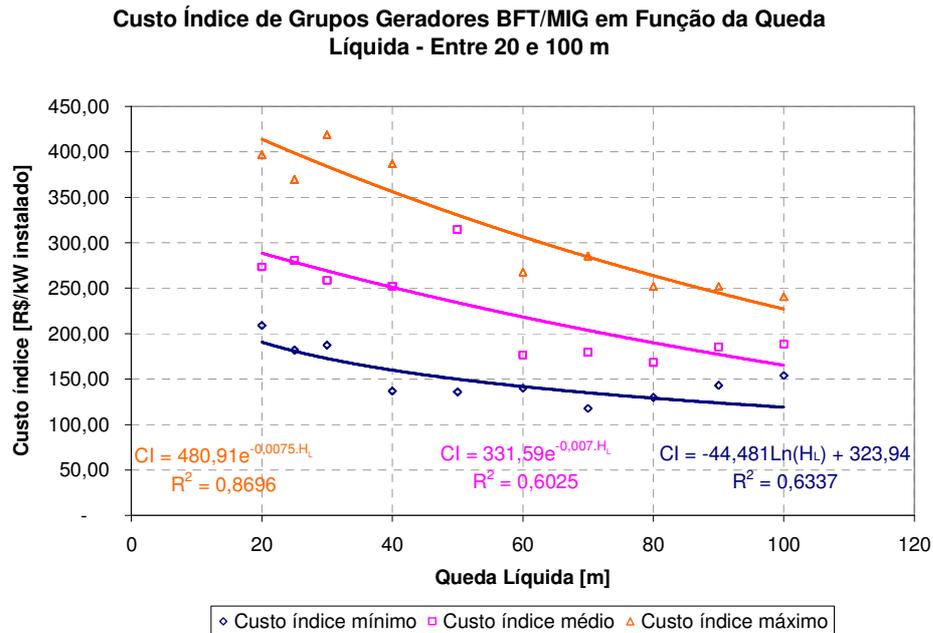


FIGURA 104 - Custo índice de grupos geradores BFT/MIG em função da queda líquida (entre 20 e 100 m)

Custo Índice de Grupos Geradores BFT/MIG em Função da Queda Líquida - Dólares - Entre 10 e 20 m

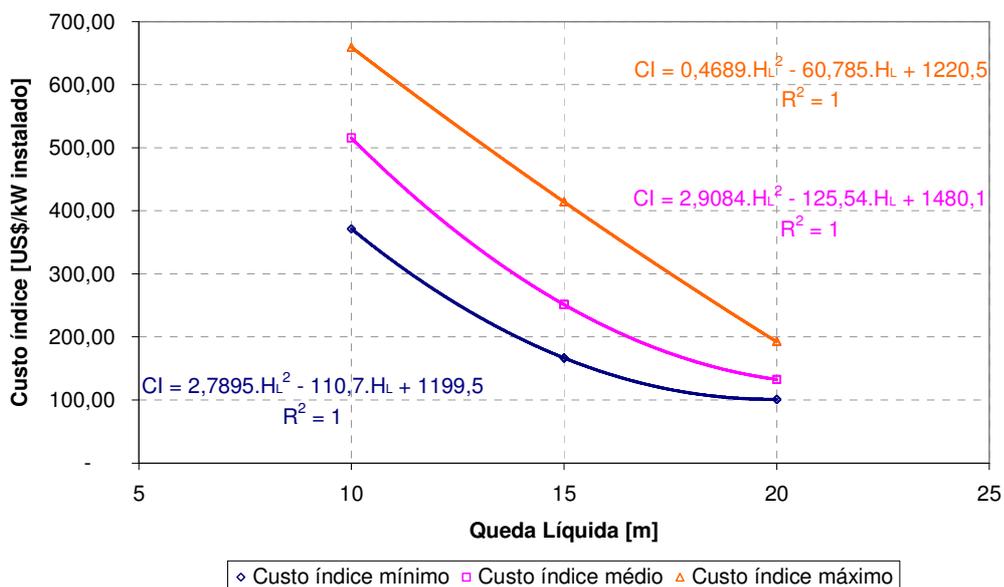


FIGURA 105 - Custo índice de grupos geradores BFT/MIG em função da queda líquida - Dólares (entre 10 e 20 m)

Custo Índice de Grupos Geradores BFT/MIG em Função da Queda Líquida - Dólares - Entre 20 e 100 m

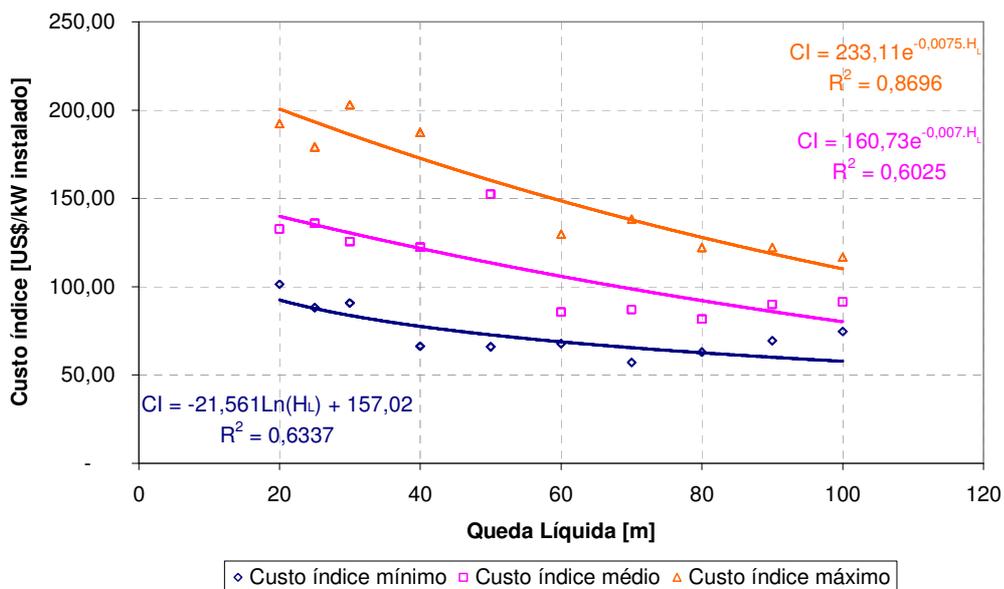


FIGURA 106 - Custo índice de grupos geradores BFT/MIG em função da queda líquida - Dólares (entre 20 e 100 m)

Custo Índice de Turbinas Hidráulicas em Função da Queda Líquida De 5 a 40 m

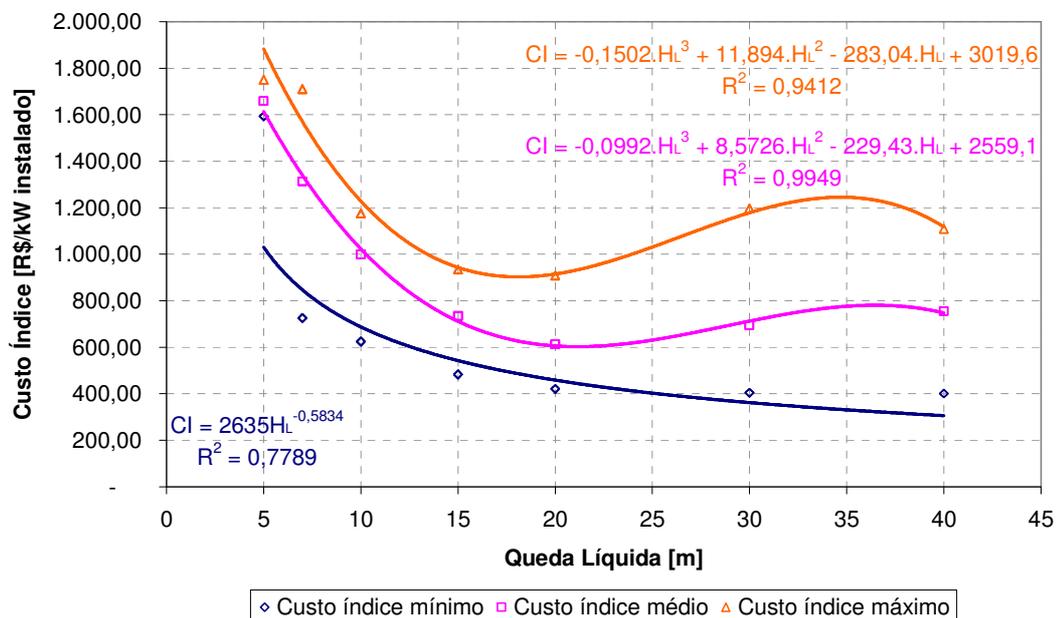


FIGURA 107 - Custo índice de turbinas hidráulicas em função da queda líquida (de 5 a 40 m)

Custo Índice de Grupos Geradores Convencionais em Função da Queda Líquida - De 5 a 40 m

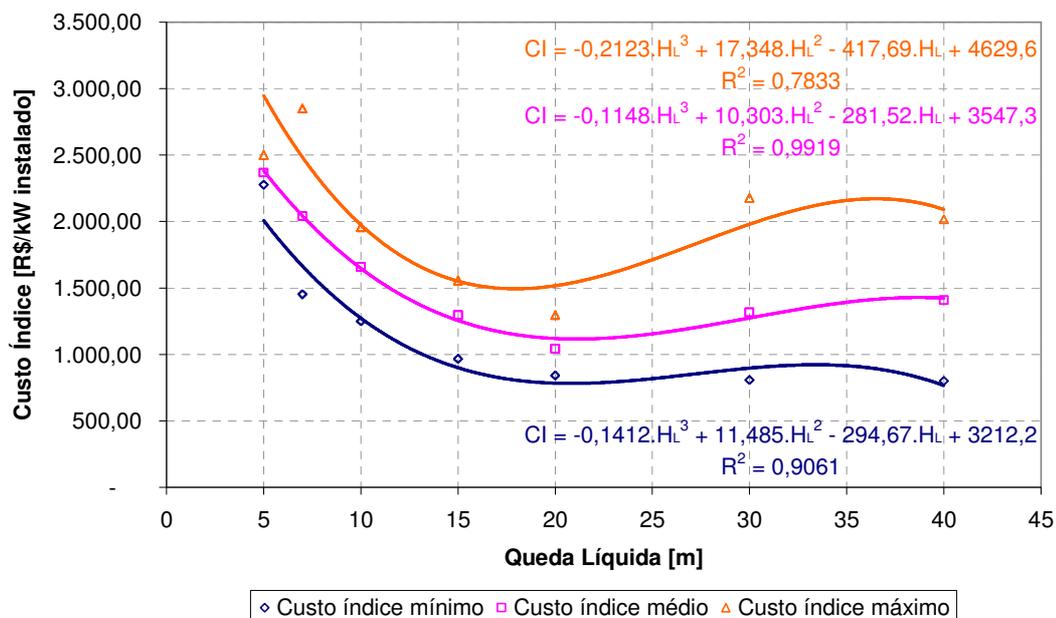


FIGURA 108 - Custo índice de grupos geradores convencionais em função da queda líquida (de 5 a 40 m)

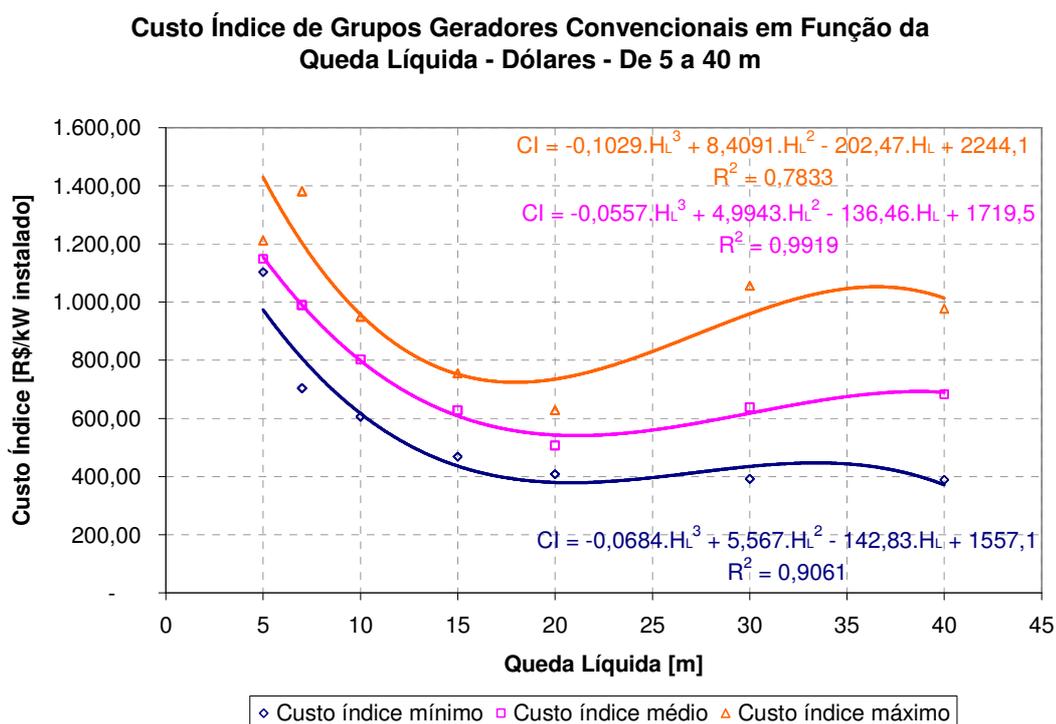


FIGURA 109 - Custo índice de grupos geradores convencionais em função da queda líquida - Dólares (de 5 a 40 m)

7.2.2 IMPACTO DA TECNOLOGIA BFT/MIG SOBRE O CUSTO DE GRUPOS GERADORES

Com base nas curvas de custo expressas na seção 7.2.1, é possível aferir os benefícios econômicos que grupos BFT/MIG proporcionam em relação a grupos geradores convencionais.

As figuras 110 e 111 comparam os custos índices médios de BFTs e turbinas Mitchell-Banki e Pelton:

Custo Índice Médio de BFTs e Turbinas Michell-Banki e Pelton

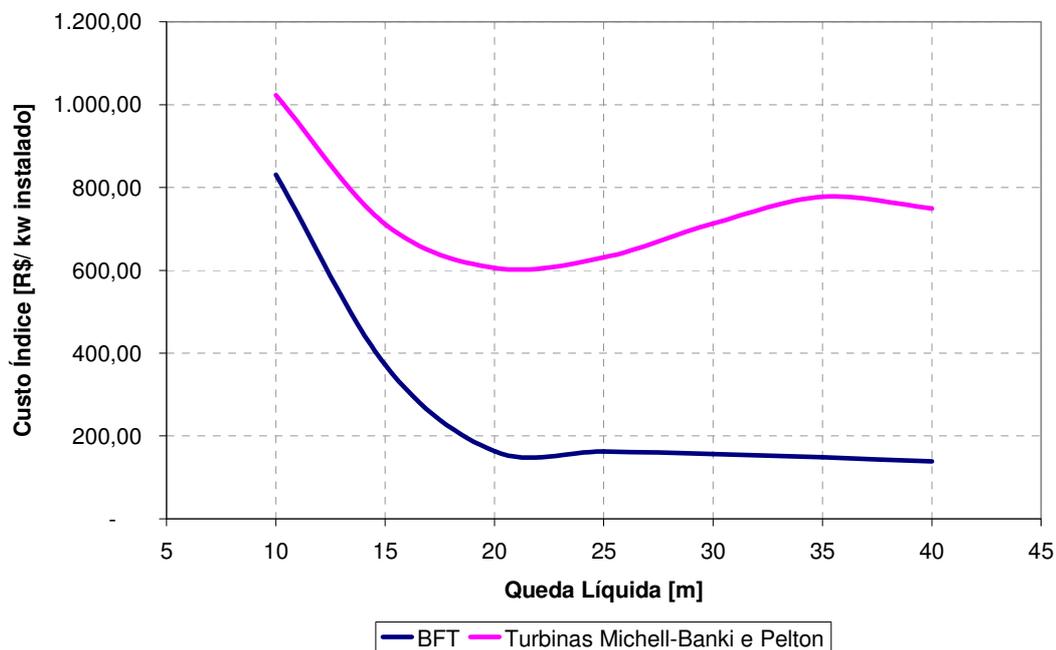


FIGURA 110 - Custo índice médio de BFTs e turbinas Michell-Banki e Pelton

Custo Índice Médio de BFTs em Relação ao de Turbinas Michell-Banki e Pelton

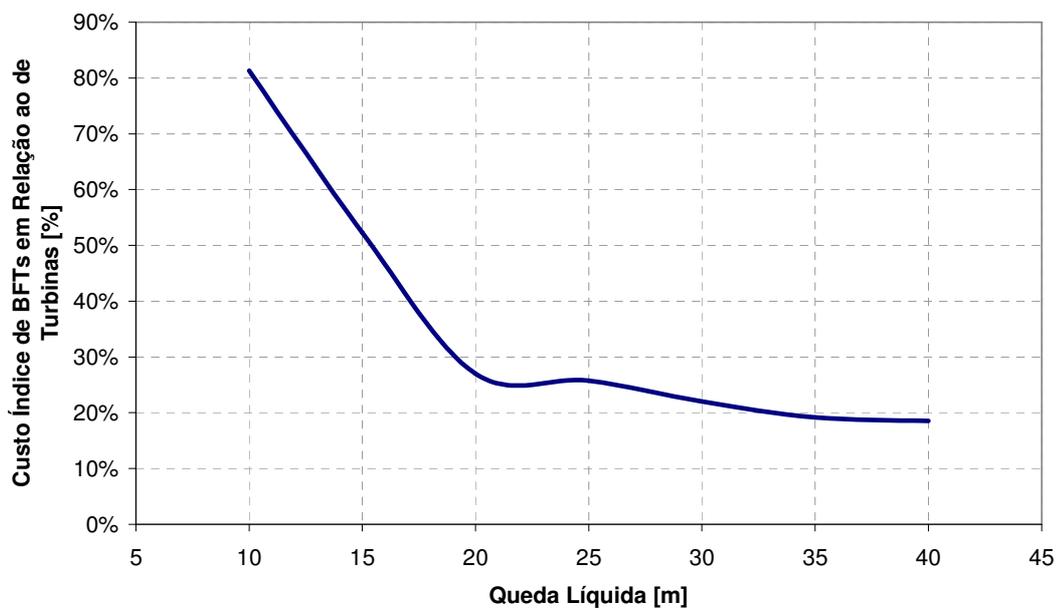


FIGURA 111 - Custo índice médio de BFTs em relação ao de turbinas Michell-Banki e Pelton

Os custos índice médios de BFTs apresentados nas figuras 110 e 111 não incluem o custo de volantes de inércia e tubos de sucção, sendo que estes representam um acréscimo médio de 20 %³⁵ no custo da BFT. Considerando-se esse acréscimo, tem-se:

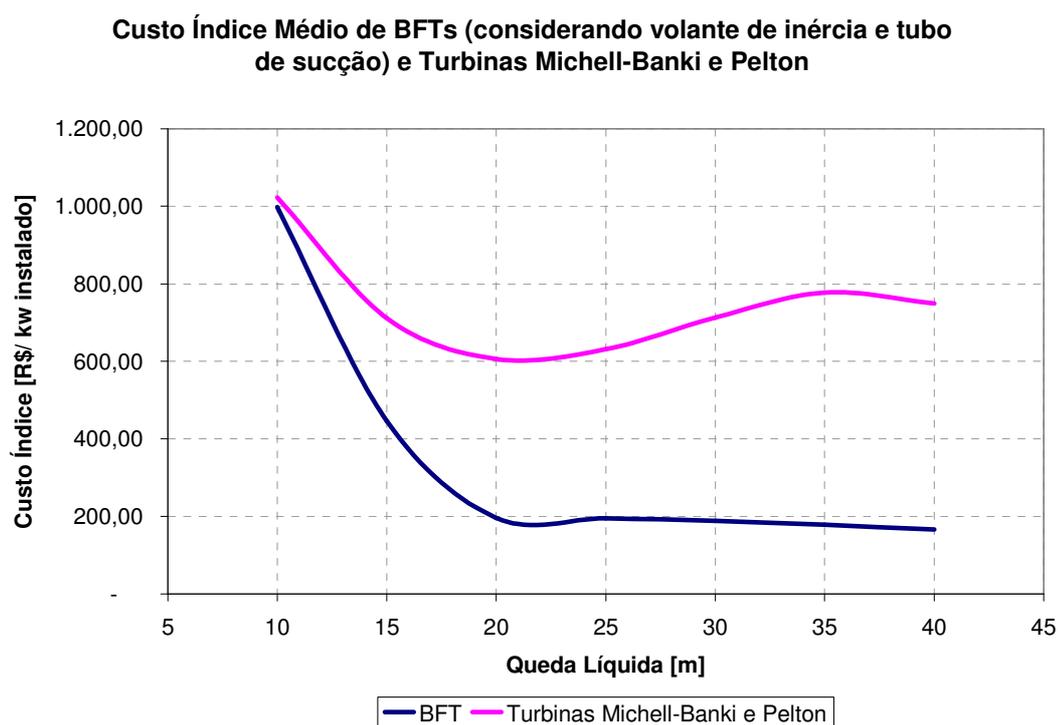


FIGURA 112 - Custo índice médio de BFTs (considerando volante de inércia e tubo de sucção) e turbinas Michell-Banki e Pelton

³⁵ Valor médio adotado para simplificação dos cálculos, devido à sua variabilidade em função da potência gerada, definido a partir de informações verbais.

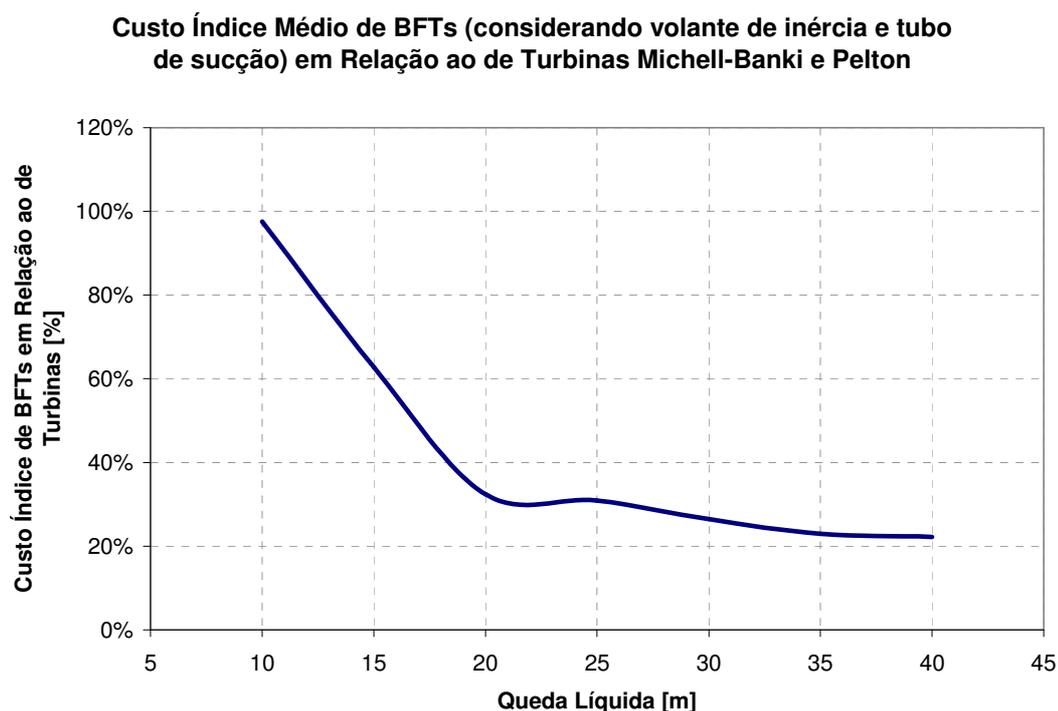


FIGURA 113 - Custo índice médio de BFTs (considerando volante de inércia e tubo de sucção) em relação ao de turbinas Michell-Banki e Pelton

Da figura 113, percebe-se que, para quedas inferiores a 10 metros, BFTs apresentam custos similares ao de grupos convencionais.

Quando analisados os custos para quedas líquidas de 20 a 40 m, tem-se um cenário totalmente diferente. Nessa faixa, as BFTs são de 3 a 5 vezes mais baratas que turbinas Michell-Banki e convencionais (Pelton).

O custo médio da BFT por quilowatt instalado (na faixa considerada) é da ordem de R\$ 200,00 (US\$ 96,94³⁶), enquanto o de turbinas Michell-Banki e Pelton varia de R\$ 600,00 (US\$ 290,83) a quase R\$ 800,00 (US\$ 387,78).

Em relação aos MIGs, o excelente ajuste linear que os custos deste equipamento apresentam em relação à potência elétrica gerada, permitem concluir que seu custo índice é da ordem de R\$ 133,00 / kW instalado (US\$ 64,47). Para a

³⁶ Cotação do dólar em 27/03/2007: R\$ 2,063.

comparação com os custos de geradores convencionais, deve-se acrescentar aos preços do MIG o valor dos reguladores de velocidade e painel elétrico (incluídos na cotação dos geradores), além do banco de capacitores necessário à partida deste. Considerando que estes acessórios incrementam cerca de 15 %³⁷ o valor de geradores, tem-se que o custo índice do MIG atingiria um valor da ordem de R\$ 153,00 (US\$ 74,20). Subtraindo-se o custo índice médio de turbinas (figura 107), do custo índice médio dos grupos geradores convencionais (figura 108), tem-se o custo índice médio dos geradores de R\$ 578,24 (US\$ 280,30). Percebe-se que os MIGs são, em média, 3,5 vezes mais baratos que geradores convencionais.

Finalmente, deve-se comparar o custo índice de grupos geradores BFT/MIG e convencionais. Para tanto, deve-se somar aos custos dos grupos BFT/MIG os já citados custos com tubo de sucção, volante de inércia, painel elétrico e regulador de velocidade. Considerando o custo da BFT 60% do custo total do grupo, acrescenta-se ao seu custo 20 % (volante de inércia e tubo de sucção), e 15 % ao custo do MIG. Ponderando-se esses valores, deve-se acrescentar aos custos médios dos grupos BFT/MIG (figura 104) 18 % do total. Com isso, tem-se a seguinte comparação:

³⁷ Valor médio adotado para simplificação dos cálculos, devido à sua variabilidade em função da potência gerada, definido a partir de informações verbais.

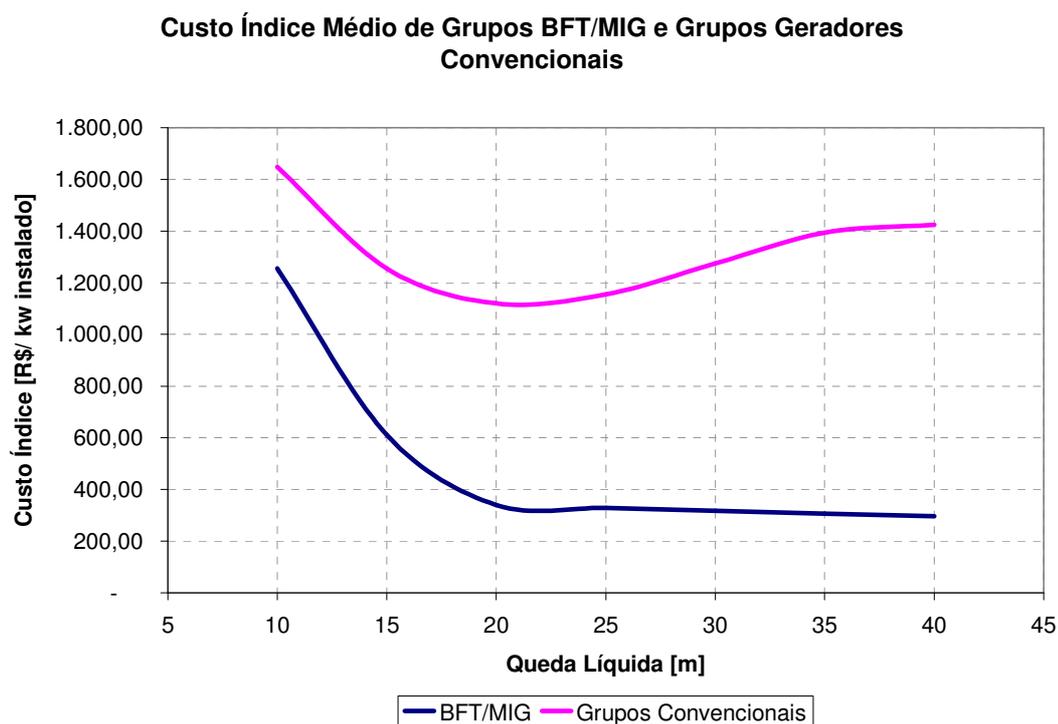


FIGURA 114 - Custo índice médio de grupos geradores BFT/MIG e grupos geradores convencionais

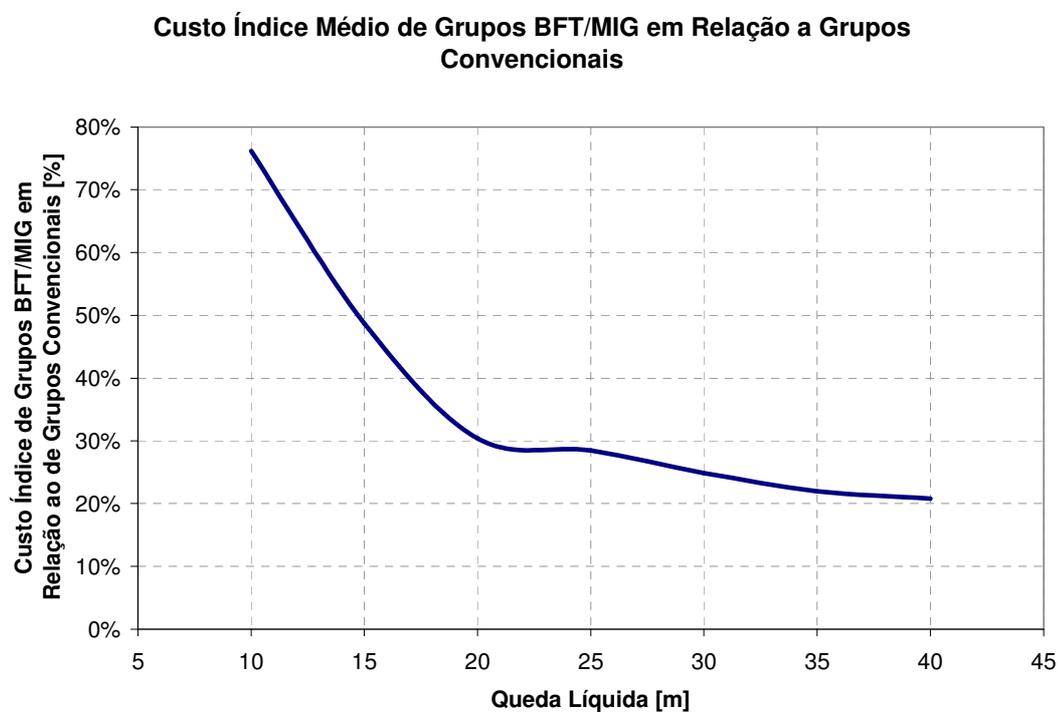


FIGURA 115 - Custo índice médio de grupos BFT/MIG em relação a grupos convencionais

Da figura 115, percebe-se que, para quedas inferiores a 10 metros, os grupos BFT/MIG apresentam custos índice médios cerca de 25 % inferiores aos de grupos convencionais.

Considerando quedas líquidas de 20 a 40 m, grupos BFT/MIG são de 3 a 5 vezes mais baratos que grupos geradores com turbina Michell-Banki e convencionais.

O custo por quilowatt instalado do grupo gerador BFT/MIG (para quedas entre 20 e 40 m) é da ordem de R\$ 320,00 (US\$ 155,00³⁸), enquanto o de grupos com Michell-Banki e convencionais varia de R\$ 1.100,00 (US\$ 533,20) a R\$ 1.400,00 (US\$ 678,62).

7.2.3 CUSTO ÍNDICE DE MCHS UTILIZANDO BFTS/MIGS

Da tabela 14 (apêndice G), obtém-se os custos índice, em dólar, de MCHs utilizando grupos geradores com turbina Michell-Banki e Pelton e BFTs/MIG, para quedas líquidas inferiores a 40 m, conforme figuras 116 e 117:

³⁸ Cotação do dólar em 27/03/2007: R\$ 2,063.

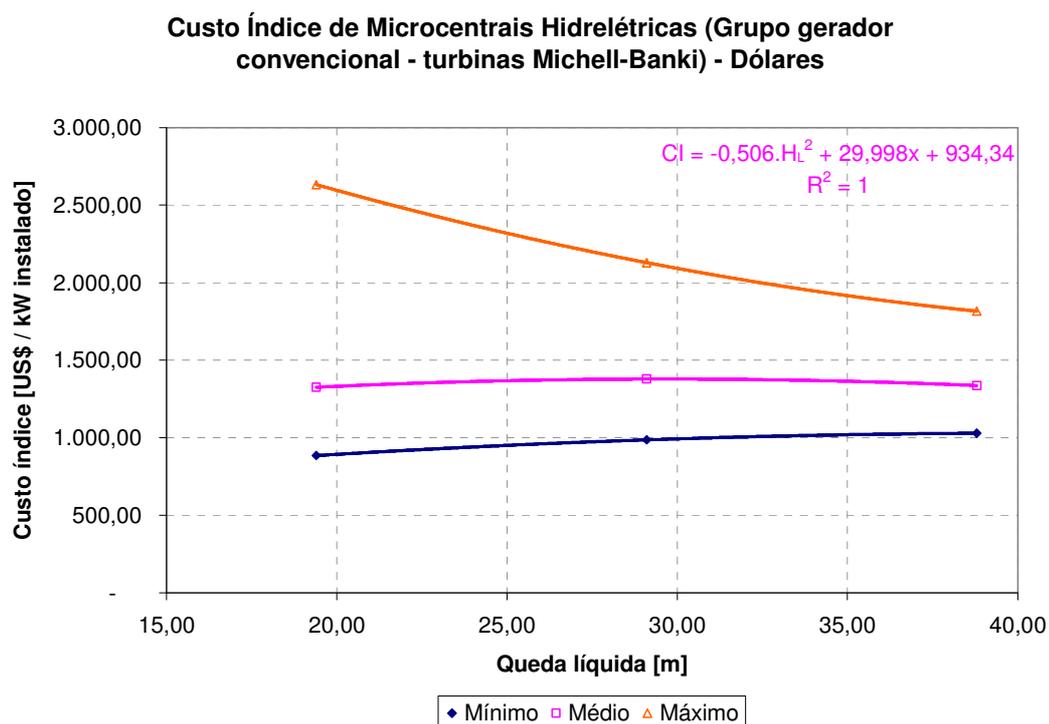


FIGURA 116 - Custo índice de microcentrais hidrelétricas com turbinas Michell-Banki e convencionais
– Dólares

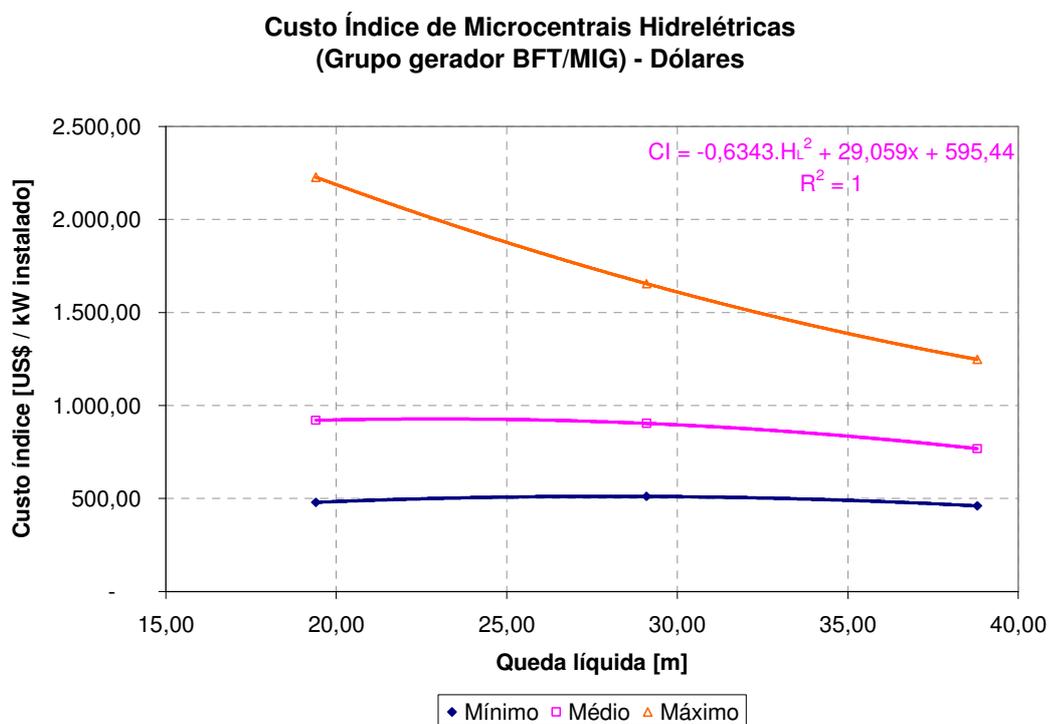


FIGURA 117 - Custo índice de microcentrais hidrelétricas (grupo gerador BFT/MIG) - Dólares

Uma análise dos gráficos demonstra que os custos índice médios de MCHs, na faixa de quedas consideradas, permanece praticamente constante. Para centrais utilizando grupos geradores com turbina Michell-Banki e convencionais, o custo índice médio é de US\$ 1.347,11 (R\$ 2.740,01³⁹), enquanto a utilização de grupos BFT/MIG reduziu o custo índice médio para US\$ 864,18 (R\$ 1.757,73).

7.2.4 IMPACTO DA TECNOLOGIA BFT/MIG SOBRE O CUSTO DE MCHS

A figura 118 compara os custos índices médios de MCHs utilizando grupos geradores convencionais e BFT/MIG, enquanto a figura 119 ilustra a proporção entre tais custos:

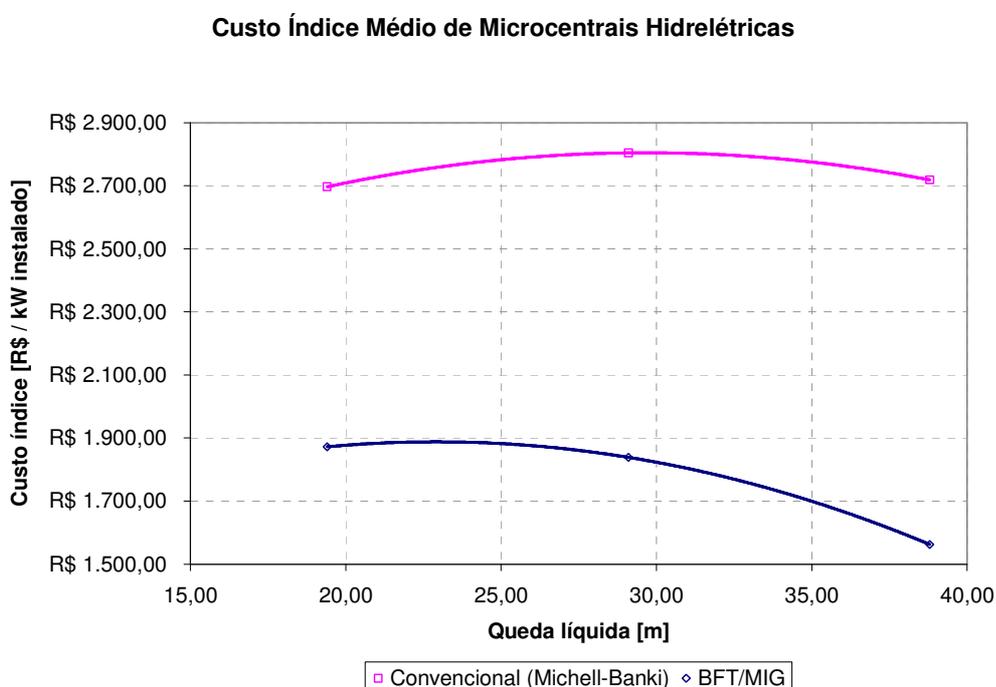


FIGURA 118 - Custo índice médio de microcentrais hidrelétricas

³⁹ Cotação do dólar em 24/04/2007: R\$ 2,034

Custo Índice Médio de Microcentrais Hidrelétricas utilizando grupos BFT/MIG em relação a grupos convencionais (turbina Michell-Banki)

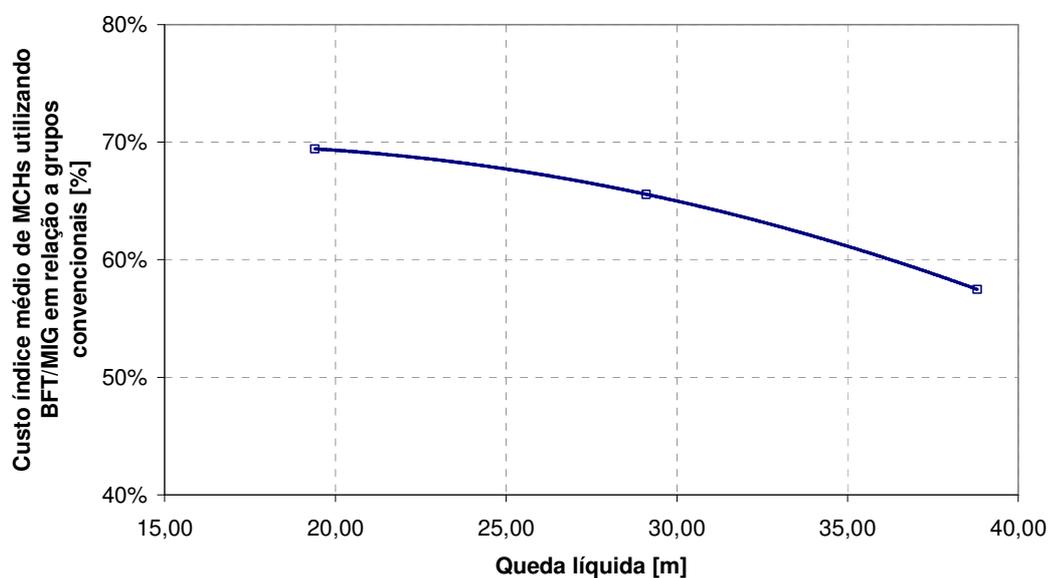


FIGURA 119 - Custo índice médio de microcentrais hidrelétricas utilizando grupos BFT/MIG em relação a grupos convencionais (turbina Michell-Banki)

Dos gráficos acima, pode-se notar que a utilização de grupos BFT/MIG em MCHs, nas condições simuladas (seção 6.2.2) representa uma economia média de 36% em relação às mesmas centrais utilizando grupos geradores convencionais.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo de BFTs e MIGs desenvolvido ao longo do trabalho teve dois objetivos básicos: avaliar o comportamento desses equipamentos em uma situação real complementando, principalmente, os estudos laboratoriais desenvolvidos por Viana (1987), e quantificar suas vantagens econômicas em relação a grupos geradores convencionais, voltados às microcentrais hidrelétricas.

Os resultados dos ensaios no grupo BFT/MIG permitiram concluir que sua utilização é, sim, viável. Salienta-se também que tal viabilidade só é obtida mediante a aplicação correta das metodologias de seleção. Quanto a estas, no caso específico da metodologia utilizada (Chapallaz), o comportamento real do grupo BFT/MIG foi um pouco inferior ao desempenho esperado. O rendimento máximo atingido pelo grupo BFT/MIG foi de 67,8 %, enquanto o rendimento esperado era de 72,8 %. Atribui-se essa variação de aproximadamente 5 % a alguns fatores:

- Incerteza inerente aos métodos de seleção, uma vez que alguns de seus parâmetros são interpolados. Além disso, os métodos foram desenvolvidos a partir de diferentes modelos de bombas e motores, que possuem diferenças construtivas;
- Limitações durante o ensaio, que impediram atingir o ponto nominal de funcionamento.

Deve-se, portanto, durante o processo de seleção de BFTs e MIGs, considerar tais variações, de forma que os equipamentos e componentes da microcentral as tolerem, e que a potência gerada atenda às demandas existentes.

Por se tratarem de máquinas diferentes, a comparação entre os ensaios do grupo BFT/MIG com o grupo utilizando turbina Michell-Banki se limitou aos rendimentos. O rendimento máximo atingido pelo grupo BFT/MIG foi aproximadamente 15 % superior ao do grupo com Michell-Banki. Este, porém, apresentou menor sensibilidade à variação da vazão turbinada, comportamento esperado para esse tipo de turbina de ação. Dessa forma, a BFT pode ser considerada ideal para o atendimento a cargas constantes, funcionando no seu ponto de projeto; para locais onde há grande variação de cargas, turbinas Michell-Banki e convencionais podem ser tecnicamente mais indicadas.

A regulação de vazão em BFTs se mostrou o principal ponto passível de aperfeiçoamentos, para que esses equipamentos possam atuar de forma mais adequada na geração de energia.

Quanto às vantagens econômicas de BFTs e MIGs em relação a turbinas e geradores com turbina Michell-Banki e convencionais, conclui-se que esta é significativa. O custo médio de BFTs por kW instalado é da ordem de R\$ 200,00, enquanto o de turbinas Michell-Banki e Pelton varia de R\$ 600,00 a R\$ 800,00. Já o custo de MIGs por kW instalado é de 153,00, sendo o custo de geradores convencionais de R\$ 578,24.

Percebeu-se uma grande influência da altura de queda sobre os benefícios econômicos de grupos BFT/MIG: quanto maior a queda, mais baratos são estes em relação aos grupos convencionais. Para quedas inferiores a 10 metros, o benefício é pequeno, podendo, em determinadas condições, inexistir. Para quedas acima de 10 metros, caso mais comum em MCHs, os benefícios podem variar de 20% a 80%, ou seja, um grupo BFT/MIG pode ser até 5 vezes mais barato que um grupo convencional. Quanto aos custos de MCHs, a aplicação de BFTs e MIGs pode

reduzir os custos de implantação em cerca de 36%. De acordo com as condições e metodologias utilizadas para a simulação dos custos, o custo do kW instalado em uma MCH utilizando grupos geradores convencionais é da ordem de US\$ 1.350,00. Ao se utilizar um grupo BFT/MIG, esse valor cai para aproximadamente US\$ 870,00.

8.1 SUGESTÕES E FUTUROS ESTUDOS

A principal recomendação do trabalho é dirigida aos fabricantes de bombas e motores de indução, sugerindo que estes realizem ensaios e forneçam curvas de seus equipamentos funcionando em reverso, como turbinas e geradores, respectivamente, como ocorreu no caso da Worthington abordado anteriormente. Essa medida dirimiria as incertezas dos métodos de seleção, permitindo que BFTs e MIGs fossem escolhidos de forma simples e confiável, o que representaria um grande incentivo à sua utilização para a geração de energia. Além disso, os fabricantes estariam expandindo seu mercado de atuação.

Outro ponto que deve ser considerado e estudado é o desenvolvimento de sistemas de controle de vazão para BFTs, permitindo que estas atendam a diferentes cargas sem a necessidade de dissipação de parte da energia para se manter a frequência constante.

Outros assuntos que podem ser futuramente foco de estudos sobre BFTs e MIGs são a análise da vida útil desses equipamentos quando operando em reverso, avaliação da alteração dos esforços mecânicos em seus componentes (eixo, voluta, mancais, etc), e adaptações que possam aumentar o rendimento de bombas e motores quando utilizados para a geração de energia. Uma ferramenta que pode ser utilizada com êxito no aperfeiçoamento e simulação de BFTs é a dinâmica de fluidos

computacional, conhecida pela sigla CDF.

De acordo com o exposto na seção 4, os choques do escoamento ocasionados pela inversão do fluxo em BFTs são uma das principais causas da queda do rendimento em comparação ao funcionamento como bomba. Os efeitos desses choques podem ser minimizados através do abaulamento das pás do rotor (CHAPALLAZ et al., 1992b), conforme figura abaixo:

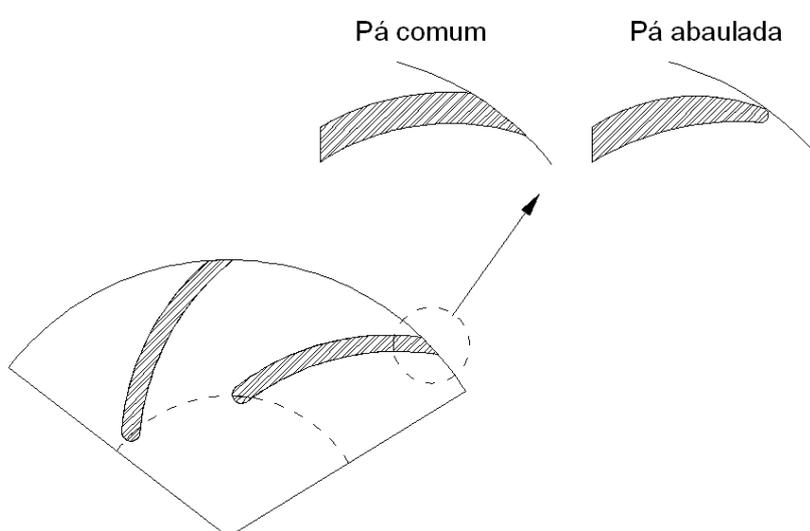


FIGURA 120 - Abaulamento das pás da BFT

A realização de ensaios de cavitação para a determinação de coeficientes específicos para BFTs também se mostra oportuna, uma vez que sua altura máxima de sucção é atualmente calculada através de equações elaboradas para turbinas Francis.

Os estudos sobre custos realizados no trabalho podem ser futuramente refinados, a partir de um maior detalhamento da pesquisa de preços, do aumento da quantidade de fabricantes de equipamentos consultados (conforme já mencionado, vários foram consultados, porém, poucos responderam às solicitações), da inclusão mais precisa de custos de acessórios (tubos de sucção, volantes de inércia, etc), e

da obtenção de custos reais de implantação de MCHs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução nº 652, de 9 de dezembro de 2003. Estabelece os critérios para o enquadramento de aproveitamento hidrelétrico na condição de Pequena Central Hidrelétrica (PCH).

Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, v. 140, p. 90, dez. 2003.

ARAÚJO, A. M. **Brasil, histórias, costumes e lendas**. São Paulo: Editora Três, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11374**: Turbinas hidráulicas: ensaio de campo. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

BALARIM, C. R. **Avaliação expedita do custo de implantação de micro centrais hidrelétricas**. 1996. 158 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1996.

BALARIM, C. R. **Estimativa de custo das estruturas e equipamentos de micro centrais hidrelétricas**. 1999. 232 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

BALARIM, C. R. et al. Custo de bombas centrífugas funcionando como turbinas em microcentrais hidrelétricas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 219-225, jan. 2004.

BERNARD Forest de Bélidor - Wikipedia, the free encyclopedia. São Petersburgo: Wikimedia Foundation Inc., 2006. Enciclopédia digital *online*. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bernard_Forest_de_B%C3%A9lidor>. Acesso em: 10 fev. 2007.

BONADÉ, A. **Microcentrales hydroélectriques, techniques de l'ingenieur:** Pompe centrifuge fonctionnant em turbine. [S.l.: s.n.], 1980.

BORTONI, E. C.; SANTOS, A. H. M. **Disseminação de Informações em Eficiência Energética:** Motores elétricos. Itajubá: PROCEL-ELETROBRÁS, [ca. 2000].

BORTONI, E. C. **Engenharia da Energia II:** notas de aula. Itajubá: UNIFEI, 2006.

BRASILVIAGEM.COM: Atrações turísticas - Juiz de Fora - Usina de Marmelos. Rio de Janeiro: Brazilian Travel Bureau S.A., 2006. Disponível em: <<http://www.brasilviagem.com/pontur/?CodAtr=66300>>. Acesso em: 11 fev. 2007.

BRITISH HYDROPOWER ASSOCIATION. **A guide to UK mini-hydro developments.** Dorset: British Hydropower Association, 2005. 31 p.

BUSE, F. Using centrifugal pumps as hydraulic turbines. **Chemical engineering,** [S.l.], jan. 1981.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Diretrizes para Estudos e Projetos Básicos de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCH.** Rio de Janeiro:

ELETROBRÁS, 1999.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Manual de microcentrais hidrelétricas**. Brasília: ELETROBRÁS, 1985. 354 p.

CHAPALLAZ, J.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. **Manual on induction motors used as generators**. Braunschweig: Vieweg, 1992. 213 p. ISBN 3-528-02068-7.

CHAPALLAZ, J.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G. **Manual on pumps used as turbines**. Braunschweig: Vieweg, 1992. 221 p. ISBN 3-528-02069-5.

CLAMP-ON Power Meter CW240 Power Supply Quality. Disponível em: <<http://www.yokogawa.com/gmi/Clamp-onPowermeters/gmi-cw240-001-en.htm>>. Acesso em: 12 dez. 2007.

COMMUNITY RESEARCH & DEVELOPMENT INFORMATION SERVICE. **Scientific and technological references**: Energy technology indicators. Luxemburgo: Escritório para publicações oficiais da União Européia, 2002.

CRAGSIDE: Information from Answers.com. Nova Iorque: Answers Corporation, 2007. Enciclopédia digital *online*. Disponível em: <<http://www.answers.com/topic/cragside>>. Acessado em: 10 fev. 2007.

DAVIS, S. **Microhydro**: Clean power from water. Gabriola Island: New Society Publishers, 2003. 157 p. ISBN 0-86571-484-3.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Portaria nº 109, de 24 de novembro de 1982. Estabelece que para fins de análise pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, de projeto relativo à Pequena Central Hidrelétrica - PCH, será suficiente que o mesmo seja apresentado de conformidade com as recomendações constantes no Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas. **Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 22165, nov. 1982.

ELETRIC Light Years 1878 - 1899 - Timeline of North East England History. Durham: [s. n.], 2006. Apresenta a história do nordeste da Inglaterra. Disponível em: <<http://www.northeastengland.talktalk.net/page82.htm>>. Acesso em: 11 fev. 2007.

ESTADÃO.COM.BR – Finanças pessoais. São Paulo: Grupo Estado, 2007. Página oficial do jornal O Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.estadao.com.br/ext/economia/financas/historico/dolar_1998.htm>. Acesso em: 4 mar. 2007.

EUROPEAN SMALL HYDRO ASSOCIATION. **Environmental integration of small hydropower plant**. Bruxelas: European Small Hydro Association, 2006. 20 p.

EUROPEAN SMALL HYDRO ASSOCIATION. **Guide on how to develop a small hydropower plant**. Bruxelas: Alteneer Programme - European Small Hydro Association, 2004. 295 p.

EUROPEAN SMALL HYDRO ASSOCIATION. **Guidelines for micro hydro power**

development: Spatial Plans and Local Arrangement for Small Hydro. Bruxelas: Alteneer Programme - European Comission, 2005. 48 p.

FIRST Commercial Hydroelectric Power Plant. Madison: Departamento de Justiça do estado de Winsconsin, 2007. Página do Departamento de Justiça de Winsconsin. Disponível em: <http://www.doj.state.wi.us/kidspage/fun_facts/hydro.htm>. Acessado em: 10 fev. 2007.

FITZGERALD, A. E; KINGSLEY Jr., C; KUSKO, A. **Máquinas elétricas:** conversão eletromecânica da energia processos, dispositivos e sistemas. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 623 p.

FRAENKEL, P. et al. **Micro-hydro power:** A guide for development workers. Londres: ITDG Publishing, 2003. 127 p. ISBN 1-85339-029-1.

FRIEDEL, R. D. **Lines and waves.** Nova Iorque: Center for the History of Electrical Engineering - Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1981. 34 p.

GALLICA - Belidor, Bernard Forest de (1697-1761). Architecture hydraulique, ou L'art de conduire. Paris: Gallica, 2007. Disponível em: <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k85682n>>. Acesso em: 10 fev. 2007.

HARVEY, A. et al. **Micro-hydro design manual:** A guide to small-scale water power schemes. Rugby: ITDG Publishing, 2005. 374 p. ISBN 1-85339-103-4.

HISTÓRIA: Datas significativas sobre a eletricidade no Brasil. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2003. Página oficial da hidrelétrica de Itaipu. Disponível em: <http://www.itaipu.gov.br/impre/30anos/ji_23.htm>. Acesso em: 11 fev. 2007.

HOMIS Controle e Instrumentação. Disponível em: <http://www.homis.com.br/m3.asp?cod_pagina=1731>. Acesso em: 12 dez. 2007.

INDUÇÃO eletromagnética - Wikipedia, the free encyclopedia. São Petersburgo: Wikimedia Foundation Inc., 2007. Enciclopédia digital *online*. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Indu%C3%A7%C3%A3o_eletromagn%C3%A9tica>. Acesso em: 26 fev. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2000**. Brasília: IBGE, 2000.

KHENNAS, S.; BARNETT, A. **Best practices for sustainable development of micro hydro power in developing countries**. Londres: UK Department for International Development, 2000. 119 p.

KITTREDGE, C. P. Centrifugal pumps used as hydraulic turbines. **Journal of Engeneering for Power**, [S. l.], jan. 1961.

KSB (Várzea Paulista, SP). **Folheto descritivo nº A1150.1P/1.**: KSB ETA. Várzea Paulista, ca. 2005. 5 p.

KSB (Várzea Paulista, SP). **Manual técnico e curvas características n° A2742.0.1P/2**: KSB Meganorm. Várzea Paulista, ca. 2006. 37 p.

LAPPONI, J. C. **Estatística usando Excel**. São Paulo: Lapponi Treinamento e Editora, 2000. 450 p. ISBN 85-85624-12-4.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro: Editora Guanabra Dois, 1983. 649 p. ISBN 85-7030-016-6.

MARQUES, C. S. M.; HADDAD, J. MARTINS, A. R. S. **Conservação de energia: Eficiência energética em equipamentos e instalações**. Itajubá: ELETROBRÁS/PROCEL, 2006. 596 p. ISBN 85-60369-00-7.

MARTINEZ, C. B. et al. **Um estudo sobre o uso de BFT's em potenciais residuais**. Belo Horizonte: UFMG, [ca. 2000]. 4 p.

MATRIZ de Energia Elétrica. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de informações de geração**. 2007. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15&idPerfil=2>>. Acesso em: 30 mai. 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Manual de operacionalização do Programa Luz Para Todos**: Revisão nº 5. Brasília: MME, 2007. 29 p.

NATIONAL Trust - Cragaside House, Gardens & State - Cragaside Refurbishment.

Warrington: The National Trust, 2007. Apresenta informações da ONG National Trust. Disponível em: < <http://www.nationaltrust.org.uk/main/w-vh/w-visits/w-findaplace/w-cragsidehousegardenandestate/w-cragsidehousegardenandestate-refurbishment.htm>>. Acessado em: 10 fev. 2007.

NATURAL RESOURCES CANADA. **Mycro-hidropower systems**: A buyer's guide. Ottawa: Renewable and Electrical Energy Division, 2004. 56 p. ISBN 0-662-35880-5.

NI SCXI-1102. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/1654>>. Acesso em: 12 dez. 2007.

NI SCXI-1125. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/3669>>. Acesso em: 12 dez. 2007.

REZENDE, J. T. et al. O gerador de indução como alternativa de geração de energia elétrica: Parte 1 – Formulação teórica. **PCH Notícias e SHP News**, Itajubá, ano 3, n. 11, out. 2001. ISSN 1676-0220.

RICARDO, M. **Estudos para o projeto de reabilitação da PCH REPI**. 2005. 202 p. Monografia (Graduação em Engenharia Hídrica) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

SCXI-1338. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/1890>>. Acesso em: 12 dez. 2007.

SHAFER, L.; AGOSTINELLI, A. Using pumps as small turbines. **Water power & dam construction**. [S.l.], 1981.

SUARDA, M.; SUARNADWIPA, N.; ADNYANA, W. B. Experimental work on modification of impeller tips of a centrifugal pump as a turbine. In: JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON "SUSTAINABLE ENERGY AND ENVIRONMENT", 2., 2006, Bangkok. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2006. 5 p.

SOUZA, Z.; BORTONI, E. C. **Instrumentação para sistemas energéticos e industriais**. Itajubá: Editora do Autor, 2006. 387 p. ISBN 85-99917-02-1.

SOUZA, Z. **Centrais hidrelétricas**: Dimensionamento de componentes. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1992. 196 p.

SOUZA, Z. Ensaio de recepção de PCH. In: REUNIÃO DO GRUPO DE TRABALHO DE HIDROMECÂNICA, 5., 1999, Montevideu. **Anais...** Montevideu: Associação Internacional de Engenharia e Pesquisa Hidráulica, 1999.

SOUZA, Z. **PCH**: Tecnologia - Meio Ambiente. In: CONFERÊNCIA DE PCH: MERCADO E MEIO AMBIENTE, 1., 2005, Itajubá. **Apresentação...** Itajubá: CERPCH, 2005.

SOUZA, Z.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. C. **Centrais hidrelétricas**: Estudos para implantação. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1999. 425 p. ISBN 85-87083-02-3.

STEPANOFF, A. T. **Centrifugal and axial flow pumps**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1957. ISBN 471-82137-3.

THERMO Polysonics DCT7088 – Advanced Test Equipment Rentals. Disponível em: <<http://www.atecorp.com/equipment/Thermo-Polysonics/DCT7088.htm>>. Acesso em: 12 dez. 2007.

TIAGO FILHO, G. L. **Análise da Expansão das PCHs**: Tendência e Potencial. In: CONFERÊNCIA DE PCH: MERCADO E MEIO AMBIENTE, 2., 2006, São Paulo. **Apresentação...** São Paulo: CERPCH, 2006.

TIAGO FILHO, G. L. **Critérios para escolha do grupo gerador de centrais hidrelétricas**. Itajubá: FUPAI, ca. 1990. 39 p.

TOASTER designs. [S.l.; s.n.], 2006. Apresenta trabalhos de arte gráfica. Disponível em: <http://www.toasterdesigns.net/portfolio/photo/waterwheel.jpg>>. Acesso em: 10 fev. 2007.

UNESP – Cursos de extensão à distância. Bauru: Faculdade de Engenharia de Bauru, 2007. Página oficial da UNESP – Bauru. Disponível em: <<http://www.dee.feb.unesp.br/~ead/cursos/pag2.htm>>. Acesso em: 26 fev. 2007.

USB Data Acquisition Module - NI SCXI-1600. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14073>>. Acesso em: 12 dez. 2007.

VIANA, A. N. C.; NOGUEIRA, F. J.H. **Bombas de fluxo operando como turbinas:** Procedimentos de seleção. Itajubá: EFEI, [ca. 1990]. 6 p.

VIANA, A. N. C. Bombas de fluxo operando como turbina: Por que usá-las?. **PCH Notícias e SHP News**, Itajubá, ano 4, n. 12, jan. 2002. ISSN 1676-0220.

VIANA, A. N. C. **Comportamento de bombas centrífugas funcionando como turbinas hidráulicas.** 1987. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1987.

VIANA, A. N. C. et al. **Conservação de energia:** Eficiência energética de instalações e equipamentos. Itajubá, FUPAI, 2001. 467 p. ISBN 85-902115-1-7.

WEG. Jaraguá do Sul: WEG, 2007. Disponível em: <
<http://www.weg.com.br/asp/system/empty.asp?P=2&VID=default&SID=641595743077618&S=1&A=closeall&C=30565>>. Acesso em: 10 fev. 2007.

WILLIAM George Armstrong, 1st Baron Armstrong - Wikipedia, the free encyclopedia. São Petersburgo: Wikimedia Foundation Inc., 2007. Enciclopédia digital *online*. Disponível em: <
http://en.wikipedia.org/wiki/William_George_Armstrong%2C_1st_Baron_Armstrong>. Acesso em: 10 fev. 2007.

WILLIAMS, A. **Pumps as turbines:** A user's guide. 2 ed. Londres: ITDG Publishing, 2003. 76 p. ISBN 1-85339-567-6.

WIND and Hydropower Technologies Program: History of hydropower. Washington: Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2005. Página oficial do Departamento de Energia dos Estados Unidos. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/hydro_history.html>. Acesso em: 10 fev. 2007.

WORTHINGTON GROUP. **Pumps for use as hydraulic turbines**: Market introduction. Tarreytown: McGraw-Edison Company, 1982.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALLAN, M. R. **Modelling of pumped storage and hydropower potential within water supply networks**. Loughborough: Loughborough University, 2001. 10 p.

ARPE, J.; PRÉNAT, M. D.; BINER, H. **Projet caractéristiques des pompes fonctionnant en turbines**. Geneva: Ecole d'ingénieurs de Genève, 2006. 45 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação: Referências - Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024**: Informação e documentação: Numeração progressiva das seções de um documento escrito – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6027**: Informação e documentação: Sumário – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**: Informação e documentação: Resumo – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6412**: Turbinas hidráulicas: recepção de modelos. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: Informação e

documentação: Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Informação e documentação: Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

BAUMGARTEN, S.; GUDER, WOLFGANG. Pumps as turbines. **Techno Digest**, Aktiengesellschaft, n. 11, p. 9, jul. 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Normas de apresentação tabular**. 3 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Editora Guanabra Dois, 1980. 667 p.

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Renewable energy systems**: Design and analysis with induction generators. Boca Raton: CRC Press, 2004. 358 p. ISBN 0-8493-2031-3.

SMITH, N. **Motors as generators for micro-hydro power**. Warwickshire: ITDG Publishing, 2005. 83 p. ISBN 1-85339-286-3.

TAMM, A.; BRATEN, A.; STOFFEL, B.; LUDWIG, G. **Analysis of a standard pump in reverse operation using CFD**. Darmstadt: TU Darmstadt, [ca. 2000]. 10 p.

TENNESSEE VALLEY AUTHORITY. **Hiwassee Dam Unit 2 Reversible Pump-turbine (1956)**: A National Historic Mechanical Engineering Landmark. Murphy: ASME, 1981. 16 p.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP**. São Paulo: SIBi-USP, 2004. 110 p. ISBN 85-7314-023-2.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Ensaios em BFTs Worthington

TABELA 9 - Ensaios em BFTs Worthington

Modelo	Bomba				BFT					Coeficientes	
	n [rpm]	Rendimento [%]	Vazão [m³/s]	Altura [m]	n [rpm]	Rendimento [%]	Vazão [m³/s]	Queda [m]	n _{qa} BFT [1]	k _a	k _q
12MNT14A	1150	81%	0,315	15,24	1210	78%	0,42	21,95	233,85	0,69	0,74
12MNT19C	1150	81%	0,303	23,16	1210	75%	0,41	33,53	167,89	0,69	0,73
12MNT24C	1150	85%	0,546	59,13	1210	82%	0,79	79,25	121,97	0,75	0,69
12MNT24D	1150	86%	0,549	53,64	1210	80%	0,79	78,03	123,39	0,69	0,69
14MNT16A	1150	87%	0,442	21,03	1210	78%	0,68	26,21	258,90	0,80	0,65
14MNT24A	875	86%	0,517	31,70	910	80%	0,74	39,62	148,65	0,80	0,70
14MNT24B	875	84%	0,543	29,26	910	76%	0,74	39,62	149,37	0,74	0,73
16MNT19A	875	84%	0,410	17,68	910	82%	0,70	23,77	212,96	0,74	0,58
16MNT19D	875	85%	0,467	18,90	910	83%	0,79	23,16	230,74	0,82	0,59
16MNT25A	875	88%	0,694	35,36	910	78%	0,93	43,89	155,11	0,81	0,74
16MNT25B	875	88%	0,719	33,53	910	82%	1,02	42,67	165,46	0,79	0,71
16MNT33A	875	87%	1,047	62,18	910	80%	1,49	88,39	115,73	0,70	0,70
20MNT24A	705	86%	0,801	20,73	727	80%	1,16	26,82	199,84	0,77	0,69
20MNT24B	705	87%	0,820	19,45	727	79%	1,10	26,21	198,29	0,74	0,74
20MNT30B	705	85%	0,852	23,62	727	80%	1,27	39,62	156,24	0,60	0,67
20MNT39B	705	88%	1,561	58,52	727	82%	2,21	76,20	125,96	0,77	0,71
20MNT39C	705	86%	1,224	51,82	727	80%	1,70	70,10	117,60	0,74	0,72
24MNT28B	705	87%	1,438	24,99	606	82%	1,78	21,64	242,55	1,15	0,81
24MNT33A	705	88%	1,546	32,92	606	82%	1,91	31,09	191,33	1,06	0,81
24MNT47A	585	88%	2,524	57,91	606	82%	3,40	82,30	122,93	0,70	0,74
24MNT47B	585	87%	2,069	56,69	606	82%	3,11	92,66	107,68	0,61	0,66
30MNT33B	585	90%	1,867	17,98	606	80%	2,83	24,69	276,83	0,73	0,66
30MNT43A	505	90%	2,965	33,53	520	82%	4,25	45,72	183,27	0,73	0,70
30MNT43B	505	90%	2,574	27,43	520	84%	3,68	37,49	197,99	0,73	0,70
36MNT40B	440	90%	2,372	17,07	520	82%	3,68	22,25	292,81	0,77	0,64

Modelo	Bomba				BFT					Coeficientes	
	n [rpm]	Rendimento [%]	Vazão [m³/s]	Altura [m]	n [rpm]	Rendimento [%]	Vazão [m³/s]	Queda [m]	n _{qa} BFT [1]	k _a	k _q
6LNT18D	1775	84%	0,146	88,39	1815	76%	0,21	112,78	72,67	0,78	0,69
6LNT18A	1775	83%	0,151	88,39	1815	76%	0,21	134,11	63,82	0,66	0,71
8LNT21E	1775	81%	0,297	143,26	1815	74%	0,42	214,88	63,37	0,67	0,70
8LNT18A	1775	87%	0,246	91,44	1815	82%	0,34	115,82	90,10	0,79	0,72
8LNT21D	1775	84%	0,256	140,21	1815	76%	0,38	208,79	60,86	0,67	0,68
10LNT18A	1775	88%	0,410	89,15	1815	82%	0,62	112,78	123,76	0,79	0,67
10LNT22A	1775	87%	0,467	138,68	1815	80%	0,65	188,98	86,41	0,73	0,72
12LNT17A	1175	89%	0,416	34,14	1210	78%	0,57	45,72	155,72	0,75	0,74
12LNT14A	1775	87%	0,379	45,72	1815	82%	0,54	66,29	172,29	0,69	0,70
12LNT17B	1775	89%	0,555	74,68	1815	83%	0,81	108,97	146,00	0,69	0,68
12LN21A	1180	89%	0,511	54,86	1210	82%	0,70	76,81	117,51	0,71	0,73
12LN21B	1180	90%	0,429	57,91	1210	82%	0,62	76,81	110,68	0,75	0,69
14LNT17A	1180	91%	0,505	36,58	1210	84%	0,77	45,11	183,43	0,81	0,66
14LNT20B	1180	88%	0,530	46,33	1210	86%	0,87	70,10	140,24	0,66	0,61
16LNT23C	1180	90%	0,959	65,84	1210	84%	1,53	105,16	137,00	0,63	0,63
16LNT28A	1180	88%	1,161	96,32	1210	83%	1,63	143,26	112,11	0,67	0,71
16LNT35E	1180	89%	1,098	135,64	1210	83%	1,56	185,93	90,17	0,73	0,70
20LNT28B	885	88%	1,388	52,43	910	82%	1,98	74,68	151,64	0,70	0,70
20LNT28C	885	88%	1,262	56,39	910	84%	2,12	80,01	149,05	0,70	0,59
30LNT41B	590	91%	3,281	57,15	605	84%	4,13	73,15	147,87	0,78	0,79
30LNT41C	590	90%	2,587	51,82	605	85%	3,85	73,15	142,72	0,71	0,67

Fonte: adaptado de WORTHINGTON, 1982

APÊNDICE B – Seleção de BFTs para simulação de custos

Método de Viana

TABELA 10 - Seleção de BFTs para simulação – Método de Viana

H_L [m]	Q_t [m ³ /s]	n_{qa} [1]	n [rps]	n [rpm]	k_a [1]	k_q [1]	H_b [m]	Q_b [m ³ /s]	n_{nb} [rpm]	H_{bc} [m]	Q_{bc} [m ³ /s]
10	0,025	152,17	30	1800	0,588	0,711	5,88	0,018	1750	5,56	0,02
15	0,025	112,27	30	1800	0,522	0,800	7,84	0,020	1750	7,41	0,02
15	0,05	158,78	30	1800	0,608	0,688	9,11	0,034	1750	8,61	0,03
20	0,025	180,97	60	3600	0,690	0,606	13,79	0,015	3500	13,04	0,01
20	0,05	127,96	30	1800	0,537	0,776	10,73	0,039	1750	10,14	0,04
20	0,1	180,97	30	1800	0,690	0,606	13,79	0,061	1750	13,04	0,06
25	0,025	153,08	60	3600	0,591	0,708	14,77	0,018	3500	13,96	0,02
25	0,05	108,24	30	1800	0,523	0,804	13,07	0,040	1750	12,35	0,04
25	0,1	153,08	30	1800	0,591	0,708	14,77	0,071	1750	13,96	0,07
25	0,15	187,48	30	1800	0,718	0,582	17,96	0,087	1750	16,98	0,08
30	0,025	133,51	60	3600	0,546	0,764	16,38	0,019	3500	15,48	0,02
30	0,05	188,82	60	3600	0,724	0,577	21,73	0,029	3500	20,54	0,03
30	0,1	133,51	30	1800	0,546	0,764	16,38	0,076	1750	15,48	0,07
30	0,15	163,52	30	1800	0,623	0,671	18,68	0,101	1750	17,66	0,10
30	0,2	188,82	30	1800	0,724	0,577	21,73	0,115	1750	20,54	0,11
40	0,025	107,60	60	3600	0,523	0,805	20,92	0,020	3500	19,78	0,02
40	0,05	152,17	60	3600	0,588	0,711	23,54	0,036	3500	22,25	0,03
40	0,1	107,60	30	1800	0,523	0,805	20,92	0,080	1750	19,78	0,08
40	0,15	131,79	30	1800	0,543	0,768	21,71	0,115	1750	20,52	0,11
40	0,2	152,17	30	1800	0,588	0,711	23,54	0,142	1750	22,25	0,14
40	0,25	170,14	30	1800	0,646	0,647	25,84	0,162	1750	24,43	0,16
40	0,3	186,37	30	1800	0,714	0,586	28,54	0,176	1750	26,98	0,17
50	0,025	91,02	60	3600	0,552	0,815	27,60	0,020	3500	26,09	0,02
50	0,05	128,72	60	3600	0,538	0,775	26,89	0,039	3500	25,41	0,04

H_L [m]	Q_t [m ³ /s]	n_{qa} [1]	n [rps]	n [rpm]	k_a [1]	k_q [1]	H_b [m]	Q_b [m ³ /s]	n_{nb} [rpm]	H_{bc} [m]	Q_{bc} [m ³ /s]
50	0,1	182,04	60	3600	0,694	0,602	34,72	0,060	3500	32,82	0,06
50	0,15	111,48	30	1800	0,522	0,801	26,12	0,120	1750	24,69	0,12
50	0,2	128,72	30	1800	0,538	0,775	26,89	0,155	1750	25,41	0,15
50	0,25	143,92	30	1800	0,568	0,737	28,38	0,184	1750	26,83	0,18
50	0,3	157,65	30	1800	0,604	0,692	30,21	0,208	1750	28,55	0,20
60	0,025	79,39	60	3600	0,603	0,820	36,18	0,021	3500	34,20	0,02
60	0,05	112,27	60	3600	0,522	0,800	31,35	0,040	3500	29,63	0,04
60	0,1	158,78	60	3600	0,608	0,688	36,45	0,069	3500	34,46	0,07
60	0,15	194,46	60	3600	0,749	0,556	44,96	0,083	3500	42,50	0,08
60	0,2	112,27	30	1800	0,522	0,800	31,35	0,160	1750	29,63	0,16
60	0,25	125,52	30	1800	0,533	0,781	31,98	0,195	1750	30,23	0,19
70	0,025	70,72	60	3600	0,658	0,823	46,06	0,021	3500	43,53	0,02
70	0,05	100,01	60	3600	0,531	0,811	37,14	0,041	3500	35,11	0,04
70	0,1	141,44	60	3600	0,562	0,744	39,34	0,074	3500	37,18	0,07
70	0,15	173,23	60	3600	0,658	0,635	46,05	0,095	3500	43,53	0,09
70	0,2	100,01	30	1800	0,531	0,811	37,14	0,162	1750	35,11	0,16
70	0,25	111,82	30	1800	0,522	0,801	36,57	0,200	1750	34,56	0,19
80	0,025	63,98	60	3600	0,709	0,826	56,69	0,021	3500	53,59	0,02
80	0,05	90,48	60	3600	0,554	0,816	44,30	0,041	3500	41,88	0,04
80	0,1	127,96	60	3600	0,537	0,776	42,92	0,078	3500	40,57	0,08
80	0,15	156,72	60	3600	0,601	0,696	48,11	0,104	3500	45,47	0,10
80	0,2	180,97	60	3600	0,690	0,606	55,18	0,121	3500	52,16	0,12
90	0,025	58,57	60	3600	0,752	0,827	67,67	0,021	3500	63,96	0,02
90	0,05	82,83	60	3600	0,585	0,819	52,65	0,041	3500	49,77	0,04
90	0,1	117,14	60	3600	0,524	0,794	47,20	0,079	3500	44,61	0,08
90	0,15	143,47	60	3600	0,567	0,738	50,99	0,111	3500	48,20	0,11
90	0,2	165,67	60	3600	0,630	0,663	56,70	0,133	3500	53,59	0,13
100	0,025	54,12	60	3600	0,787	0,828	78,72	0,021	3500	74,41	0,02
100	0,05	76,54	60	3600	0,620	0,821	61,96	0,041	3500	58,56	0,04
100	0,1	108,24	60	3600	0,523	0,804	52,28	0,080	3500	49,42	0,08

H_L [m]	Q_t [m ³ /s]	n_{qa} [1]	n [rps]	n [rpm]	k_a [1]	k_q [1]	H_b [m]	Q_b [m ³ /s]	n_{nb} [rpm]	H_{bc} [m]	Q_{bc} [m ³ /s]
100	0,15	132,57	60	3600	0,544	0,766	54,42	0,115	3500	51,43	0,11

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE C – Seleção de BFTs para simulação de custos

Método de Chapallaz

TABELA 11 - Seleção de BFTs para simulação – Método de Chapallaz

H_L [m]	Q_t [m ³ /s]	n_{qa}	n [rps]	n [rpm]	n_{qt}	n_{qbt}	Q_{nb} [m ³ /s]	$\eta_{teórico}$ [%]	c_a	c_q	H_b [m]	Q_b [m ³ /s]	n_{nb} [rpm]	H_{bc} [m]	Q_{bc} [m ³ /s]
5	0,025	255,92	30	1800	85,12	95,64	0,02	71,0%	1,95	1,85	2,56	0,014	1750	2,42	0,01
10	0,05	215,21	30	1800	71,57	80,42	0,04	76,5%	1,56	1,78	6,41	0,028	1750	6,06	0,03
15	0,1	224,54	30	1800	74,68	83,91	0,08	80,6%	1,5	1,38	10,00	0,072	1750	9,45	0,07
15	0,15	275,01	30	1800	91,46	102,77	0,12	80,8%	1,56	1,42	9,62	0,106	1750	9,09	0,10
20	0,15	221,64	30	1800	73,71	82,82	0,12	81,1%	1,48	1,38	13,51	0,109	1750	12,77	0,11
20	0,2	255,92	30	1800	85,12	95,64	0,15	81,0%	1,52	1,4	13,16	0,143	1750	12,44	0,14
25	0,2	216,49	30	1800	72,00	80,90	0,15	83,0%	1,48	1,33	16,89	0,150	1750	15,97	0,15
25	0,25	242,04	30	1800	80,50	90,45	0,19	83,1%	1,5	1,35	16,67	0,185	1750	15,75	0,18
25	0,3	265,14	30	1800	88,18	99,08	0,23	83,0%	1,52	1,37	16,45	0,219	1750	15,55	0,21
30	0,25	211,11	30	1800	70,21	78,89	0,19	84,8%	1,4	1,28	21,43	0,195	1750	20,25	0,19
30	0,3	231,25	30	1800	76,91	86,42	0,23	84,5%	1,42	1,3	21,13	0,231	1750	19,97	0,22
30	0,35	249,78	30	1800	83,07	93,34	0,27	84,6%	1,44	1,32	20,83	0,265	1750	19,69	0,26
30	0,4	267,03	30	1800	88,81	99,79	0,31	84,7%	1,47	1,3	20,41	0,308	1750	19,29	0,30
40	0,35	201,31	30	1800	66,95	75,23	0,27	85,7%	1,35	1,25	29,63	0,280	1750	28,01	0,27
40	0,4	215,21	30	1800	71,57	80,42	0,31	85,5%	1,38	1,255	28,99	0,319	1750	27,40	0,31

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE D – Cotação de BFTs e MIGs

TABELA 12 - Cotação de BFTs e MIGs

H _L [m]	Q _t [m³/s]	n _{nb} [rpm]	H _{bc} [m]	Q _{bc} [m³/h]	η _t [%]	P _{et} [kW]	k _p	P _{ng} [kW]	P _{ngc} [kW]	η _m [%]	C _{BFT} [R\$]	C _{MIG} [R\$]	C _{BFT/MIG} [R\$]	η _{mig} [%]	P _{hL} [kW]	P _{elgc} [kW]	P _{elg} P _{inst} [kW]	CI [R\$/kW]
10	0,025	1750	5,56	62,2	70%	1,72	1,03	1,66	1,5	83%	1.488,03	376,83	1.864,86	80%	2,45	1,19	1,37	1.360,55
10	0,05	1750	6,06	98,3	74%	3,64	1,05	3,45	3,0	83%	1.682,50	551,56	2.234,06	80%	4,91	2,40	2,92	766,26
15	0,025	1750	7,41	70,0	76%	2,81	1,04	2,68	2,2	83%	1.488,03	433,20	1.921,23	80%	3,68	1,76	2,25	854,47
15	0,05	1750	8,61	120,5	78%	5,72	1,07	5,34	4,5	86%	1.697,91	801,17	2.499,08	83%	7,36	3,74	4,76	524,74
15	0,1	1750	9,45	253,6	81%	11,90	1,08	10,98	9,2	89%	2.425,43	1.144,99	3.570,42	86%	14,72	7,87	10,18	350,79
15	0,15	1750	9,09	369,7	81%	17,92	1,09	16,36	15,0	90%	3.633,29	1.739,23	5.372,52	87%	22,07	13,08	15,63	343,76
20	0,05	1750	10,1	135,8	80%	7,86	1,07	7,30	7,5	88%	1.629,75	1.020,19	2.649,94	85%	9,81	6,38	6,68	396,75
20	0,1	1750	13,0	212,0	80%	15,74	1,09	14,42	11,0	89%	1.886,44	1.219,07	3.105,51	86%	19,62	9,41	13,45	230,83
20	0,15	1750	12,7	380,4	82%	24,13	1,10	21,78	18,5	91%	2.425,43	2.013,00	4.438,43	88%	29,43	16,28	21,24	209,00
20	0,2	1750	12,4	500,0	82%	32,02	1,12	28,49	22,0	91%	4.386,73	2.864,10	7.250,83	88%	39,24	19,36	28,18	257,33
25	0,05	1750	12,3	140,7	77%	9,48	1,07	8,79	7,5	89%	1.989,43	1.020,19	3.009,62	86%	12,26	6,45	8,15	369,19
25	0,1	1750	13,9	247,8	82%	20,21	1,10	18,36	15,0	90%	2.526,87	1.739,23	4.266,10	87%	24,53	13,08	17,62	242,09
25	0,15	1750	16,9	305,3	86%	31,60	1,12	28,13	18,5	91%	3.042,65	2.013,00	5.055,65	88%	36,79	16,28	27,81	181,80
25	0,2	1750	15,9	526,3	79%	38,80	1,13	34,11	37,0	92%	3.602,10	4.232,94	7.835,04	89%	49,05	33,08	34,69	225,89
25	0,25	1750	15,7	648,1	68%	41,51	1,14	36,31	45,0	93%	7.799,00	6.006,79	13.805,79	90%	61,31	40,50	37,36	369,56
25	0,3	1750	15,5	766,4	75%	55,03	1,17	47,03	55,0	93%	7.799,00	6.665,45	14.464,45	90%	73,58	49,50	49,53	292,03
30	0,05	3500	20,5	100,9	75%	11,08	1,08	10,24	9,2	88%	1.420,66	1.107,96	2.528,62	85%	14,72	7,82	9,42	268,48
30	0,1	1750	15,4	267,5	82%	24,19	1,10	21,83	15,0	90%	3.042,65	1.739,23	4.781,88	87%	29,43	13,08	21,09	226,68
30	0,15	1750	17,6	352,4	82%	36,02	1,13	31,82	22,0	91%	3.236,06	2.864,10	6.100,16	88%	44,15	19,36	31,70	192,44
30	0,2	1750	20,5	403,6	82%	48,38	1,15	41,83	37,0	92%	3.801,75	4.232,94	8.034,69	89%	58,86	32,82	42,92	187,22
30	0,35	1750	19,6	928,0	76%	78,70	1,21	64,64	75,0	93%	21.837,19	7.824,13	29.661,32	90%	103,01	67,50	70,83	418,79
40	0,025	3500	19,7	70,4	75%	7,37	1,07	6,86	5,5	87%	1.420,66	740,78	2.161,44	84%	9,81	4,60	6,17	350,52
40	0,05	3500	22,2	124,4	79%	15,58	1,09	14,28	11,0	88%	1.488,03	1.835,86	3.323,89	85%	19,62	9,33	13,21	251,61
40	0,1	1750	19,7	281,7	83%	32,73	1,12	29,08	22,0	91%	3.236,06	2.864,15	6.100,21	88%	39,24	19,36	28,80	211,82
40	0,15	1750	20,5	403,2	82%	48,38	1,15	41,83	37,0	92%	3.801,75	4.232,94	8.034,69	89%	58,86	33,08	43,25	185,75
40	0,2	1750	22,2	497,7	84%	65,69	1,19	55,14	45,0	93%	3.602,10	6.006,79	9.608,89	90%	78,48	40,50	59,12	162,53
40	0,25	1750	24,4	565,7	85%	83,48	1,22	68,04	55,0	93%	3.602,10	6.665,45	10.267,55	90%	98,10	49,50	75,13	136,66
40	0,3	1750	26,9	614,8	72%	84,76	1,23	68,94	75,0	94%	21.837,19	7.824,13	29.661,32	91%	117,72	67,88	76,71	386,69
40	0,35	1750	28,0	980,0	83%	113,8	1,28	88,42	110,	94%	21.837,19	12.636,81	34.474,00	91%	137,34	100,21	103,72	332,37
40	0,4	1750	27,4	1115,5	82%	128,0	1,31	97,31	132,	94%	21.837,19	15.362,41	37.199,60	91%	156,96	120,25	116,68	318,82
50	0,025	3500	26,0	71,4	83%	10,18	1,08	9,42	45,0	93%	1.488,03	6.238,69	7.726,72	90%	12,26	40,28	9,11	848,23
50	0,05	3500	25,4	135,6	82%	20,06	1,10	18,24	15,0	89%	1.488,03	1.787,54	3.275,57	86%	24,53	12,90	17,25	189,86
50	0,1	3500	32,8	210,6	75%	36,74	1,13	32,41	30,0	90%	1.697,91	3.829,53	5.527,44	87%	49,05	26,22	32,11	172,14
50	0,15	1750	24,6	420,5	82%	60,55	1,18	51,27	45,0	93%	3.602,10	6.006,79	9.608,89	90%	73,58	40,50	54,50	176,32
50	0,2	1750	25,4	542,2	86%	83,97	1,22	68,39	55,0	93%	3.602,10	6.665,45	10.267,55	90%	98,10	49,50	75,58	135,86

H _L	Q _t	n _{nb}	H _{bc}	Q _{bc}	η _t	P _{et}	k _p	P _{ng}	P _{ngc}	η _m	C _{BFT}	C _{MIG}	C _{BFT/MIG}	η _{mig}	P _{hL}	P _{elgc}	P _{elg}	CI
[m]	[m³/s]	[rpm]	[m]	[m³/h]	[%]	[kW]		[kW]	[kW]	[%]	[R\$]	[R\$]	[R\$]	[%]	[kW]	[kW]	P _{inst} [kW]	[R\$/kW]
50	0,25	1750	26,8	644,7	74%	90,13	1,24	72,67	75,0	94%	21.837,19	7.824,13	29.661,32	91%	122,63	67,88	81,57	363,64
60	0,025	3500	34,2	71,8	78%	11,42	1,08	10,55	9,2	88%	1.489,85	1.107,96	2.597,81	85%	14,72	7,82	9,71	267,65
60	0,05	3500	29,6	140,0	83%	24,40	1,10	22,00	15,0	89%	1.488,03	1.787,54	3.275,57	86%	29,43	12,90	20,98	156,11
60	0,1	3500	34,4	240,9	78%	46,03	1,15	39,95	37,0	92%	1.697,91	4.041,30	5.739,21	89%	58,86	33,00	41,06	139,78
60	0,15	3500	42,5	292,1	81%	71,07	1,20	59,12	55,0	93%	1.989,43	7.114,75	9.104,18	90%	88,29	49,39	63,82	142,65
70	0,025	3500	43,5	72,1	78%	13,36	1,08	12,29	15,0	89%	1.489,95	1.787,54	3.277,49	86%	17,17	12,90	11,49	285,34
70	0,05	3500	35,1	141,9	81%	27,95	1,11	25,05	18,5	90%	1.697,91	1.990,45	3.688,36	87%	34,34	16,00	24,18	152,57
70	0,1	3500	37,1	260,4	79%	54,39	1,16	46,53	37,0	92%	1.697,91	4.010,30	5.708,21	89%	68,67	33,00	48,51	117,66
70	0,15	3500	43,5	333,3	69%	71,07	1,20	59,12	75,0	93%	2.067,97	8.253,92	10.321,89	90%	103,01	67,35	63,82	161,72
70	0,2	1750	35,1	567,5	83%	114,2	1,28	88,68	75,0	94%	5.398,52	7.824,13	13.222,65	91%	137,34	67,88	103,41	127,86
70	0,25	1750	34,5	700,6	78%	133,2	1,32	100,4	110,	94%	21.837,19	12.636,81	34.474,00	91%	171,68	100,21	121,36	284,06
80	0,025	3500	53,5	72,3	77%	15,13	1,09	13,87	15,0	89%	1.489,85	1.787,54	3.277,39	86%	19,62	12,90	13,01	251,93
80	0,05	3500	41,8	142,8	82%	32,18	1,12	28,62	22,0	91%	1.483,89	2.193,91	3.677,80	88%	39,24	19,36	28,32	129,89
80	0,1	3500	40,5	271,6	79%	62,31	1,18	52,60	45,0	93%	1.989,43	6.238,69	8.228,12	90%	78,48	40,28	55,77	147,54
80	0,15	3500	45,4	365,2	67%	79,34	1,21	65,11	75,0	94%	2.067,97	8.253,92	10.321,89	91%	117,72	67,88	71,81	143,75
90	0,025	3500	63,9	72,4	74%	16,36	1,09	14,97	18,5	90%	1.573,32	1.990,45	3.563,77	87%	22,07	16,00	14,15	251,90
90	0,05	3500	49,7	143,3	82%	36,33	1,13	32,08	30,0	90%	1.701,22	3.829,53	5.530,75	87%	44,15	26,22	31,75	174,18
90	0,1	3500	44,6	277,9	80%	70,81	1,20	58,93	55,0	93%	1.989,43	7.114,75	9.104,18	90%	88,29	49,39	63,59	143,18
90	0,15	3500	48,2	387,5	68%	90,19	1,24	72,71	90,0	94%	2.067,97	12.025,80	14.093,77	91%	132,44	81,63	81,80	172,29
100	0,025	3500	74,4	72,5	73%	17,78	1,09	16,23	22,0	91%	1.573,32	2.193,91	3.767,23	88%	24,53	19,36	15,65	240,76
100	0,05	3500	58,5	143,7	75%	36,89	1,13	32,53	37,0	92%	1.573,32	4.041,30	5.614,62	89%	49,05	33,00	32,90	170,65
100	0,15	3500	51,4	402,3	69%	101,0	1,26	80,09	90,0	94%	2.067,97	12.025,80	14.093,77	91%	147,15	81,63	91,69	153,71
20	0,025	3500	13,0	53,0	58%	2,86	1,04	2,73	3,8	88%	492,00		860,00		4,91			
25	0,025	3500	13,9	62,0	55%	3,37	1,05	3,20	5,5	89%	492,00		1.060,00		6,13			
30	0,025	3500	15,4	66,9	57%	4,19	1,05	3,96	3,8	88%	492,00		1.040,00		7,36			
30	0,05	3500	20,5	100,9	60%	8,83	1,07	8,19	11,0	91%	511,00		1.622,00		14,72			
40	0,025	3500	19,7	70,4	61%	5,98	1,07	5,58	11,0	91%	511,00		1.383,00		9,81			
50	0,025	3500	26,0	71,4	54%	6,62	1,07	6,17	9,2	90%	544,00		1.507,00		12,26			
60	0,025	3500	34,2	71,8	60%	8,83	1,07	8,19	11,0	91%	544,00		1.640,00		14,72			
80	0,025	3500	53,5	72,3	64%	12,56	1,08	11,57	18,5	92%	544,00		2.421,00		19,62			
									0,1			238,98						
									0,2			240,95						
									0,2			247,84						
									0,4			272,60						
									0,6			305,23						
									0,8			325,76						
									1,1			384,40						
									1,5			444,07						
									2,3			513,36						
									3,0			669,32						
									3,8			686,95						

H_L	Q_t	n_{nb}	H_{bc}	Q_{bc}	η_t	P_{et}	k_p	P_{ng}	P_{ngc}	η_m	C_{BFT}	C_{MIG}	$C_{BFT/MIG}$	η_{mig}	P_{hL}	P_{elgc}	P_{elg}	P_{inst}	CI
[m]	[m ³ /s]	[rpm]	[m]	[m ³ /h]	[%]	[kW]		[kW]	[kW]	[%]	[R\$]	[R\$]	[R\$]	[%]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[R\$/kW]
								4,5				961,43							
								5,6				1.018,10							
								7,5				1.218,13							
								9,4				1.372,76							
								11,3				1.405,08							
								15,0				2.005,04							
								18,8				2.435,45							
								22,5				3.466,34							
								30,0				4.633,34							
								37,5				5.136,82							
								45,0				7.459,30							
								56,3				8.278,82							
								75,0				9.717,46							
								93,8				14.396,16							
								112,				15.683,86							
								0,1				245,23							
								0,2				245,89							
								0,2				248,27							
								0,4				253,03							
								0,6				277,12							
								0,8				290,14							
								1,1				363,41							
								1,5				398,53							
								2,3				486,23							
								3,0				539,60							
								3,8				680,34							
								4,5				856,32							
								5,6				885,82							
								7,5				1.173,97							
								9,4				1.327,61							
								11,3				1.464,08							
								15,0				2.155,92							
								18,8				2.406,92							
								22,5				2.610,72							
								30,0				4.636,81							
								37,5				4.898,79							
								45,0				7.748,28							
								56,3				8.835,44							
								75,0				10.258,22							
								93,8				14.935,17							
								112,				16.659,38							

H_L	Q_t	n_{nb}	H_{bc}	Q_{bc}	η_t	P_{et}	k_p	P_{ng}	P_{ngc}	η_m	C_{BFT}	C_{MIG}	$C_{BFT/MIG}$	η_{mig}	P_{hL}	P_{elgc}	P_{elg}	P_{inst}	CI
[m]	[m ³ /s]	[rpm]	[m]	[m ³ /h]	[%]	[kW]		[kW]	[kW]	[%]	[R\$]	[R\$]	[R\$]	[%]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[R\$/kW]

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE E – Cotação de grupos geradores convencionais

TABELA 13 - Cotação de grupos geradores

Queda [m]	Vazão [m³/s]	Potência Elétrica [kVA]	Fator de Potência [1]	Potência Elétrica Fornecida [kW]	Preço [R\$]	Custo Índice [R\$/kW]
5	0,4	12,5	0,8	10	25.600,00	2.560,00
5	0,24	20	0,8	16	40.000,00	2.500,00
5	0,8	40	0,8	32	74.550,00	2.329,69
7	0,2	15	0,8	12	19.600,00	1.633,33
7	0,28	20	0,8	16	31.000,00	1.937,50
7	0,5	36	0,8	28,8	51.700,00	1.795,14
7	0,97	50	0,8	40	86.700,00	2.167,50
7	1,29	65	0,8	52	148.200,00	2.850,00
10	0,24	25	0,8	20	25.000,00	1.250,00
10	0,36	36	0,8	28,8	45.200,00	1.569,44
10	0,6	60	0,8	48	77.000,00	1.604,17
10	1,1	100	0,8	80	152.000,00	1.900,00
10	1,5	120	0,8	96	188.000,00	1.958,33
15	0,14	20	0,8	16	18.850,00	1.178,13
15	0,28	45	0,8	36	34.800,00	966,67
15	0,4	60	0,8	48	62.000,00	1.291,67
15	0,6	80	0,8	64	95.500,00	1.492,19
15	1	100	0,8	80	124.550,00	1.556,88
15	1,9	200	0,8	160	220.000,00	1.375,00
20	0,08	15	0,8	12	17.500,00	1.458,33

Queda [m]	Vazão [m³/s]	Potência Elétrica [kVA]	Fator de Potência [1]	Potência Elétrica Fornecida [kW]	Preço [R\$]	Custo Índice [R\$/kW]
20	0,16	30	0,8	24	23.650,00	985,42
20	0,32	60	0,8	48	40.400,00	841,67
20	0,5	100	0,8	80	84.300,00	1.053,75
20	1,2	170	0,8	136	162.000,00	1.191,18
20	2,2	320	0,8	256	340.000,00	1.328,13
30	0,08	25	0,8	20	43.550,00	2.177,50
30	0,2	60	0,8	48	38.800,00	808,33
30	0,4	120	0,8	96	92.700,00	965,63
30	0,6	180	0,8	144	109.650,00	761,46
30	1	300	0,8	240	212.600,00	885,83
40	0,08	30	0,8	24	48.400,00	2.016,67
40	0,2	80	0,8	64	51.300,00	801,56
40	0,4	160	0,8	128	109.650,00	856,64
40	0,6	240	0,8	192	118.000,00	614,58
40	1	330	0,8	264	212.600,00	805,30

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE F – Planilha para definição de custos de MCHs

	A	B	C
1	PARÂMETROS DE PROJETO		
2	Potência Instalada [kW]	104,06	
3	Queda Bruta [m]	50,0	
4	Vazão de Projeto [m³/s]	0,3	
5	Rendimento Total da Central [%]	70%	
6	Cotação do dólar [R\$/US\$]	2,034	
7			
8	Altura da barragem [m]	1	
9	Comprimento da Barragem [m]	10	
10	Tipo de barragem	Barragem de concreto	
11		Barragem de pedra argamassada	
12			
13	Comprimento do Canal ou Conduto de Baixa Pressão [m]	30	
14	Tipo de sistema de baixa pressão	Canal de adução com revestimento em alvenaria	
15		Canal de adução sem revestimento	
16			
17	Comprimento do Conduto Forçado [m]	70	
18	Tipo de conduto forçado	Tubulação forçada em ferro dúctil	
19		Tubulação forçada em PVC	
20			
21	Comprimento da Rede de Distribuição [m]	100	
22	Comprimento do Canal de Fuga [m]	5	
23			
24	Tipo de turbina	Turbina Michell-Banki	
25		BFT	
26			
27			
28	Estrutura / Equipamento	Custo [US\$]	Custo [R\$]
29	Barragem	1.395,54	R\$ 2.838,53
30	Tomada d'água	611,00	R\$ 1.242,77
31	Sistema de baixa pressão	607,75	R\$ 1.236,16
32	Câmara de carga	791,09	R\$ 1.609,07
33	Sistema de alta pressão	15.560,54	R\$ 31.650,14
34	Casa de força	11.104,07	R\$ 22.585,67
35	Equipamentos eletro-mecânicos	12.865,71	R\$ 26.168,85
36	Canal de fuga	101,29	R\$ 206,03
37	Rede de distribuição	2.870,89	R\$ 5.839,38
38			
39	CUSTO TOTAL DA CENTRAL	\$45.907,87	R\$ 93.376,60
40	CUSTO ÍNDICE [CUSTO / kW instalado]	\$441,19	R\$ 897,38

FIGURA 121 - Planilha para definição de custos de MCHs

Apêndice G – Custos índices de MCHs

TABELA 14 - Simulação de custos índices de MCHs

				BFT/MIG			Michell-Banki		
P_{inst}	H_b	H_L	L_{eff}	Equipamentos		Custo índice [US\$ / kW]	Equipamentos		Custo índice [US\$ / kW]
[kW]	[m]	[m]	[m]	eletro- mecânicos [US\$]	Custo total da central [US\$]		eletro- mecânicos [US\$]	Custo total da central [US\$]	
6,94	20,0	19,40	30,0	969,32	15.449,96	2.227,18	3.781,66	18.262,30	2.632,59
13,87	20,0	19,40	30,0	1938,64	19.102,61	1.376,86	7.563,32	24.727,29	1.782,28
27,75	20,0	19,40	30,0	3877,28	24.756,75	892,20	15.126,65	36.006,11	1.297,61
41,62	20,0	19,40	30,0	5815,92	29.593,51	711,01	22.689,97	46.467,55	1.116,42
55,50	20,0	19,40	30,0	7754,56	34.061,42	613,76	30.253,29	56.560,15	1.019,18
69,37	20,0	19,40	30,0	9693,21	38.329,93	552,54	37.816,62	66.453,34	957,95
83,24	20,0	19,40	30,0	11631,85	42.489,45	510,42	45.379,94	76.237,55	915,83
97,12	20,0	19,40	30,0	13570,49	46.599,70	479,83	52.943,26	85.972,48	885,24
10,41	30,0	29,10	50,0	1355,68	17.218,33	1.654,73	6.297,08	22.159,72	2.129,62
20,81	30,0	29,10	50,0	2711,37	22.030,18	1.058,58	12.594,16	31.912,97	1.533,47
41,62	30,0	29,10	50,0	5422,73	29.667,24	712,78	25.188,31	49.432,82	1.187,66
62,43	30,0	29,10	50,0	8134,10	36.332,12	581,94	37.782,47	65.980,49	1.056,82
83,24	30,0	29,10	50,0	10845,46	42.601,74	511,77	50.376,63	82.132,91	986,65
13,87	40,0	38,80	50,0	1685,37	17.310,05	1.247,66	9.572,70	25.197,38	1.816,16
27,75	40,0	38,80	50,0	3370,75	22.438,91	808,67	19.145,41	38.213,57	1.377,16
55,50	40,0	38,80	50,0	6741,49	30.813,57	555,24	38.290,81	62.362,89	1.123,74
83,24	40,0	38,80	50,0	10112,24	38.358,60	460,80	57.436,22	85.682,58	1.029,29

Fonte: Autoria própria

Apêndice H – Resultados dos ensaios no grupo gerador

BFT/MIG

TABELA 15 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Valores médios

n	z ₁	a	z ₃	P ₁ /ρ.g	Q	D ₁	D ₃ '	A ₁	A ₃ '	v ₁	v ₃ '	H _L	P _{HL}	P _{el}	η _{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
	1,290	0,000	0,328	7,330	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,750	2,682	9,078	15,086	0,759	5,03%
	1,290	0,000	0,352	8,653	0,187	0,213	0,284	0,036	0,063	5,233	2,955	10,545	19,308	5,691	29,48%
	1,29	0,000	0,355	8,026	0,190	0,213	0,284	0,036	0,063	5,308	2,997	9,942	18,465	5,591	30,28%
	1,290	0,000	0,365	8,740	0,194	0,213	0,284	0,036	0,063	5,431	3,067	10,693	20,319	8,331	41,01%
	1,290	0,000	0,359	9,384	0,196	0,213	0,284	0,036	0,063	5,484	3,096	11,362	21,799	8,210	37,67%
	1,290	0,000	0,383	12,152	0,223	0,213	0,284	0,036	0,063	6,226	3,515	14,409	31,388	16,624	52,99%
	1,290	0,000	0,393	11,322	0,227	0,213	0,284	0,036	0,063	6,353	3,587	13,624	30,282	16,604	54,83%
1800	1,290	0,000	0,388	13,957	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,712	3,790	16,428	38,577	23,053	59,78%
	1,290	0,000	0,397	13,242	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,716	3,792	15,706	36,902	23,038	62,43%
	1,290	0,000	0,392	15,448	0,248	0,213	0,284	0,036	0,063	6,931	3,913	18,019	43,691	27,542	63,05%
	1,290	0,000	0,397	14,570	0,251	0,213	0,284	0,036	0,063	7,017	3,962	17,178	42,173	28,438	67,44%
	1,290	0,000	0,393	14,517	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,074	3,994	17,156	42,458	27,543	64,87%
	1,290	0,000	0,385	15,503	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,084	4,000	18,155	44,994	28,355	63,03%
	1,290	0,000	0,382	15,485	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,100	4,009	18,149	45,079	27,923	61,95%
	1,290	0,000	0,378	14,592	0,256	0,213	0,284	0,036	0,063	7,149	4,037	17,284	43,230	29,290	67,76%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 16 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 1

n	z ₁	a	z ₃	P ₁ /ρ.g	Q	D ₁	D ₃ '	A ₁	A ₃ '	v ₁	v ₃ '	H _L	P _{HL}	P _{el}	η _{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,338	7,546	0,169	0,213	0,284	0,036	0,063	4,732	2,672	9,278	15,359	0,740	4,82%
	1,290	0,000	0,328	7,218	0,167	0,213	0,284	0,036	0,063	4,680	2,643	8,943	14,643	0,790	5,40%

n	z ₁	a	z ₃	P ₁ /ρ.g	Q	D ₁	D ₃ '	A ₁	A ₃ '	v ₁	v ₃ '	H _L	P _{HL}	P _{el}	η _{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1,290	0,000	0,338	7,565	0,167	0,213	0,284	0,036	0,063	4,681	2,643	9,280	15,196	0,790	5,20%	
1,290	0,000	0,333	7,448	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,684	2,645	9,169	15,027	0,750	4,99%	
1,290	0,000	0,327	7,215	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,708	2,658	8,949	14,741	0,750	5,09%	
1,290	0,000	0,326	7,396	0,171	0,213	0,284	0,036	0,063	4,770	2,693	9,152	15,275	0,740	4,84%	
1,290	0,000	0,327	7,385	0,172	0,213	0,284	0,036	0,063	4,807	2,714	9,153	15,392	0,740	4,81%	
1,290	0,000	0,323	7,371	0,172	0,213	0,284	0,036	0,063	4,807	2,714	9,143	15,377	0,750	4,88%	
1,290	0,000	0,322	6,997	0,172	0,213	0,284	0,036	0,063	4,814	2,718	8,771	14,771	0,750	5,08%	
1,290	0,000	0,323	7,164	0,172	0,213	0,284	0,036	0,063	4,820	2,721	8,941	15,077	0,790	5,24%	

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 17 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 2

n	z ₁	a	z ₃	P ₁ /ρ.g	Q	D ₁	D ₃ '	A ₁	A ₃ '	v ₁	v ₃ '	H _L	P _{HL}	P _{el}	η _{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1,290	0,000	0,351	9,037	0,187	0,213	0,284	0,036	0,063	5,227	2,951	10,927	19,982	5,700	28,53%	
1,290	0,000	0,352	8,605	0,188	0,213	0,284	0,036	0,063	5,243	2,960	10,500	19,261	5,700	29,59%	
1,290	0,000	0,352	8,798	0,188	0,213	0,284	0,036	0,063	5,243	2,960	10,694	19,616	5,700	29,06%	
1,290	0,000	0,351	8,485	0,188	0,213	0,284	0,036	0,063	5,254	2,967	10,385	19,090	5,700	29,86%	
1800	1,290	0,000	0,352	8,694	0,188	0,213	0,284	0,036	0,063	5,246	2,962	10,591	19,439	5,620	28,91%
1,290	0,000	0,353	8,466	0,187	0,213	0,284	0,036	0,063	5,241	2,959	10,360	18,995	5,620	29,59%	
1,290	0,000	0,351	8,444	0,186	0,213	0,284	0,036	0,063	5,214	2,944	10,330	18,846	5,690	30,19%	
1,290	0,000	0,351	8,741	0,187	0,213	0,284	0,036	0,063	5,215	2,944	10,627	19,386	5,740	29,61%	
1,290	0,000	0,351	8,495	0,187	0,213	0,284	0,036	0,063	5,222	2,948	10,384	18,971	5,740	30,26%	
1,290	0,000	0,352	8,767	0,187	0,213	0,284	0,036	0,063	5,227	2,952	10,657	19,490	5,700	29,25%	

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 18 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 3

n	z ₁	a	z ₃	P ₁ /ρ.g	Q	D ₁	D ₃ '	A ₁	A ₃ '	v ₁	v ₃ '	H _L	P _{HL}	P _{el}	η _{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,365	9,220	0,196	0,213	0,284	0,036	0,063	5,468	3,088	11,187	21,403	8,190	38,27%
	1,290	0,000	0,363	9,292	0,196	0,213	0,284	0,036	0,063	5,493	3,101	11,269	21,657	8,190	37,82%
	1,290	0,000	0,364	9,312	0,195	0,213	0,284	0,036	0,063	5,447	3,075	11,271	21,479	8,170	38,04%
	1,290	0,000	0,360	9,747	0,194	0,213	0,284	0,036	0,063	5,434	3,068	11,705	22,253	8,170	36,71%
	1,290	0,000	0,356	9,471	0,196	0,213	0,284	0,036	0,063	5,475	3,091	11,449	21,928	8,250	37,62%
	1,290	0,000	0,355	9,541	0,195	0,213	0,284	0,036	0,063	5,458	3,082	11,514	21,986	8,250	37,52%
	1,290	0,000	0,364	9,349	0,196	0,213	0,284	0,036	0,063	5,493	3,102	11,326	21,768	8,250	37,90%
	1,290	0,000	0,358	9,321	0,197	0,213	0,284	0,036	0,063	5,508	3,110	11,310	21,793	8,250	37,86%
	1,290	0,000	0,355	9,399	0,198	0,213	0,284	0,036	0,063	5,538	3,127	11,402	22,090	8,190	37,08%
	1,290	0,000	0,353	9,189	0,198	0,213	0,284	0,036	0,063	5,527	3,121	11,190	21,637	8,190	37,85%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 19 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 4

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,391	11,979	0,219	0,213	0,284	0,036	0,063	6,132	3,462	14,188	30,436	16,690	54,84%
	1,290	0,000	0,382	12,293	0,220	0,213	0,284	0,036	0,063	6,150	3,473	14,518	31,239	16,690	53,43%
	1,290	0,000	0,384	12,202	0,220	0,213	0,284	0,036	0,063	6,163	3,480	14,431	31,115	16,620	53,41%
	1,290	0,000	0,378	11,891	0,221	0,213	0,284	0,036	0,063	6,176	3,487	14,131	30,535	16,620	54,43%
	1,290	0,000	0,382	12,473	0,222	0,213	0,284	0,036	0,063	6,197	3,499	14,718	31,910	16,600	52,02%
	1,290	0,000	0,381	12,493	0,223	0,213	0,284	0,036	0,063	6,229	3,517	14,753	32,150	16,600	51,63%
	1,290	0,000	0,386	12,059	0,224	0,213	0,284	0,036	0,063	6,252	3,530	14,324	31,329	16,700	53,31%
	1,290	0,000	0,381	11,694	0,224	0,213	0,284	0,036	0,063	6,269	3,540	13,971	30,643	16,540	53,98%
	1,290	0,000	0,382	12,315	0,226	0,213	0,284	0,036	0,063	6,333	3,576	14,619	32,391	16,540	51,06%
	1,290	0,000	0,381	12,119	0,228	0,213	0,284	0,036	0,063	6,362	3,592	14,437	32,136	16,640	51,78%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 20 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 5

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,389	13,976	0,241	0,213	0,284	0,036	0,063	6,732	3,801	16,455	38,759	23,060	59,50%
	1,290	0,000	0,385	14,116	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,724	3,796	16,595	39,039	23,030	58,99%
	1,290	0,000	0,385	13,815	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,723	3,796	16,293	38,321	23,020	60,07%
	1,290	0,000	0,385	13,765	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,722	3,796	16,244	38,203	23,020	60,26%
	1,290	0,000	0,385	13,681	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,723	3,796	16,160	38,008	23,070	60,70%
	1,290	0,000	0,388	13,883	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,714	3,791	16,355	38,416	23,070	60,05%
	1,290	0,000	0,391	14,896	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,709	3,788	17,363	40,756	23,010	56,46%
	1,290	0,000	0,390	13,807	0,239	0,213	0,284	0,036	0,063	6,686	3,775	16,263	38,041	23,010	60,49%
	1,290	0,000	0,389	13,812	0,239	0,213	0,284	0,036	0,063	6,694	3,779	16,273	38,110	23,120	60,67%
	1,290	0,000	0,389	13,817	0,239	0,213	0,284	0,036	0,063	6,693	3,779	16,278	38,116	23,120	60,66%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 21 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 6

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,397	15,276	0,247	0,213	0,284	0,036	0,063	6,906	3,899	17,829	43,075	27,650	64,19%
	1,290	0,000	0,394	15,553	0,247	0,213	0,284	0,036	0,063	6,899	3,895	18,106	43,700	27,650	63,27%
	1,290	0,000	0,392	15,458	0,249	0,213	0,284	0,036	0,063	6,950	3,924	18,038	43,859	27,460	62,61%
	1,290	0,000	0,403	15,623	0,249	0,213	0,284	0,036	0,063	6,965	3,933	18,200	44,350	27,460	61,92%
	1,290	0,000	0,391	15,325	0,249	0,213	0,284	0,036	0,063	6,966	3,933	17,914	43,655	27,370	62,70%
	1,290	0,000	0,391	15,316	0,249	0,213	0,284	0,036	0,063	6,952	3,925	17,898	43,530	27,690	63,61%
	1,290	0,000	0,393	15,609	0,248	0,213	0,284	0,036	0,063	6,925	3,910	18,176	44,033	27,690	62,88%
	1,290	0,000	0,387	15,676	0,248	0,213	0,284	0,036	0,063	6,939	3,918	18,256	44,317	27,470	61,98%
	1,290	0,000	0,393	15,256	0,247	0,213	0,284	0,036	0,063	6,903	3,898	17,812	43,020	27,470	63,85%
	1,290	0,000	0,382	15,391	0,247	0,213	0,284	0,036	0,063	6,903	3,898	17,958	43,370	27,510	63,43%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 22 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 7

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,383	15,401	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,060	3,986	18,044	44,569	27,880	62,55%
	1,290	0,000	0,374	15,588	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,085	4,000	18,252	45,240	27,910	61,69%
	1,290	0,000	0,384	15,581	0,255	0,213	0,284	0,036	0,063	7,124	4,022	18,254	45,496	27,840	61,19%
	1,290	0,000	0,378	15,476	0,255	0,213	0,284	0,036	0,063	7,125	4,023	18,155	45,254	27,840	61,52%
	1,290	0,000	0,380	15,322	0,255	0,213	0,284	0,036	0,063	7,132	4,027	18,003	44,917	27,870	62,05%
	1,290	0,000	0,386	15,463	0,255	0,213	0,284	0,036	0,063	7,139	4,031	18,141	45,313	27,870	61,51%
	1,290	0,000	0,381	15,541	0,255	0,213	0,284	0,036	0,063	7,130	4,026	18,220	45,451	28,000	61,60%
	1,290	0,000	0,379	15,455	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,082	3,998	18,112	44,874	28,000	62,40%
	1,290	0,000	0,387	15,490	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,081	3,998	18,139	44,938	28,010	62,33%
	1,290	0,000	0,385	15,534	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,040	3,975	18,165	44,740	28,010	62,61%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 23 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 8

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,384	15,242	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,039	3,974	17,873	44,013	28,350	64,41%
	1,290	0,000	0,385	15,651	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,047	3,979	18,285	45,081	28,350	62,89%
	1,290	0,000	0,389	15,763	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,050	3,981	18,395	45,372	28,210	62,17%
	1,290	0,000	0,390	15,190	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,088	4,002	17,839	44,235	28,470	64,36%
	1,290	0,000	0,390	15,430	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,095	4,006	18,083	44,883	28,470	63,43%
	1,290	0,000	0,390	15,882	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,100	4,009	18,537	46,046	28,360	61,59%
	1,290	0,000	0,385	15,201	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,104	4,011	17,863	44,400	28,360	63,87%
	1,290	0,000	0,376	15,733	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,111	4,015	18,408	45,796	28,460	62,15%
	1,290	0,000	0,379	15,530	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,108	4,013	18,200	45,260	28,260	62,44%
	1,290	0,000	0,381	15,404	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,097	4,007	18,067	44,858	28,260	63,00%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 24 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 9

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
	1,290	0,000	0,375	14,648	0,256	0,213	0,284	0,036	0,063	7,148	4,036	17,342	43,372	29,370	67,72%
	1,290	0,000	0,383	14,602	0,257	0,213	0,284	0,036	0,063	7,191	4,060	17,309	43,544	29,200	67,06%
1800	1,290	0,000	0,375	14,595	0,257	0,213	0,284	0,036	0,063	7,180	4,054	17,305	43,472	29,290	67,38%
	1,290	0,000	0,376	14,557	0,256	0,213	0,284	0,036	0,063	7,156	4,040	17,255	43,198	29,290	67,80%
	1,290	0,000	0,380	14,556	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,071	3,992	17,207	42,563	29,300	68,84%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 25 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 10

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
	1,290	0,000	0,387	14,765	0,251	0,213	0,284	0,036	0,063	7,023	3,966	17,386	42,720	27,830	65,15%
	1,290	0,000	0,389	14,707	0,251	0,213	0,284	0,036	0,063	7,016	3,961	17,322	42,518	27,830	65,45%
	1,290	0,000	0,397	14,597	0,250	0,213	0,284	0,036	0,063	6,982	3,942	17,187	41,983	28,170	67,10%
	1,290	0,000	0,395	14,610	0,248	0,213	0,284	0,036	0,063	6,946	3,922	17,186	41,764	27,980	67,00%
1800	1,290	0,000	0,385	14,681	0,247	0,213	0,284	0,036	0,063	6,896	3,893	17,242	41,596	27,980	67,27%
	1,290	0,000	0,384	14,659	0,245	0,213	0,284	0,036	0,063	6,857	3,872	17,202	41,269	27,980	67,80%
	1,290	0,000	0,387	14,669	0,245	0,213	0,284	0,036	0,063	6,855	3,870	17,208	41,268	27,940	67,70%
	1,290	0,000	0,382	14,695	0,244	0,213	0,284	0,036	0,063	6,809	3,844	17,217	41,012	27,940	68,13%
	1,290	0,000	0,381	14,691	0,243	0,213	0,284	0,036	0,063	6,805	3,842	17,212	40,974	27,940	68,19%
	1,290	0,000	0,382	14,849	0,246	0,213	0,284	0,036	0,063	6,865	3,876	17,399	41,791	27,900	66,76%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 26 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 11

N	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,407	14,625	0,247	0,213	0,284	0,036	0,063	6,893	3,892	17,163	41,392	28,490	68,83%
	1,290	0,000	0,406	14,545	0,250	0,213	0,284	0,036	0,063	7,000	3,952	17,136	41,965	28,490	67,89%

N	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1,290	0,000	0,397	14,507	0,250	0,213	0,284	0,036	0,063	7,000	3,952	17,105	41,891	28,450	67,91%	
1,290	0,000	0,397	14,510	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,081	3,998	17,149	42,483	28,430	66,92%	
1,290	0,000	0,396	14,568	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,071	3,993	17,203	42,560	28,430	66,80%	
1,290	0,000	0,401	14,553	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,060	3,986	17,177	42,430	28,360	66,84%	
1,290	0,000	0,397	14,548	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,034	3,972	17,164	42,239	28,360	67,14%	
1,290	0,000	0,391	14,576	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,035	3,972	17,199	42,330	28,390	67,07%	
1,290	0,000	0,390	14,670	0,250	0,213	0,284	0,036	0,063	7,000	3,952	17,276	42,308	28,390	67,10%	
1,290	0,000	0,390	14,600	0,250	0,213	0,284	0,036	0,063	7,000	3,952	17,206	42,136	28,590	67,85%	

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 27 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 12

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1,290	0,000	0,399	14,359	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,039	3,974	16,975	41,800	27,460	65,69%	
1,290	0,000	0,385	14,537	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,039	3,974	17,167	42,276	27,540	65,14%	
1,290	0,000	0,396	14,477	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,071	3,992	17,112	42,332	27,540	65,06%	
1,290	0,000	0,387	14,486	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,100	4,009	17,144	42,587	27,550	64,69%	
1800	1,290	0,000	0,396	14,588	0,255	0,213	0,284	0,036	0,063	7,121	4,021	17,248	42,969	27,550	64,12%
1,290	0,000	0,392	14,569	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,095	4,006	17,220	42,741	27,640	64,67%	
1,290	0,000	0,395	14,517	0,254	0,213	0,284	0,036	0,063	7,094	4,006	17,165	42,603	27,640	64,88%	
1,290	0,000	0,397	14,525	0,253	0,213	0,284	0,036	0,063	7,082	3,999	17,165	42,529	27,430	64,50%	
1,290	0,000	0,394	14,568	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,056	3,984	17,198	42,452	27,540	64,87%	
1,290	0,000	0,392	14,542	0,252	0,213	0,284	0,036	0,063	7,041	3,975	17,166	42,285	27,540	65,13%	

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 28 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 13

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,395	13,250	0,239	0,213	0,284	0,036	0,063	6,678	3,771	15,698	36,678	23,030	62,79%
	1,290	0,000	0,396	13,337	0,241	0,213	0,284	0,036	0,063	6,730	3,800	15,808	37,219	23,070	61,98%
	1,290	0,000	0,405	13,217	0,241	0,213	0,284	0,036	0,063	6,730	3,800	15,679	36,919	23,070	62,49%
	1,290	0,000	0,404	13,186	0,241	0,213	0,284	0,036	0,063	6,743	3,807	15,655	36,934	23,080	62,49%
	1,290	0,000	0,398	13,224	0,242	0,213	0,284	0,036	0,063	6,756	3,814	15,705	37,119	23,080	62,18%
	1,290	0,000	0,394	13,214	0,241	0,213	0,284	0,036	0,063	6,738	3,804	15,691	36,989	23,120	62,50%
	1,290	0,000	0,395	13,281	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,714	3,791	15,746	36,989	23,120	62,51%
	1,290	0,000	0,395	13,319	0,240	0,213	0,284	0,036	0,063	6,715	3,791	15,785	37,081	22,950	61,89%
	1,290	0,000	0,395	13,261	0,239	0,213	0,284	0,036	0,063	6,686	3,775	15,713	36,754	22,930	62,39%
	1,290	0,000	0,396	13,135	0,239	0,213	0,284	0,036	0,063	6,669	3,765	15,577	36,342	22,930	63,10%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 29 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 14

N	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,409	11,285	0,227	0,213	0,284	0,036	0,063	6,350	3,585	13,570	30,149	16,640	55,19%
	1,290	0,000	0,403	11,356	0,228	0,213	0,284	0,036	0,063	6,384	3,604	13,662	30,511	16,660	54,60%
	1,290	0,000	0,392	11,305	0,228	0,213	0,284	0,036	0,063	6,376	3,600	13,618	30,380	16,660	54,84%
	1,290	0,000	0,391	11,303	0,228	0,213	0,284	0,036	0,063	6,363	3,592	13,612	30,299	16,540	54,59%
	1,290	0,000	0,395	11,318	0,227	0,213	0,284	0,036	0,063	6,352	3,587	13,618	30,265	16,540	54,65%
	1,290	0,000	0,387	11,340	0,227	0,213	0,284	0,036	0,063	6,347	3,584	13,646	30,300	16,550	54,62%
	1,290	0,000	0,384	11,322	0,226	0,213	0,284	0,036	0,063	6,327	3,572	13,622	30,154	16,550	54,89%
	1,290	0,000	0,386	11,310	0,227	0,213	0,284	0,036	0,063	6,344	3,582	13,616	30,221	16,640	55,06%
	1,290	0,000	0,394	11,359	0,227	0,213	0,284	0,036	0,063	6,347	3,583	13,658	30,326	16,640	54,87%
	1,290	0,000	0,393	11,321	0,227	0,213	0,284	0,036	0,063	6,341	3,580	13,618	30,212	16,620	55,01%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 30 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 15

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,365	8,736	0,195	0,213	0,284	0,036	0,063	5,454	3,080	10,697	20,412	8,340	40,86%
	1,290	0,000	0,363	8,776	0,195	0,213	0,284	0,036	0,063	5,441	3,072	10,734	20,433	8,360	40,92%
	1,290	0,000	0,366	8,727	0,194	0,213	0,284	0,036	0,063	5,429	3,065	10,678	20,280	8,360	41,22%
	1,290	0,000	0,363	8,665	0,193	0,213	0,284	0,036	0,063	5,395	3,046	10,606	20,019	8,350	41,71%
	1,290	0,000	0,359	8,765	0,193	0,213	0,284	0,036	0,063	5,386	3,041	10,706	20,174	8,350	41,39%
	1,290	0,000	0,365	8,782	0,193	0,213	0,284	0,036	0,063	5,395	3,046	10,721	20,233	8,320	41,12%
	1,290	0,000	0,366	8,708	0,194	0,213	0,284	0,036	0,063	5,438	3,070	10,662	20,285	8,320	41,02%
	1,290	0,000	0,368	8,647	0,194	0,213	0,284	0,036	0,063	5,437	3,070	10,599	20,161	8,280	41,07%
	1,290	0,000	0,369	8,781	0,195	0,213	0,284	0,036	0,063	5,459	3,082	10,740	20,512	8,280	40,37%
	1,290	0,000	0,366	8,814	0,196	0,213	0,284	0,036	0,063	5,481	3,095	10,784	20,678	8,350	40,38%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 31 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 16

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,355	7,937	0,191	0,213	0,284	0,036	0,063	5,332	3,011	9,863	18,398	5,540	30,11%
	1,290	0,000	0,354	7,969	0,190	0,213	0,284	0,036	0,063	5,318	3,003	9,889	18,399	5,540	30,11%
	1,290	0,000	0,355	8,071	0,190	0,213	0,284	0,036	0,063	5,318	3,003	9,991	18,589	5,580	30,02%
	1,290	0,000	0,354	8,075	0,190	0,213	0,284	0,036	0,063	5,313	3,000	9,994	18,576	5,590	30,09%
	1,290	0,000	0,353	8,093	0,189	0,213	0,284	0,036	0,063	5,296	2,990	10,007	18,540	5,590	30,15%
	1,290	0,000	0,356	7,964	0,189	0,213	0,284	0,036	0,063	5,296	2,990	9,875	18,295	5,590	30,55%
	1,290	0,000	0,353	8,031	0,190	0,213	0,284	0,036	0,063	5,310	2,998	9,950	18,483	5,640	30,51%
	1,290	0,000	0,357	7,997	0,190	0,213	0,284	0,036	0,063	5,303	2,994	9,909	18,384	5,640	30,68%
	1,290	0,000	0,357	8,060	0,189	0,213	0,284	0,036	0,063	5,293	2,989	9,968	18,460	5,640	30,55%
	1,290	0,000	0,354	8,062	0,190	0,213	0,284	0,036	0,063	5,305	2,995	9,978	18,519	5,560	30,02%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 32 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 17

n	z₁	a	Z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,316	6,541	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,709	2,659	8,288	13,653	0,740	5,42%
	1,290	0,000	0,314	6,569	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,701	2,654	8,314	13,673	0,740	5,41%
	1,290	0,000	0,316	6,652	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,706	2,657	8,397	13,823	0,800	5,79%
	1,290	0,000	0,323	6,704	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,706	2,657	8,442	13,898	0,800	5,76%
	1,290	0,000	0,326	6,609	0,169	0,213	0,284	0,036	0,063	4,711	2,660	8,347	13,758	0,750	5,45%
	1,290	0,000	0,314	6,597	0,169	0,213	0,284	0,036	0,063	4,738	2,675	8,354	13,849	0,810	5,85%
	1,290	0,000	0,327	6,607	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,759	2,687	8,359	13,918	0,810	5,82%
	1,290	0,000	0,324	6,642	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,763	2,689	8,398	13,994	0,810	5,79%
	1,290	0,000	0,320	6,618	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,762	2,689	8,378	13,959	0,860	6,16%
	1,290	0,000	0,331	6,637	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,745	2,679	8,380	13,910	0,750	5,39%

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 33 – Ensaio do grupo gerador BFT/MIG – Ponto 18

n	z₁	a	z₃	P₁/ρ.g	Q	D₁	D₃'	A₁	A₃'	v₁	v₃'	H_L	P_{HL}	P_{el}	η_{bft/mig}
[rpm]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m³/s]	[m]	[m]	[m²]	[m²]	[m/s]	[m/s]	[m]	[kW]	[kW]	[%]
1800	1,290	0,000	0,316	6,541	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,709	2,659	8,288	13,653	0,740	5,42%
	1,290	0,000	0,314	6,569	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,701	2,654	8,314	13,673	0,740	5,41%
	1,290	0,000	0,316	6,652	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,706	2,657	8,397	13,823	0,800	5,79%
	1,290	0,000	0,323	6,704	0,168	0,213	0,284	0,036	0,063	4,706	2,657	8,442	13,898	0,800	5,76%
	1,290	0,000	0,326	6,609	0,169	0,213	0,284	0,036	0,063	4,711	2,660	8,347	13,758	0,750	5,45%
	1,290	0,000	0,314	6,597	0,169	0,213	0,284	0,036	0,063	4,738	2,675	8,354	13,849	0,810	5,85%
	1,290	0,000	0,327	6,607	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,759	2,687	8,359	13,918	0,810	5,82%
	1,290	0,000	0,324	6,642	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,763	2,689	8,398	13,994	0,810	5,79%
	1,290	0,000	0,320	6,618	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,762	2,689	8,378	13,959	0,860	6,16%
	1,290	0,000	0,331	6,637	0,170	0,213	0,284	0,036	0,063	4,745	2,679	8,380	13,910	0,750	5,39%

Fonte: Projeto BFT/MIG

Apêndice I – Resultados dos ensaios no grupo gerador convencional (Turbina Michell-Banki)

TABELA 34 – Ensaio do grupo gerador convencional – Leituras diretas

Ensaio grupo gerador convencional – Leitura direta												
z_1 [m]	a [m]	z_3 [m]	$P_1/\rho.g$ [m]	Q [m ³ /s]	D_1 [m]	A_1 [m ²]	v_1 [m/s]	H_i [m]	P_{HL} [kW]	P_{el} [kW]	η [%]	
0,620	0,100	0,000	22,900	0,100	0,251	0,050	2,015	23,827	23,308	7,180	30,81%	
0,620	0,100	0,000	22,800	0,128	0,251	0,050	2,573	23,858	29,803	9,460	31,74%	
0,620	0,100	0,000	22,300	0,146	0,251	0,050	2,937	23,461	33,460	12,160	36,34%	
0,620	0,100	0,000	22,000	0,172	0,251	0,050	3,469	23,335	39,307	15,700	39,94%	
0,620	0,100	0,000	21,500	0,183	0,251	0,050	3,685	22,914	40,996	19,720	48,10%	

Fonte: Projeto BFT/MIG

TABELA 35 – Ensaio do grupo gerador convencional – Dados aquisitados

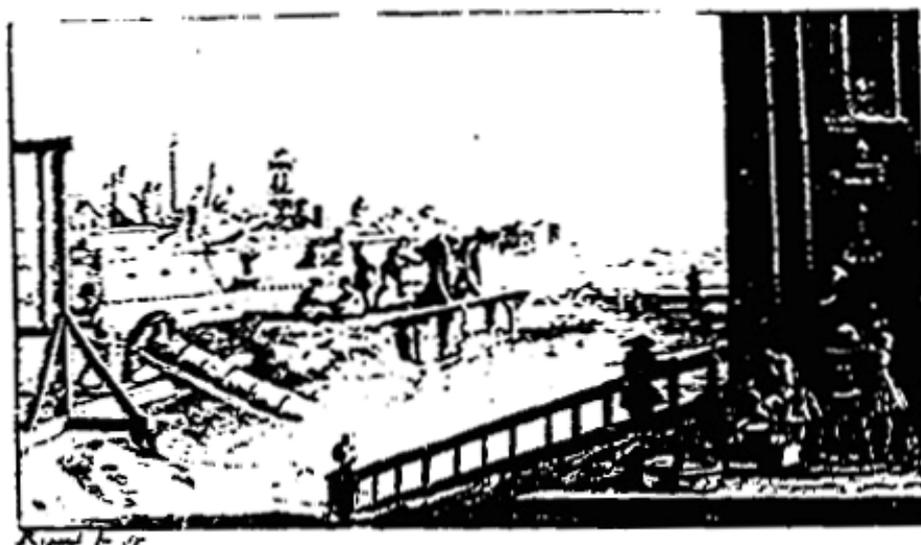
Ensaio grupo gerador convencional - Aquisitado												
z_1 [m]	a [m]	z_3 [m]	$P_1/\rho.g$ [m]	Q [m ³ /s]	D_1 [m]	A_1 [m ²]	v_1 [m/s]	H_i [m]	P_{HL} [kW]	P_{el} [kW]	η [%]	
0,620	0,000	0,000	22,300	0,103	0,251	0,050	2,069	23,139	23,245	7,056	30,35%	
0,620	0,000	0,000	22,100	0,130	0,251	0,050	2,613	23,069	29,268	9,422	32,19%	
0,620	0,000	0,000	21,900	0,147	0,251	0,050	2,959	22,968	33,004	12,147	36,80%	
0,620	0,000	0,000	21,500	0,174	0,251	0,050	3,499	22,746	38,648	15,681	40,57%	
0,620	0,000	0,000	21,000	0,185	0,251	0,050	3,725	22,329	40,386	19,738	48,87%	
0,620	0,000	0,000	21,600	0,062	0,251	0,050	1,239	22,298	13,414	2,532	18,88%	
0,620	0,000	0,000	21,400	0,099	0,251	0,050	1,992	22,223	21,499	5,910	27,49%	
0,620	0,000	0,000	21,100	0,129	0,251	0,050	2,605	22,067	27,910	8,053	28,85%	
0,620	0,000	0,000	20,900	0,150	0,251	0,050	3,024	21,987	32,283	11,603	35,94%	
0,620	0,000	0,000	20,800	0,163	0,251	0,050	3,284	21,971	35,032	13,327	38,04%	
0,620	0,000	0,000	20,800	0,157	0,251	0,050	3,167	21,933	33,726	13,496	40,02%	

0,620	0,000	0,000	20,700	0,171	0,251	0,050	3,435	21,923	36,564	16,063	43,93%
0,620	0,000	0,000	20,100	0,207	0,251	0,050	4,166	21,607	43,709	18,896	43,23%
0,620	0,000	0,000	19,900	0,211	0,251	0,050	4,241	21,439	44,145	23,318	52,82%

Fonte: Projeto BFT/MIG

ANEXOS

ANEXO A - Capa de “L'architecture Hydraulique” (1737)



ARCHITECTURE HYDRAULIQUE,

*Ou l'Art de conduire, d'élever & de ménager les Eaux
pour les différents besoins de la vie.*

LIVRE PREMIER

Servant d'Introduction.

CHAPITRE PREMIER

Contenant les Principes de la Méchanique.

1. **L**A Méchanique est une science qui considère le rapport qui se rencontre entre les *forces* ou *puissances* qui agissent pour mouvoir les corps, & les *vités* avec lesquelles ils seroient mûs, s'il ne se rencontroit point d'obstacle: ie tout considéré dans l'état d'*équilibre*, c'est-à-dire, dans l'état où se rencontrent deux ou plu-

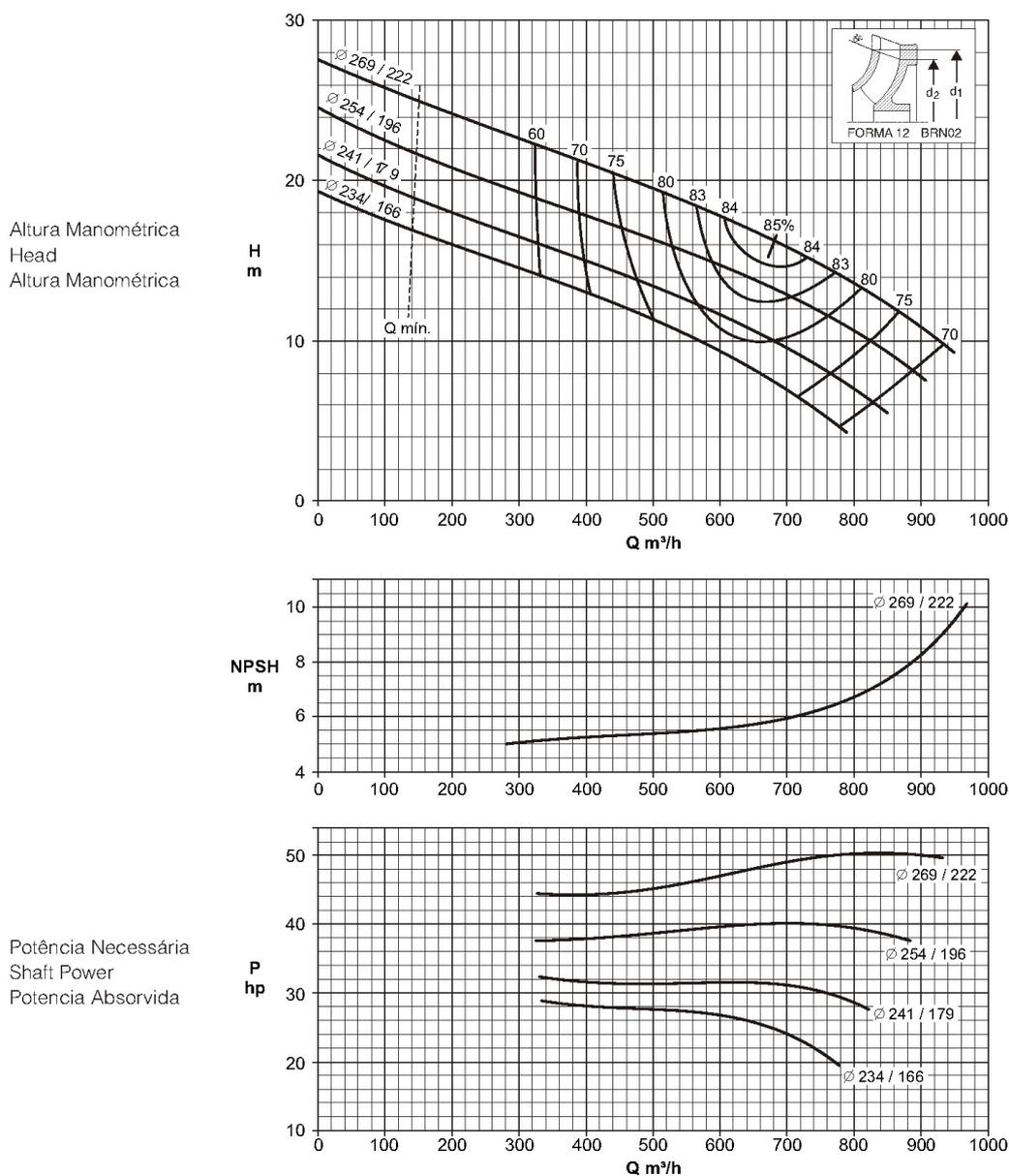
*Définitions,
axiomes & re-
marques préli-
minaires.*

Tome I.

A

ANEXO B – Curvas da bomba utilizada no Projeto BFT/MIG

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM	Tamanho Size Tamaño	200-250	60 hz	KSB
Oferta nº	Item nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	1750 rpm		
Project - No.	Item - No.				
Oferta - nº	Pos - nº				



Dados válidos para densidade de 1 kg/dm³ e viscosidade cinemática até 20 mm²/s.
Data applies to a density of 1 kg/dm³ and Kinematic viscosity up to 20 mm²/s.
Datos válidos para densidad 1 kg/dm³ y viscosidad cinemática hasta 20 mm²/s.

Tolerâncias de performance conforme Hydraulic Institute, opção B.
Tolerancias de las curvas características según Hydraulic Institute situación B.
Performance tolerance according to Hydraulic Institute level B.

FIGURA 123 - Curvas da bomba utilizada (fonte: KSB, 2006)

ANEXO C – Características do MIG utilizado

Motor trifásico IP55



APLICAÇÕES

O Motor Trifásico IP55 pode ser aplicado em bombas, ventiladores, exaustores, britadores, moinhos, talhas, compressores e outras aplicações que requeiram motores assíncronos de indução trifásicos. Pode ser utilizado, ainda, com inversores em tensões menores que 460V.

CARACTERÍSTICAS

- Grau de proteção: IP55
- Vedação dos mancais: V'Ring
- Carcaças: ferro fundido
- Dreno automático
- Potências: 0,16 a 500cv (carcaças 63 a 355M/L)
- Isolamento: classe "B" (carcaças 63 a 132M)
classe "F" (carcaças 160M a 355M/L)
- Fator de serviço: 1,15 (carcaças 63 a 200L)
1,00 (carcaças 225S/M a 355M/L)
- Rolamentos de esferas (com graxeira a partir da carcaça 225S/M)
- Rolamento dianteiro de rolos: carcaças 355M/L - 4, 6 e 8 pólos
- Categoria: N
- Tensões: 220/380V, 380/660V (carcaças 63 a 200L)
220/380/440V (carcaças 225S/M a 355 M/L)
- Cor: Azul RAL 5007

OPCIONAIS

- Frequência 50Hz
- Grau de proteção: IPW55, IP56 e IP65
- Isolamento: classe F (carcaças 63 a 132M)
classe H (carcaças 63 a 355M/L)
- Categoria H
- Outras tensões
- Resistência de aquecimento
- Graxeira nas carcaças 160M a 200L
- Prensa-cabos
- 2ª ponta de eixo
- Placa de bornes / duplo aterramento
- Labirinto taconite (carcaças 90 a 355M/L)
- Rolamentos de rolos na tampa dianteira a partir da carcaça 160M (4, 6 e 8 pólos)
- Termostatos, PT 100, termistores nos enrolamentos
- Eixo em aço inox
- Ventilador de alumínio
- Retentor
- PT 100 nos mancais
- Outros opcionais sob consulta

FIGURA 124 - Especificações do motor utilizado (fonte: WEG,2007)

ANEXO D – Características elétricas do MIG utilizado

Motor trifásico IP55



Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220V (A)	Corrente com rotor bloqueado I _b / I _n	Conjugado nominal C _n (kgfm)	Conjugado com rotor bloqueado C _p / C _n	Conjugado máximo C _{mk} / C _n	Rendimento η %			Fator de potência Cos φ			Fator de serviço F S	Momento de inércia J (kgm²)	Tempo máx. com rotor bloqueado (s) a quente	Nível médio de pressão sonora dB (A)	Peso aprox. (kg)
cv	KW								% da potência nominal										
								50	75	100	50	75	100						

2 Pólos - 60 Hz

0,16	0,12	63	3420	0,77	5,3	0,03	4,0	4,0	45,0	53,0	58,1	0,53	0,63	0,70	1,15	0,00010	21	56	6
0,25	0,18	63	3380	1,02	4,7	0,06	3,0	3,4	52,0	58,0	61,9	0,60	0,68	0,75	1,15	0,00012	16	56	6
0,33	0,25	63	3360	1,34	5,0	0,07	3,2	3,0	54,2	59,0	62,9	0,62	0,72	0,78	1,15	0,00014	12	56	7
0,5	0,37	63	3360	1,71	5,5	0,11	3,2	3,2	55,2	65,5	68,4	0,60	0,73	0,83	1,15	0,00019	9	56	7
0,75	0,55	71	3400	2,39	6,2	0,16	2,9	3,1	63,2	68,5	71,0	0,64	0,77	0,85	1,15	0,00037	8	60	10
1,0	0,75	71	3425	3,01	7,2	0,21	3,5	3,6	70,0	74,0	77,0	0,68	0,78	0,85	1,15	0,00052	8	60	11
1,5	1,1	80	3370	4,28	7,5	0,32	3,0	3,0	76,5	78,0	78,5	0,70	0,80	0,86	1,15	0,00079	8	62	14
2,0	1,5	80	3380	5,46	7,5	0,42	3,0	2,8	77,0	79,0	81,0	0,73	0,82	0,89	1,15	0,00096	7	62	15
3,0	2,2	90S	3465	8,43	7,8	0,62	3,0	3,0	78,5	80,0	81,5	0,66	0,77	0,84	1,15	0,00205	5	68	19
4,0	3,0	90L	3450	11,0	7,9	0,83	3,0	3,4	81,5	82,5	83,0	0,70	0,80	0,86	1,15	0,00266	4	68	22
5,0	3,7	100L	3485	12,9	8,0	1,03	2,6	2,8	81,0	84,8	85,6	0,75	0,83	0,88	1,15	0,00672	6	71	33
6,0	4,5	112M	3465	15,8	7,5	1,24	2,2	2,9	83,0	84,4	85,1	0,77	0,85	0,88	1,15	0,00727	10	69	39
7,5	5,5	112M	3500	19,1	8,0	1,53	2,6	3,4	84,0	86,2	86,7	0,72	0,80	0,87	1,15	0,00842	8	69	41
10	7,5	132S	3510	25,5	7,8	2,04	2,2	2,8	84,0	86,5	87,6	0,77	0,85	0,88	1,15	0,02243	12	72	63
12,5	9,2	132M	3520	31,2	7,8	2,54	2,4	3,0	85,8	87,5	88,0	0,77	0,84	0,88	1,15	0,02430	10	72	68
15	11	132M	3520	36,9	8,5	3,06	2,6	3,3	85,0	87,5	87,9	0,77	0,85	0,89	1,15	0,02804	5	72	73
20	15	160M	3540	50,3	7,8	4,06	2,3	3,0	86,4	88,6	89,0	0,75	0,84	0,88	1,15	0,04706	12	75	107
25	18,5	160M	3525	61,6	8,0	5,08	2,4	2,8	88,0	89,5	89,5	0,78	0,85	0,88	1,15	0,05295	12	75	114
30	22	160L	3530	72,1	8,5	6,08	2,5	3,0	90,2	91,0	91,0	0,78	0,85	0,88	1,15	0,06471	11	75	129
40	30	200M	3555	99,0	7,2	8,06	2,9	2,9	88,5	90,0	90,4	0,80	0,86	0,88	1,15	0,17042	15	81	215
50	37	200L	3555	120	7,5	10,1	3,0	2,9	90,0	91,5	92,2	0,81	0,86	0,88	1,15	0,20630	23	81	247
60	45	225S/M	3560	142	8,0	12,1	2,6	3,0	88,6	91,0	92,5	0,82	0,87	0,90	1,00	0,34083	21	85	360
75	55	225S/M	3560	173	8,0	15,1	2,5	2,7	90,0	92,0	92,8	0,85	0,89	0,90	1,00	0,44846	16	85	406
100	75	250S/M	3560	231	8,2	20,1	3,0	3,3	91,0	92,5	93,5	0,85	0,90	0,91	1,00	0,50227	13	85	453
125	90	280S/M	3575	296	8,0	25,0	2,5	3,0	90,0	92,0	93,7	0,80	0,86	0,88	1,00	1,27083	30	89	708
150	110	280S/M	3570	344	7,8	30,1	2,5	2,7	89,0	92,0	93,3	0,82	0,86	0,90	1,00	1,27083	34	89	709
175	132	315S/M	3570	409	7,9	35,1	2,5	2,6	91,5	93,1	94,0	0,83	0,88	0,90	1,00	1,41204	15	89	797
200	150	315S/M	3575	484	7,8	40,1	2,7	2,8	91,5	93,2	94,2	0,84	0,88	0,90	1,00	1,64738	17	89	867
250	185	315S/M	3575	572	8,5	50,1	2,8	3,0	92,0	93,7	94,3	0,82	0,88	0,90	1,00	2,11806	18	89	995
300	220	355M/L	3580	662	7,2	60,0	1,7	2,5	91,0	92,7	93,8	0,88	0,91	0,93	1,00	4,36666	70	96	1482
350	260	355M/L	3580	781	7,9	70,0	2,3	2,4	91,8	93,8	94,0	0,89	0,92	0,93	1,00	5,17105	60	96	1626

4 Pólos - 60 Hz

0,16	0,12	63	1720	0,89	4,5	0,07	3,2	3,4	45,0	52,0	57,0	0,46	0,55	0,62	1,15	0,00045	31	48	7
0,25	0,18	63	1710	1,14	4,5	0,10	2,8	3,0	53,0	60,0	64,0	0,47	0,57	0,65	1,15	0,00059	18	48	8
0,33	0,25	63	1710	1,44	4,5	0,14	2,9	2,9	59,0	64,0	67,0	0,48	0,59	0,68	1,15	0,00077	20	48	8
0,50	0,37	71	1720	2,07	5,0	0,21	2,7	3,0	56,0	64,0	68,0	0,48	0,59	0,69	1,15	0,00079	10	47	10
0,75	0,55	71	1705	2,90	5,5	0,31	3,0	3,2	62,0	69,0	71,0	0,49	0,60	0,70	1,15	0,00096	10	47	11
1,0	0,75	80	1720	3,02	7,2	0,42	2,5	2,9	72,0	77,5	79,5	0,62	0,74	0,82	1,15	0,00294	8	48	15
1,5	1,1	80	1720	4,43	7,8	0,62	2,9	3,2	72,0	77,0	79,5	0,60	0,73	0,82	1,15	0,00328	5	48	16
2,0	1,5	90S	1740	6,12	6,4	0,82	2,5	3,0	77,0	81,0	82,5	0,60	0,72	0,78	1,15	0,00560	7	51	21
3,0	2,2	90L	1725	8,70	6,8	1,25	2,6	2,8	79,0	82,0	83,0	0,64	0,75	0,80	1,15	0,00672	6	51	23
4,0	3,0	100L	1725	11,9	7,5	1,66	2,6	2,8	82,0	83,0	83,5	0,61	0,73	0,80	1,15	0,00918	7	54	31
5,0	3,7	100L	1715	14,0	7,6	2,09	2,9	3,1	82,5	84,3	85,5	0,63	0,75	0,81	1,15	0,00995	7	54	33
6,0	4,5	112M	1745	16,7	7,4	2,46	2,2	2,8	85,0	86,0	86,2	0,66	0,77	0,82	1,15	0,01741	11	58	44
7,5	5,5	112M	1740	20,0	7,0	3,09	2,2	2,8	86,6	87,5	88,0	0,63	0,74	0,82	1,15	0,01741	11	58	44
10	7,5	132S	1760	26,6	8,0	4,07	2,2	3,0	86,0	88,0	89,0	0,66	0,77	0,83	1,15	0,04652	5	61	62
12,5	9,2	132M	1755	33,3	8,7	5,10	2,5	2,9	86,3	87,8	88,5	0,62	0,73	0,82	1,15	0,05427	5	61	69
15	11	132M	1755	39,3	8,3	6,12	2,3	2,8	86,8	88,2	88,5	0,68	0,80	0,83	1,15	0,05815	5	61	72
20	15	160M	1760	52,6	6,3	8,14	2,3	2,2	88,0	89,3	90,2	0,69	0,79	0,83	1,15	0,09535	13	69	114
25	18,5	160L	1755	64,3	6,3	10,2	2,3	2,4	89,0	90,0	91,0	0,70	0,79	0,83	1,15	0,11542	15	69	128
30	22	180M	1765	75,5	7,5	12,2	2,8	2,8	89,3	90,0	91,0	0,70	0,80	0,84	1,15	0,16145	12	68	158
40	30	200M	1770	101	6,9	16,2	2,3	2,5	89,5	90,5	91,7	0,72	0,82	0,85	1,15	0,27579	19	71	216
50	37	200L	1770	122	6,9	20,2	2,3	2,3	90,2	91,5	92,4	0,75	0,83	0,86	1,15	0,33095	16	71	252
60	45	225S/M	1775	146	7,2	24,2	2,3	2,7	91,0	92,2	93,0	0,75	0,84	0,87	1,00	0,69867	20	75	363
75	55	225S/M	1775	176	7,4	30,3	2,2	2,7	90,3	92,0	93,0	0,76	0,84	0,88	1,00	0,80485	15	75	386
100	75	250S/M	1780	242	8,6	40,2	3,2	3,2	92,0	93,0	93,5	0,74	0,83	0,87	1,15	1,15478	12	75	486
125	90	280S/M	1780	293	7,3	50,3	2,2	2,5	91,5	92,9	93,8	0,75	0,83	0,86	1,00	1,92710	25	80	658
150	110	280S/M	1785	353	8,0	60,2	2,6	2,7	91,5	93,5	94,1	0,78	0,84	0,87	1,00	2,56947	20	80	753
175	132	315S/M	1785	433	7,5	70,2	2,5	2,5	91,0	93,0	94,1	0,79	0,83	0,85	1,00	2,81036	14	82	859
200	150	315S/M	1785	484	7,5	80,2	2,4	2,6	90,5	93,0	94,5	0,75	0,83	0,86	1,00	3,21164	19	82	924
250	185	315S/M	1785	597	8,3	100	2,8	2,8	91,0	93,0	94,5	0,76	0,84	0,86	1,00	3,77391	22	82	1010
300	220	355M/L	1790	691	7,0	120	2,2	2,3	93,0	94,5	95,0	0,79	0,85	0,88	1,00	6,33813	48	83	1428
350	260	355M/L	1790	815	7,9	140	2,3	2,4	92,9	94,6	95,1	0,77	0,85	0,88	1,00	7,45663	32	83	1544
400	300	355M/L	1790	939	6,6	160	2,1	2,1	93,3	94,7	95,3	0,81	0,86	0,88	1,00	9,32079	37	83	1723
450	330	355M/L	1790	1030	7,1	180	2,1	2,1	93,8	94,8	95,4	0,77	0,85	0,88	1,00	10,25267	39	83	1837
500	370	355M/L	1790	1160	6,6	200	2,1	2,2	93,9	95,0	95,4	0,79	0,85	0,88	1,00	11,19496	31	83	1923

FIGURA 125 - Características do motor utilizado, Modelo 4 pólos, 60 Hz, 45 kW

ANEXO E – Cotação do grupo BFT/MIG utilizado no projeto

Para:	UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ	De:	KSB BOMBAS HIDRÁULICAS S.A.
Fone:	(0xx35) 3629-1157	Fone:	(0XX31) 3273-1777
Fax:	(0xx35) 3622-0959	Fax:	(0XX31) 3273-6144
Nome:	Sr. Mateus Ricardo	Nome:	Francisco Júnior
Depto:	Comercial	Depto:	Comercial
Email:	Mathidr@yahoo.com.br	Email:	Ksbbh@ksb.com.br
Data:	27/04/06	No. Pág.	01
S/Referência:	Informação via e-mail 24/04/2006	Orçamento:	604CFH00342-rev1

Em resposta à sua solicitação, estamos enviando Preço(s) e Prazo(s), para as seguintes condições de fornecimento:

ITEM	QT.	DESCRIÇÃO	PREÇO UNIT.	PRAZO DIAS
01	01	<p>Conj. Motobomba KSB MEGANORM “ MEGA – EXTENSION ” 200-250, em ferro fundido, vedação gaxeta, composto de base metálica, Luva Normex, protetor de acoplamento, motor elétrico WEG, 60 cv, trifásico, 1750 rpm, 220/380/440/760 v, IP 55, Isol. B, 60 Hz.</p> <p>Dados Técnicos:</p> <p>Q = 745 m³/h; H = 15 mca; Fluido = Água Limpa</p> <p>Diâmetro do rotor = 240 mm (máximo)</p> <p>NPSH requerido pela bomba: 6,5 m.</p>	12.108,00	60

OBSERVAÇÃO:

- **CONJUNTO COMPLETO: R\$ 12.108,00**
- **BOMBA COM ACESSÓRIOS, SEM MOTOR: R\$ 7.820,00**
- **SOMENTE BOMBA: 5.908,00**
- **FAVOR ATENTAR-SE AO NPSH REQUERIDO PELA BOMBA E AO PONTO DE TRABALHO.**

Condições Comerciais:

- 1) Pagamento – 28 DDL.
- 2) Imposto: ICMS – incluso nos preços ofertados na alíquota atual de 12%, conforme legislação em vigor, para válvulas, bombas e/ou conjuntos moto-bombas com carga tributária de 8,8%.
- 3) IPI de 5% a incluir.
- 4) Frete: FOB - Posto Várzea Paulista / SP.
- 5) Validade dessa proposta: 30 dias.

Atenciosamente,

Francisco Júnior

Vendas Técnicas

KSB Bombas Hidráulicas S/A

S/A

31-3273-1777

Engº Gildo Almeida

Vendedor Técnico

KSB Bombas Hidráulicas

31-9974-7688

ANEXO F – Cotação de grupos geradores convencionais

 BETTA HIDROTURBINAS				
BETTA HIDROTURBINAS IND. COM. LTDA.				
RELAÇÃO TURBINAS HIDRÁULICAS				
QUEDA (metros)	VAZÃO m ³ /s	TURBINA HIDRÁULICA MOD. BETTA	POTÊNCIA SAÍDA GERADOR (Kva)	PREÇO DO CONJUNTO: Turbina; Regulador Velocidade; Gerador; Quadro Elétrico
5	400	3040	12,5	R\$ 25.600,00
	240	4045	20	R\$ 40.000,00
	800	4090	40	R\$ 74.550,00
7	200	2040	15	R\$ 19.600,00
	280	3040	20	R\$ 31.000,00
	500	4045	36	R\$ 51.700,00
	970	4090	50	R\$ 86.700,00
	1290	40120	65	R\$ 148.200,00
10	240	2040	25	R\$ 25.000,00
	360	3040	36	R\$ 45.200,00
	600	4045	60	R\$ 77.000,00
	1100	4090	100	R\$ 152.000,00
	1500	40120	120	R\$ 188.000,00
15	140	2020	20	R\$ 18.850,00
	280	2040	45	R\$ 34.800,00
	400	3040	60	R\$ 62.000,00
	600	4045	80	R\$ 95.500,00
	1000	4065	100	R\$ 124.550,00
	1900	40120	200	R\$ 220.000,00
20	80	1515	15	R\$ 17.500,00
	160	2020	30	R\$ 23.650,00
	320	2040	60	R\$ 40.400,00
	500	3040	100	R\$ 84.300,00
	1200	4065	170	R\$ 162.000,00
	2200	40120	320	R\$ 340.000,00
30	80	P600	25	R\$ 43.550,00
	200	2020	60	R\$ 38.800,00
	400	2040	120	R\$ 92.700,00
	600	3040	180	R\$ 109.650,00
	1000	4045	300	R\$ 212.600,00
40	80	P600	30	R\$ 48.400,00
	200	2020	80	R\$ 51.300,00
	400	2040	160	R\$ 109.650,00
	600	3040	240	R\$ 118.000,00
	1000	4045	330	R\$ 212.600,00

FIGURA 126 - Cotação de grupos geradores convencionais

ANEXO G – Cotação de motores de indução

MAR-13-2007 04:12 PM Faio_Marinato_Repr_Ltda 35 3714 6203

P.01

De = Fiação Maximoto
Bra = Unicidade

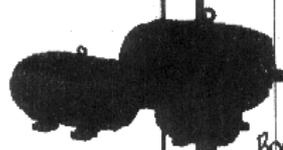
FPI: até 30V = 5%
acima 1,5U = 0%



A/c Mateus

(Motores Trifásicos Bimédula - IP 55)
220/380 e 380/660V - 60Hz

Standard
alta



0,18	01880	28021	83	245,23
0,25	01881	28022	85	248,89
0,33	01881	28023	85	249,27
0,5	01883	28196	83	283,03
0,75	01886	28195	71	277,12
1	02358	10242	71	280,14
1,5	01887	11675	80	363,41
2	02358	02116	80	368,53
3	01817	05343	909	486,23
4	01822	02116	90L	539,80
6	01844	01846	100L	580,34
6	02354	01791	112M	585,32
7,5	02386	00403	112M	585,82
10	00430	00487	132S	1.173,97
12,5	00343	00346	132M	1.327,61
15	00342	00326	150M	1.484,08
20	00420	00425	180M	2.165,82
25	00430	00345	180M	2.406,82
30	00499	00470	180L	2.610,72
40	00386	00384	200M	4.636,81
50	00373	00371	200L	4.898,78
60	-	00033	225S/M	7.748,28
75	-	00039	225S/M	8.838,44
100	-	00013	250S/M	10.258,22
125	-	00042	280S/M	14.335,17
150	-	00189	280S/M	16.856,39
175	-	32908	315S/M	19.929,90
200	-	24909	315S/M	21.859,06
250	-	01789	315S/M	30.810,00

Obs: Motores acima de 30cv para 220/380V, padrão em 4 Terminais

0,18	01879	40573	83	248,09
0,25	01878	18004	85	260,86
0,33	01877	18005	85	267,84
0,5	00642	08111	71	272,60
0,75	00667	00896	71	288,23
1	00696	00900	80	326,78
1,5	00927	00923	80	364,40
2	01827	00907	90	444,07
3	01820	00888	90	473,98
4	01832	00898	100	508,32
6	01837	01838	110	568,88
6	02384	02344	111	581,43
7,5	02386	02387	111	1.176,10
10	02286	00461	132	1.248,13
12,5	00406	00407	132	1.372,76
15	00408	00410	150	1.486,08
20	00547	00530	180	2.166,04
25	00430	00436	180	2.406,46
30	00370	00369	180	2.606,08
40	00388	00387	200	4.633,34
50	00379	00374	200	5.139,92
60	-	00034	225	7.748,28
75	-	00038	225	8.838,44
100	-	00049	250	10.258,22
125	-	00050	280	14.335,17
150	-	00051	280	16.856,39
175	-	00054	315	19.929,90
200	-	00056	315	21.859,06
250	-	00058	315	30.810,00

Obs: Motores acima de 60cv para 220/380V, padrão em 4 Terminais

0,18	01888	00530	83	267,59
0,25	00980	00331	71	285,23
0,33	00948	31283	71	336,62
0,5	01908	08110	80	346,05
0,75	01802	08983	80	389,17
1	01833	02790	90S	461,94
1,5	01816	02116	90M	489,99
2	01853	11247	100L	587,21
3	01843	02177	100L	654,32
4	08989	05403	112M	697,01
5	00463	00437	132S	1.160,20
6	00452	01111	132S	1.208,89
7,5	00436	00246	132M	1.401,20
10	00443	00444	150M	1.592,09
12,5	00381	00386	150M	2.187,33
15	00357	00384	150M	2.399,06
20	00420	00430	180L	2.807,38
25	00415	00367	180L	4.180,82
30	00378	00377	200L	4.835,03
40	00382	00381	200L	6.538,92
50	-	00007	225S/M	8.369,93
60	-	00018	250S/M	9.849,61
75	-	00019	250S/M	10.141,38
100	-	00046	280S/M	14.428,08
125	-	00121	280S/M	16.100,20
150	-	00063	315S/M	19.834,06
175	-	20981	315S/M	22.724,83
200	-	00189	315S/M	23.339,80
250	-	-	-	-

Obs: Motores acima de 30cv para 220/380V, padrão em 4 Terminais

0,18	00581	08930	83	258,00
0,25	01906	08034	85	292,03
0,33	01907	08075	85	319,82
0,5	01935	28085	80	358,28
0,75	01930	08036	80	385,72
1	01932	34778	90L	416,84
1,5	01850	35161	100L	495,05
2	00336	35344	100M	521,46
3	00461	35323	100L	570,61
4	00468	35135	100M	624,34
6	020901727	020912150	110	678,00
6	01290	08161	100M	2.232,90
7,5	00519	81282	100M	2.347,85
10	00433	00386	120L	2.474,67
12,5	00470	83192	120M	2.898,98
15	00410	09193	120L	3.084,01
20	00318	83016	150L	4.024,70
25	01382	01164	180L	4.863,93
30	-	80351	200S/M	7.851,11
40	-	80003	200S/M	8.532,28
50	-	03119	225S/M	9.878,89
60	-	03118	225S/M	10.386,40
75	-	11484	250S/M	14.846,48
100	-	03196	250S/M	16.832,80
125	-	10469	280S/M	20.302,43
150	-	00725	315S/M	23.844,06
175	-	-	-	-
200	-	-	-	-
250	-	-	-	-

Obs: Motores acima de 60cv para 220/380V, padrão em 4 Terminais

Atenciosamente

WEG MOTORES

(Super) - 13/03/07

LISTA DE PREÇOS
JUNHO/2006

FIGURA 127 - Cotação de motores de indução

ANEXO H – Especificações do medidor ultra-sônico de vazão

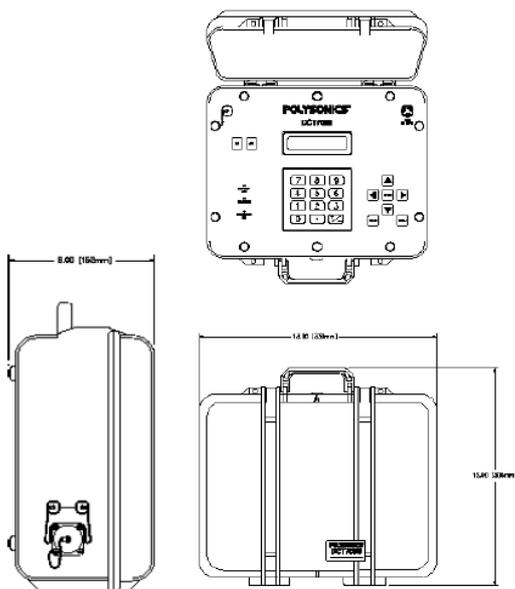
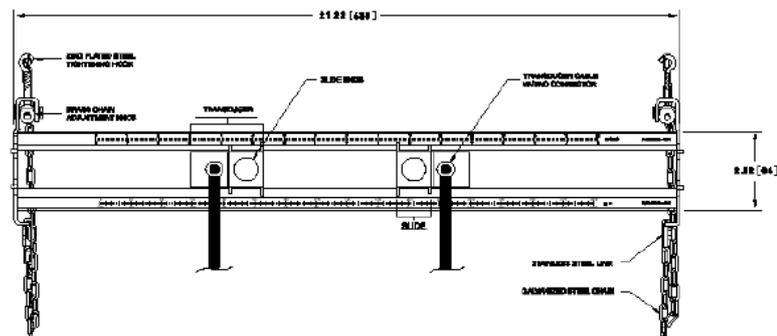
Polysonics DCT7088 Specifications

Performance Specifications

Flow Range:	± 0 to 40 ft/s (± 0 to 12 m/s)
Accuracy:	$\pm 1\%$ of velocity or ± 0.01 ft/sec (± 0.03 m/s)
Sensitivity:	0.01 ft/sec (0.003 m/s) at any flow rate including zero
Pipe Size:	1 in. to 200 in. (25mm to 5m)

Physical Specifications

Transmitter:	NEMA-6 (IP67), waterproof against accidental immersion and splashproof with lid open.
Transducers:	Encapsulated design. Standard cable length: 16 ft. (5m)
Weight:	Approximately 11 lbs. (4.9 kg) - 8 hr. battery Approximately 15 lbs. (6.8 kg) - 16 hr. battery opt.



Functional Specifications

Outputs:	4-20 mA (into 1K to 5K Ohms), isolated. RS232 serial interface.
Power Supply:	Built-in lead acid gel battery. 8 hours continuous operation - std. 16 hours continuous operation - opt. With AC adapter/battery charger 90-264 VAC, 50-60 Hz. - std.
Keypad:	19 key with tactile action.
Display:	40 character, 2 line alphanumeric, backlit LCD. Screens include: present and total flow, velocity, signal strength and delta T.
Data Logger:	Greater than 40,000 data points, time stamped. Programmable in one second intervals.
Temperature:	-40° to $+212^{\circ}$ F (-40° to $+100^{\circ}$ C):std transducers -5° to $+140^{\circ}$ F (-20° to $+60^{\circ}$ C): transmitter. For higher temperature, please consult factory.

FIGURA 128 - Especificações do medidor ultra-sônico de vazão (THERMO, 2007)

ANEXO I – Especificações do medidor de espessura de conduto forçado

ESPECIFICAÇÕES							
Escala de medição (Aço)	1.2mm – 225.0mm com transdutor 5 MHz						
Escala de medição para tubulações de aço	Mín. 3.0mm espessura x Ø 20mm						
Transdutor de frequência	Padrão 5 MHz, Ø 10mm						
Resolução do display	0.1mm						
Calibração	4.0mm placa baixa de aço integrada						
Precisão básica	± 1%						
Unidade de medição	Mm						
Escala de velocidade	1000 – 9999 m/s						
Display	4 dígitos LCD retro-iluminado						
Memória	Armazena 10 leituras de espessura						
Temperatura de superfície	-10 a +60°C						
Indicador de bateria	Indicação de bateria baixa						
Alimentação	2 x Pilhas 1.5V AA						
Tempo de operação	250 hs						
Peso	Aprox. 250 grs. Incluindo baterias						
Dimensões	126 x 68 x 23mm						
Velocidade de vários materiais							
Material	Alumínio	Ferro	Cobre	Bronze	Zinco	Prata	Latão
Ouro							
Velocidade (m/s)	6320	5900	4700	4430	4170	3600	3320
3240							
Acessórios Incluídos:							
Transdutor padrão 5 MHz							
Base de aço integrada 4.0mm							
Manual de operação							
Cat. Nº	Modelo	Marca	Descrição				
H138-003	TT-100	Time	Medidor de espessura digital				

FIGURA 129 - Especificações do medidor de espessura de conduto (HOMIS, 2007)