

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

SISTEMÁTICA PARA IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO
DE MICROUSINAS HIDROELÉTRICAS NO INTERIOR
DO RIO GRANDE DO SUL

por

Ademar Michels

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

1991

SISTEMATICA PARA IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO
DE MICROUSINAS HIDROELÉTRICAS NO INTERIOR
DO RIO GRANDE DO SUL

por

Ademar Michels
Engenheiro Mecânico

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Pequenas Centrais Hidroelétricas

Aprovada por:

Prof. Dr. Anildo Bristoti (Orientador)

Prof. Dr. Felix Alberto Farret (Co-Orientador)

Prof. Dr. Edgar Pereira

Prof. Dr. Mario Baibich

Prof. Dr. Sergio Möller
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 19 de setembro de 1991.

AGRADECIMENTOS

Com a colaboração de muitas pessoas, foi possível chegar a este estágio do trabalho que por sua abrangência é o começo de um processo de eletrificação rural através da construção de microcentrais hidroelétricas (μ CH's), e que possam atender a uma parte das comunidades rurais que foram abandonadas à sua própria sorte no interior do Rio Grande do Sul.

Esta proposta foi idealizada pelo Dr. Anildo Bristotti a quem devo tanta paciência e dedicação - cuja competência e didática nas aulas em vão tentei imitar desde o tempo em que tive a honra de ser seu aluno - minha admiração e gratidão.

Em particular agradeço ao Dr. Felix Alberto Farret pelo seu apoio tanto a nível pessoal como profissional.

Também não poderia deixar de agradecer a colaboração do Sr. Antônio Aldovi Bristotti, com seus conhecimentos práticos, sem os quais não seria possível a realização do presente trabalho.

Ao Prof. Paulo Antônio Corsetti do PROMEC, já falecido cuja vida dedicada ao ensino revelou que é possível conciliar

o elevado saber e a competência com a valiosa modéstia - a saudade permanece, mas a certeza de que está feliz.

À direção da Escola Estadual Monteiro Lobato - Colégio Técnico de Taquara, que abriu as portas da escola para a fase importante da pesquisa, dando apoio de pessoal técnico e docente e equipamentos.

Ao Engenheiro Jorge Omar Bueno, por suas contribuições através de sua tese de mestrado e de seu apoio pessoal.

Às empresas Turbinas WIRZ S.A. e Metalúrgica Abramo EBERLE S.A. pela doação de equipamentos, sem os quais seria impossível concluir o nosso trabalho.

Quero lembrar que nada disto seria possível sem o apoio financeiro do CENERGS e da CAPES.

Finalmente agradeço ao Técnico Marcelo Aita Riss pela paciência e dedicação na edição de textos e sua valiosa cooperação técnica.

Um agradecimento especial e carinhoso à minha esposa e meus filhos, cuja paciência, compreensão e incentivo mantiveram o entusiasmo necessário ao cumprimento do objetivo planejado.

Se alguma coisa houver de aproveitável e útil nessa dissertação, que reverta tão somente para o bem e a glória da humanidade.

INDICE

RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xv
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Estabelecimento do Problema	1
1.2 - Importância das Microcentrais para a Região	7
1.3 - Objetivos	10
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3 - ESTUDOS PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA MICROCENTRAL	17
3.1 - Localização	17
3.1.1 - Trabalhos Iniciais	17
3.1.2 - Coleta de Dados	18

3.1.3 - Análise dos Dados Coletados	19
3.1.4 - Identificação dos Locais Aproveitáveis ..	20
3.1.5 - Reconhecimento	21
3.2 - Estudos Sócio-Econômicos	22
3.2.1 - Levantamento Sócio-Econômico das Populações Afetadas	24
3.3 - Seleção da Turbina	26
3.3.1 - Turbina Pelton	28
3.3.2 - Turbina Francis	33
3.3.3 - Turbina de Impulsão Radial (MICHEL-BANKI)	35
4 - CONSTRUÇÃO DA CENTRAL - UNIDADE I	42
4.1 - Barragem	43
4.2 - Captação	45
4.3 - Conduto de Água	47
4.3.1 - Projeto Geral e Sistema de Apoio	47
4.3.2 - Material Usado para o Conduto Forçado ...	47
4.4 - Dimensionamento Hidráulico	50
4.4.1 - Seleção do Diâmetro Adequado	50
4.4.2 - Queda Líquida e Perdas de Carga	52

5 - CONSTRUÇÃO DA CENTRAL - UNIDADE II	56
5.1 - Condutos de Água	58
5.2 - Captação	60
5.3 - Dimensionamento Hidráulico	60
5.3.1 - Seleção do Diâmetro Adequado	60
5.3.2 - Queda Líquida e Perdas de Carga	62
6 - CONCLUSÕES	68
6.1 - Principais Conclusões	68
6.2 - Continuação do Trabalho	70
BIBLIOGRAFIA	73
ANEXO I PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS	77

**SISTEMÁTICA PARA IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO
DE MICROUSINAS HIDRELÉTRICAS NO INTERIOR
DO RIO GRANDE DO SUL**

Autor: Ademar Michels

Orientador: Anildo Bristotti

Co-Orientador: Felix Alberto Farret

RESUMO

Trata-se de um estudo da sistemática para implantação e avaliação do funcionamento de μ CH's no Estado do Rio Grande do Sul. Este trabalho descreve as instalações de duas μ CH's de baixa vazão, de 10 kW e 3 kW, com quedas brutas e vazões respectivamente de 9 m e 150 l/s e 65 m e 8,21 l/s. As duas unidades estão localizadas no município de Três Coroas, Distrito de Rodeio Bonito.

Inicialmente é apresentado um estudo para a implantação de uma microcentral, envolvendo localização, estudos sócio-econômicos e seleção das turbinas mais adequadas. Em seguida é abordada uma descrição da instalação das duas unidades, envolvendo construção da barragem, captação da água, condutos forçados e dimensionamento hidráulico. Buscou-se as soluções mais econômicas possíveis para os diversos componentes das instalações, visando a participação

da comunidade na construção e manutenção das mesmas.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica

Porto Alegre, 19 de setembro de 1991.

**IMPLEMENTATION AND EVALUATION SYSTEM
FOR OPERATING THE MICRO-POWERPLANTS IN RIO GRANDE DO SUL**

Autor: Ademar Michels

Orientador: Anildo Bristotti

Co-Orientador: Felix Alberto Farret

ABSTRACT

This study deals with an implementation and evaluation system for operating the micro-powerplants in Rio Grande do Sul. The pilot installation of two low flow micro-powerplants, of 10.0 kW and 3.0 kW, are described using a gross fall and flow of, respectively, a) 9m and 150 l/s and b) 65 m and 8,21 l/s. The units were built in Tres Coroas, Rodelo Bonito's district, RS.

Initially, a study about the implementation of micro-powerplants is presented coping with points such as: site location, socio-economical studies and selection of the most suitable turbines. Next, a full description of the installation of the two units dealing with dam construction, water capture, forced tubes and hydro-mechanical balance calculation.

The most suitable and inexpensive solutions are

suggested aiming the participation of the local community in the construction and maintenance of the micro-powerplant.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Msc Dissertation in Mechanical Engineering

Porto Alegre, September 19TH, 1991.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Relação Entre Superfície do Lago e Potência Instalada	7
Tabela 5.1 - Coeficiente de perda de carga em curvas [3] ..	64
Tabela 5.2 - Determinação do parâmetro K da equação 4.7, para o cálculo das perdas de carga por atrito	65

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 Potência Hidroelétrica do Brasil por Regiões, em kW	4
Fig. 1.2 Potência Hidroelétrica do Brasil, em kW	5
Fig. 3.1 Campos de Aplicação para Cada Tipo de Turbina	27
Fig. 3.2 Corte do Conjunto de uma Turbina Pelton	30
Fig. 3.3 Bico Injetor e Diâmetro do Jato	30
Fig. 3.4 Curvas de Rendimento dos Diversos Tipos de Turbinas para μ CH's	32
Fig. 3.5 Dimensões da Espiral de uma Turbina Francis	36
Fig. 3.6 Estimativa Global das Dimensões de uma Turbina Francis	37
Fig. 3.7 Turbina de Impulsão Radial (MICHEL-BANKI) com Entrada Vertical	39
Fig. 3.8 Curvas de Rendimento de Acordo com as Diferentes Vazões com Uso de Uma ou Ambas as Células	40
Fig. 4.1 Vistas Frontal e Superior da Barragem da Unidade I	44
Fig. 4.2 Tomada de Água e Comporta	46
Fig. 4.3 Diagrama Esquemático da Microusina - Unidade I ...	48
Fig. 4.4 Apoios do Conduto Forçado	49
Fig. 5.1 Diagrama Esquemático da Microusina - Unidade II ..	59

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

DNAEE	- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
CEEE	- Companhia Estadual de Energia Elétrica
GER	- Cooperativas de Eletrificação Rural
μ GH	- microcentral hidroelétrica
N_T	- potência no eixo da turbina
η_T	- rendimento da turbina
H	- altura da queda
Q	- vazão de projeto
γ_ω	- peso específico
D	- diâmetro da coroa de pás
n_e	- velocidade de rotação específica
d	- diâmetro do jato da turbina Pelton
Z	- número de injetores
$D_{\text{ótimo}}$	- diâmetro ótimo
η	- rendimento
n	- número de revoluções
N	- potência
d_e	- diâmetro econômico
V	- velocidade da água
H_r	- queda bruta
$\Sigma \Delta h$	- soma das perdas de carga individuais
h_r	- perda de carga nas grades
ζ_r	- coeficiente de perda nas grades

β	- coeficiente de forma nas barras
α	- ângulo de inclinação das barras
d_r	- espessura da barra
e	- espaço entre barras da grade
h_E	- perda de carga na entrada
ξ_E	- coeficiente de perda de carga na entrada do duto
h_A	- perda de carga por atrito no tubo
λ	- coeficiente de perda de carga por atrito
L	- comprimento da tubulação
D_i	- diâmetro interno
h_c	- perda de carga em curvas
ξ_c	- coeficiente de perda de carga
K	- parâmetro para determinação de carga por atrito

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Estabelecimento do Problema

É do conhecimento de todos que em países com uma economia estável e racional, a um determinado crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) corresponde um crescimento em percentuais idênticos de produção e consumo de energia elétrica.

O setor elétrico nacional experimentou nas décadas de 70 e 80, com a implantação e o funcionamento de grandes hidroelétricas, tais como ITAIPU e TUCURUÍ, um crescimento verdadeiramente espantoso e de valores superiores ao PIB. Esse crescimento foi financiado por capital estrangeiro, cujo ônus em serviço da dívida e juros está restringindo a autonomia política brasileira, tanto no aspecto social como econômico.

Como o Brasil está situado entre as 12 maiores economias

do mundo (em PIB) as dificuldades de vinda de novos recursos externos a juros acessíveis, torna mais difícil o atendimento às necessidades presentes e futuras na área de geração de energia elétrica.

Os investimentos mínimos para o ritmo de crescimento necessário à nação brasileira para que esta possa algum dia fazer parte dos países do primeiro mundo, são da ordem de 5 bilhões de dólares anuais [14]. A situação defronta-se com a conjugação de duas agravâncias que se apresentam: a falta de recursos externos e a falta de eficiência na utilização dos recursos existentes.

Nos dois aspectos apresentados, apenas o segundo pode-se controlar, pois copiou-se o péssimo exemplo esbanjador de energia dos americanos. Por outro lado, ao analisar-se o desenvolvimento do Japão, pode-se observar que de 1973 para cá, este país teve o seu PIB dobrado enquanto manteve os mesmos níveis de consumo de energia elétrica.

Em razão da falta de recursos para a implantação de grandes centrais hidroelétricas, e também dos grandes custos financeiros e sociais que acarreta a sua execução, tais como inundação de grandes áreas produtivas, os técnicos do setor elétrico vem alertando os governos para a falta de energia elétrica nos próximos anos.

Outro fato que chama a atenção, é que para o atendimento da demanda de energia elétrica (mantendo-se a característica atual de geração de eletricidade predominantemente de fontes hídricas), o potencial hídrico disponível nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste, para a construção de grandes hidroelétricas, estará praticamente esgotado até o ano 2000 (Fig. 1.1 e Fig. 1.2), restando apenas os grandes aproveitamentos na região amazônica. Mas esta, por ser plana, não tem vocação hidráulica. A construção de novos complexos hidroelétricos de grande porte nessa região, com a inundação de grandes áreas, deverá gerar uma controvérsia na sociedade nacional e internacional, pelas conseqüências negativas que poderão trazer ao ecossistema local, conseqüências estas que já, mesmo hoje, se fazem sentir através da represa de Balbina.

A área de 2360 km² do lago de Balbina, um dos maiores do mundo, com profundidade média de apenas 6 m, cobre 33 milhões de metros cúbicos de madeira das árvores, muitas delas com mais de 40 metros de altura.

O baixo aproveitamento energético de Balbina (250 MW) resulta em alta relação entre a superfície do lago e a potência instalada de 920 hectares por megawatt instalado. Tucuruí (2200 km² para 3900 MW, na primeira fase) apresenta relação de 56 ha/MW, enquanto Itaipu (1300 km² para 12000 MW) apresenta a razão de 11 ha/MW.

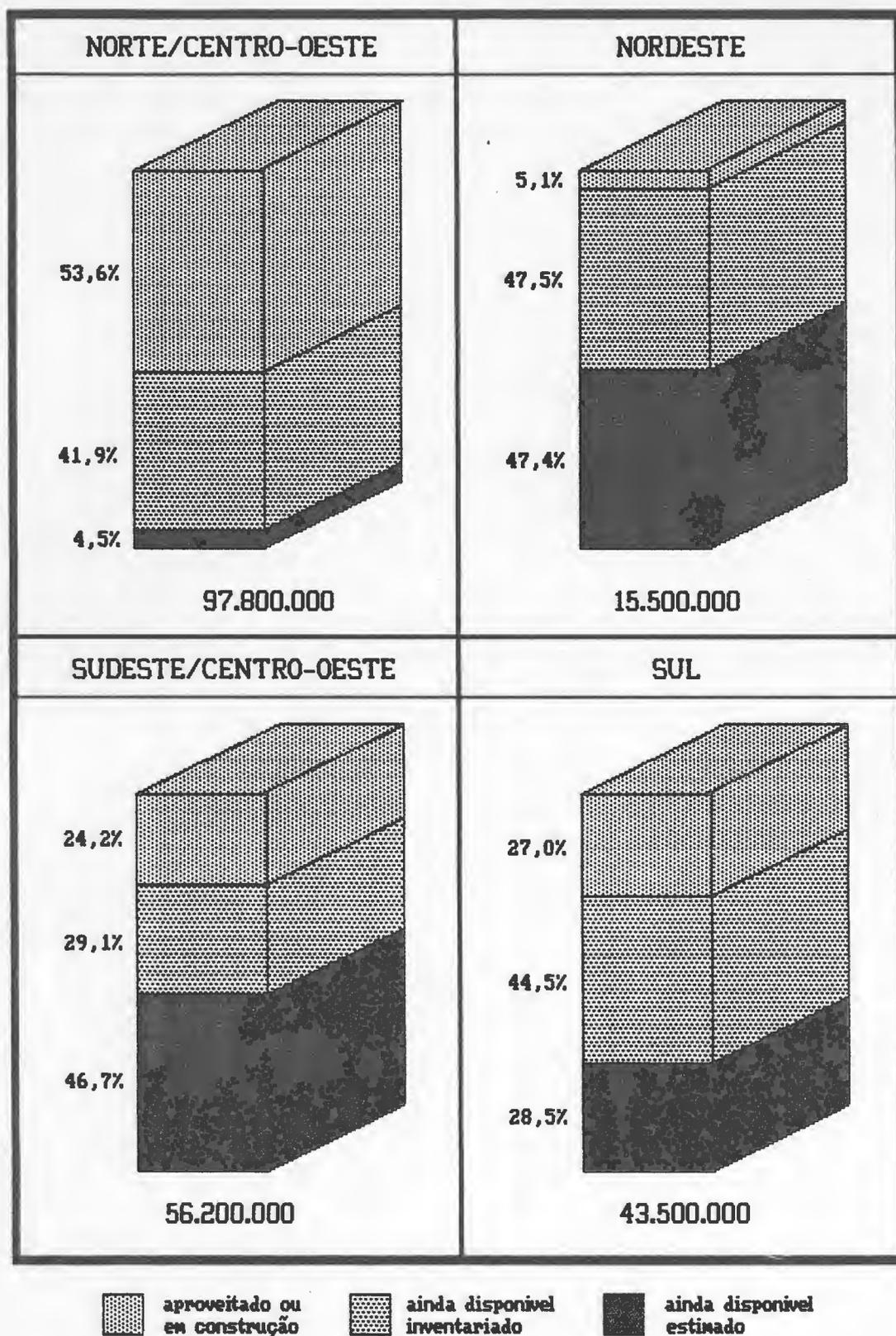


Fig. 1.1 - Potência Hidroelétrica do Brasil por regiões, em kW [17]

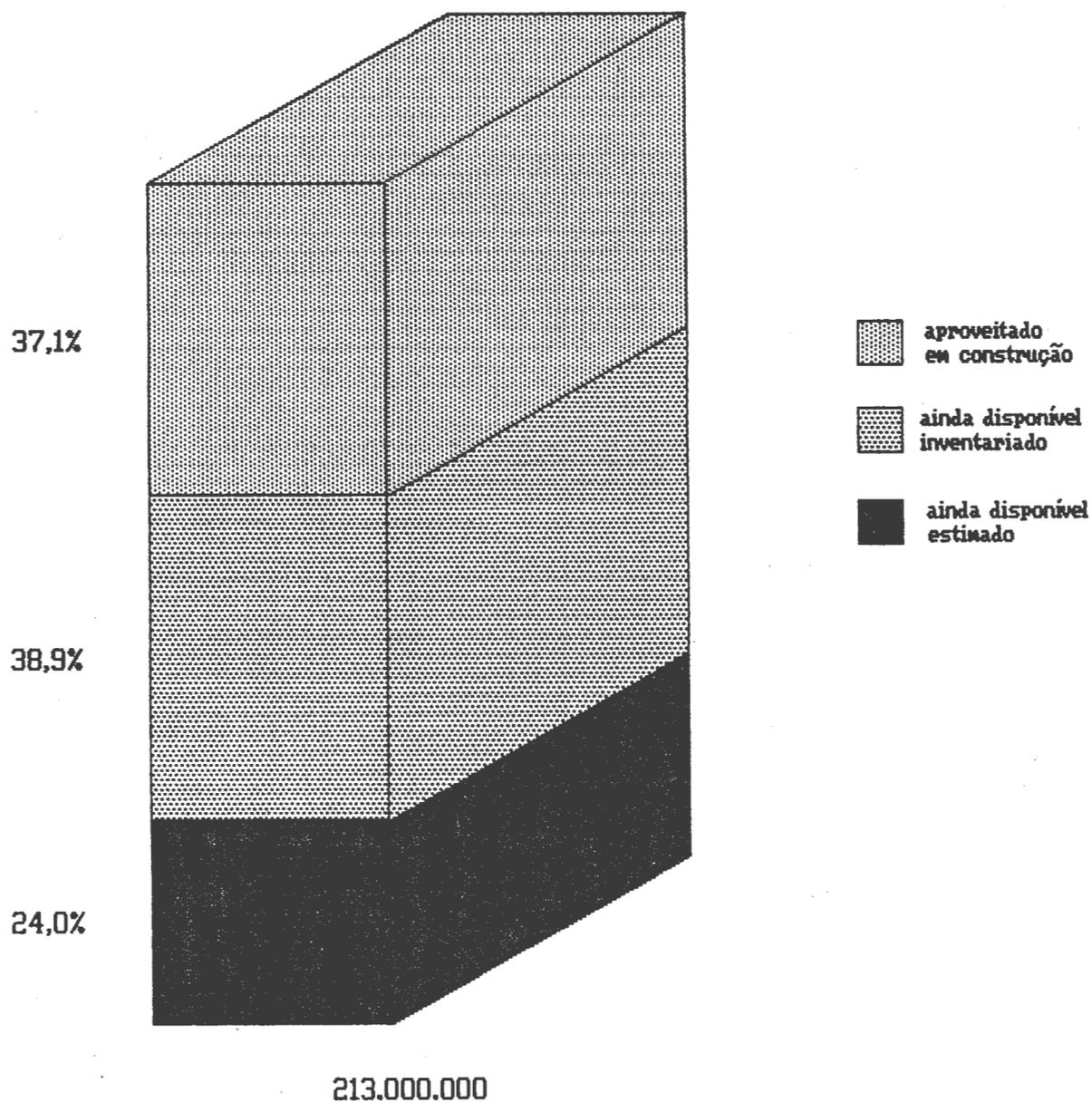


Fig. 1.2 - Potência Hidroelétrica do Brasil, em kW [17]

As inundações citadas, além dos problemas sociais que geram pelo deslocamento de nativos e colonos, destroem grande parte da vegetação, que entrará em decomposição, tornando anaeróbico o ambiente. A falta de oxigênio e a produção de bio-gases não só prejudicam a fauna, como também trazem danos à própria usina, através da ação corrosiva do gás sulfídrico nas peças metálicas do grupo turbina-gerador.

Do ponto de vista econômico, devido às dimensões da barragem e ao baixo aproveitamento hidroelétrico, Balbina também deixa de ser um bom exemplo, porque o custo do quilowatt instalado, da ordem de três mil dólares, é bem superior ao custo médio de outras hidroelétricas.

A próxima grande obra prevista para a amazônia é o complexo hidráulico de Altamira, no Xingu (Pará), composto de duas usinas e três barragens, que inundará 7200 km² e, quando terminado, gerará 17000 MW (uma vez e meia Itaipu na potência instalada, mas 5,5 vezes em área inundada - Tabela 1.1).

Para minimizar a mencionada gradativa ocupação da amazônia por grandes reservatórios de água, o país deverá decidir-se por diversificação mais ampla de suas fontes de geração de energia elétrica, principalmente intensificando o uso de combustíveis alternativos como o carvão mineral, gás natural, óxido de urânio e o aproveitamento das pequenas

Hidroelétrica	Superfície do Lago/Potência Instalada
Balbina	920 ha/MW
Tucuruí	56 ha/MW
Altamira	42 ha/MW
Itaipu	11 ha/MW

Tabela 1.1 - Relação entre Superfície do Lago e Potência Instalada

quedas d'água.

1.2 - Importância das Microcentrais para a Região

Certamente a década de 90 caracterizar-se-á pela busca e desenvolvimento de novas fontes alternativas. As empresas privadas e os órgãos estatais serão responsáveis diretamente por este desenvolvimento. E pensando nisto, algumas delas já começam a interessar-se por fazer acordos de cooperação buscando um intercâmbio de tecnologia com países desenvolvidos.

É o caso do governo da Bahia e a CEE (Comunidade Econômica Européia) [19] que assinaram em março de 1990, um

programa de cooperação no setor de energia. Pelo acordo, o Brasil receberá 4,5 milhões de dólares a fundo perdido, durante 5 anos, visando principalmente a autoprodução a partir de pequenas centrais hidroelétricas.

Também a Chesf investe em energia alternativa. Cerca de 2,5 milhões de dólares serão investidos em um projeto para implantar uma usina de energia solar até o final de 1990 na região do Recife. Tal investimento produzirá uma potência de 100kW, e será custeado com recursos da Eletrobrás. [19]

Em especial, no RS, podemos fazer o seguinte balanço:

1) Até março de 1989 a geração bruta de energia elétrica foi de 5.445 GWh e o consumo no mesmo período foi de 10.825 GWh, o que representou um déficit de geração de 5.380 GWh. Este déficit de geração é suprido pela interligação com sistemas de outras regiões. Constata-se então que a dependência de outros sistemas foi de 49,49% representando um valor considerável tendo em vista a alta potencialidade dos rios do Rio Grande do Sul.

2) A eletrificação rural apresenta o seguinte diagnóstico:

Número de propriedades rurais existentes	474.280
Número de propriedades eletrif. pela CEEE	185.625
Número de propriedades eletrif. pelas CER's	123.547
Número total de propriedades eletrificadas	309.172
Número total de propriedades não eletrificadas	165.108
Participação da CEEE no tot. de prop. eletrif.	60%
Participação das CER's no total de prop. elet.	40%
Índice de eletrificação rural no RS	65%

3) A Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) vem enfrentando como pode, o fardo de um insuportável grau de endividamento, precisamente quando as projeções da área de planejamento da Eletrobrás indicam riscos de déficit na oferta de energia elétrica, na primeira metade dos anos 90, com tendência hoje crescentes e aceleradas, ultrapassando a faixa dos 15%.

Essa incapacidade de investir ocorre exatamente quando os investimentos são urgentes.

Após feito este balanço pode-se verificar que:

1) A autoprodução ligada ou não a rede pública através de microcentrais, aproveitando recursos energéticos renováveis, pode ser uma alternativa extremamente vantajosa, visto que reduziria a dependência do sistema interligado.

2) Constatado que 65% das propriedades no RS estão eletrificadas torna-se viável o estudo do aproveitamento dos recursos energéticos nela existentes a partir do que o trabalho propõe.

3) A partir do momento em que houvesse um aproveitamento destes recursos, a Concessionária seria beneficiada, visto que haveria uma "folga" no sistema e, em consequência, redução de seus investimentos. Com isto os 35% restantes de propriedades rurais não eletrificadas poderiam ser energizadas.

1.3 - Objetivos

O objetivo do presente trabalho, em função das razões acima apresentadas, visa desenvolver uma sistemática para o aproveitamento das pequenas quedas de água do RS para a instalação de microcentrais elétricas em comunidades rurais ainda não beneficiadas com energia elétrica.

O objetivo é justificado pelo fato de uma Microcentral Hidroelétrica ser um vetor de desenvolvimento rural. Ela não gera somente energia, mas também um outro benefício que é o conforto e a comodidade para as populações rurais que desta

forma não abandonarão o campo. Isto diminuirá a crescente pressão social nos grandes centros além de direcionar esta mesma população, para a produção de alimentos, já hoje tão escassos no país.

Levar energia até estas populações por meio de linhas de transmissão é oneroso, quando não praticamente impossível. O mais racional em grande parte dos casos é a instalação de pequenos grupos geradores para o atendimento de microregiões. Ora, desde que se tenha à disposição pequenas quedas d'água, porque não instalar-se grupos geradores acionados pela força hidráulica, visto que esta fonte de energia é praticamente gratuita e que a vida útil da Microcentral Hidroelétrica é em torno de 30 anos.

Além dos benefícios gerados com este tipo de central, há ainda a economia de combustíveis que são queimados pelos grupos geradores tradicionais, e também a possibilidade de utilização de máquinas de produção e beneficiamento, que proporcionam o surgimento de pequenas agroindústrias, que crescendo iniciam o processo de desenvolvimento da região.

Para demonstrar a sistemática proposta nesse trabalho foram construídas duas μ CH's nas nascentes dos riachos que serão ligadas à rede, servirão para o treinamento de pessoal e a difusão de tecnologia.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1985, a ELETROBRAS e o DNAE, colocaram à disposição dos interessados o Manual de Microcentrais Hidroelétricas [2] que tem como objetivos a ampla divulgação da tecnologia de baixo custo para microcentrais com potências inferiores a 100kW. O manual foi elaborado para que seus usuários, quer engenheiros ou técnicos de nível médio, não especializados em hidroeletricidade, não encontrem dificuldades de entendimento e aplicação tornando desnecessário a mobilização de grandes empresas de consultoria, grandes empreiteiros e grandes fabricantes. Para facilitar o entendimento e aplicação do manual, foram colocados exemplos junto aos itens abordados e, ao final, é apresentado um exemplo completo de projeto de uma microcentral com potência instalada de 10kW, que se situa na faixa de maior utilização no meio rural brasileiro.

O manual é autosuficiente para os estudos, projetos e construções de microcentrais hidroelétricas, não sendo

necessário ao usuário recorrer a outras fontes de informação.

Com a finalidade de facilitar os cálculos para o dimensionamento das estruturas cujas dimensões não foram tabeladas, como no caso dos cálculos hidráulicos, algumas fórmulas clássicas foram simplificadas, sem como isso incorrer em erros significativos nos resultados encontrados para a potência. Isto acontece porque as faixas de potência das unidades geradoras fabricadas atualmente no Brasil pelos pequenos fabricantes não exigem uma precisão rigorosa no dimensionamento encontrado nos cálculos teóricos.

Macintyre, Archibald Joseph em 1983 lançou pela Editora Guanabara Dois S.A., o livro Máquinas Motrizes Hidráulicas [8], no qual, após uma revisão de noções de hidrodinâmica necessárias à compreensão do assunto, apresenta uma classificação das turbinas e indica modalidades de instalação, acompanhadas do estudo de quedas, potências e rendimentos. Apresenta a teoria elementar dos rotores das turbinas de reação e em seguida a análise de interdependência entre as grandezas que caracterizam o funcionamento das turbinas, acompanhados do traçado e do emprego das curvas características. Mostra como escolhe-se modernamente o tipo de turbina mais adequado a condições pré-estabelecidas. Em seguida, é feito separadamente o estudo das turbinas Francis, Pelton, Propeller, Kaplan, Bulbo, Tubular e Straffo. O livro

ainda dedica capítulos individualizados às usinas hidroelétricas de acumulação, às usinas maré-motrizes e às usinas de pequeno porte, objeto do presente estudo.

Também merecem destaque as turbinas de recuperação de potência, aplicação industrial moderna de pequenas turbinas. Embora sem a importância das turbinas, as "rodas d'água" são apresentadas em razão das aplicações interessantes que podem ter, se bem que de modesto alcance.

Os acessórios das usinas hidroelétricas, tais como comportas, válvulas e tubulações, são apresentados por serem fundamentais para o projeto e a análise de comportamento das unidades geradoras.

Recorda-se em um capítulo a determinação das perdas de carga e em outro é apresentado um estudo sucinto do golpe de aríete em tubulações de usinas hidroelétricas. O estudo das turbinas, tanto em modelo reduzido quanto dos instalados, segue o que determinam as normas brasileiras da ABNT.

O trabalho escrito por Souza-Fuchs-Santos [1] em 1983, se propõe a colocar à disposição dos técnicos que atuam na área de geração de energia elétrica, uma obra que fornece os fundamentos das centrais hidro e termoelétricas, complexos que permitem fazer a citada geração. Os autores procuram, em

quatro capítulos, sintetizar formulações e esclarecer conceitos de modo que os interessados tenham uma visão ampla do assunto.

Assim, no capítulo 1, os conceitos modernos de centrais convencionais, máquinas de fluxo e a pistão juntamente com as equações que permitem relacionar as energias em jogo, colocam o leitor a par das pretensões dos autores. Ainda neste capítulo, um estudo sucinto das centrais hidro e termoelétricas é feito, descrevendo seus componentes. No capítulo 2, a hidrologia é abordada visando os aproveitamentos hidroelétricos. O capítulo 3 trata as turbinas hidráulicas sob o aspecto de seus componentes e o dimensionamento preliminar rápido e seguro. Os reguladores de velocidade, bem como sua função nas centrais de um modo geral, são abordados no capítulo 4.

Em 1986, é lançado o livro NRECA, Micro-Hydropower Sourcebook, "A Practical Guide to Design and Implementation in Developing Countries", [18] SDH Publication, USA, no qual são abordados vários assuntos de interesse para quem atua na área de projeto e construção de Microcentrais em países em desenvolvimento. São apresentados métodos empíricos na determinação de vazão e da altura máxima de queda, grandezas fundamentais na determinação de potência no projeto de uma microcentral. Também são sugeridos um layout básico e a

relação do local mais apropriado para a construção da μ CH. Tipos de obras civis necessárias são amplamente discutidas na obra e que podem servir de inspiração para o iniciante. É desenvolvida uma teoria básica sobre turbinas e, em seguida, apresenta métodos para a seleção de turbina para cada situação. É dedicado um capítulo individualizado sobre a geração e todos os aspectos elétricos. Para concluir são apresentados exemplos de microcentrais instaladas em países africanos em desenvolvimento, todas elas com potências inferiores a 100 kW.

Potess, E. Santos, em 1971 [20], lança pela Editora Gustavo Gili S.A. o livro Controles Elétricos, no qual aborda as diversas tarefas que compete ao engenheiro desempenhar para o estudo, projeto e construção de uma central elétrica, seja hidráulica ou térmica. Pelo fato de ter reunido em um só livro toda uma série de campos afins (estudos econômicos e previsões de crescimento, climatologia e hidrologia e de todos os problemas que envolvem diretamente uma central em si) este livro é adequado para o dia a dia de estudantes e profissionais que atuam na área.

CAPITULO 3

ESTUDOS PARA IMPLANTAÇÃO DE UMA MICROCENTRAL

3.1 - Localização

Os estudos para a localização de regiões mais adequadas para o aproveitamento de microssinas hidroelétricas objetivam a coleta de dados básicos, feitos no campo e são constituídos das seguintes atividades:

3.1.1 - Trabalhos Iniciais

Consiste no trabalho de planejamento e aferição de rotina para a realização dos estudos e constitui-se das seguintes partes:

- Contatos com os possíveis moradores beneficiados, tendo o cuidado para não levantar falsas expectativas;
- Levantar o nível sócio-econômico dos moradores;

- Levantar as disponibilidades de materiais necessários para a construção da barragem tais como pedras, madeira, etc...
- Disponibilidade do uso da mão-de-obra local para a redução de custos;
- Possibilidade do treinamento de uma ou duas pessoas para manutenção e operação da microusina;
- Distância da rede pública da CEEE até a microusina, para possibilitar uma futura interligação, à rede de distribuição por uma linha CGBT ou bifásica;
- Estudos de expansão da área, com a instalação de microempresas rurais na área.

3.1.2 - Coleta de Dados

Deve-se elaborar uma pesquisa na área de interesse e, para isso, recomenda-se um levantamento em órgãos públicos ou empresas do ramo (DNAEE, Ministério da Agricultura, Secretaria da Agricultura do Estado ou Municípios, Serviço Geográfico do Exército, etc) onde se possa encontrar o máximo de dados sobre a bacia a ser estudada, tais como:

- Sistema energético existente na região;
- Perfis dos rios e riachos;

- Dados topográficos;
- Mapas diversos com divisão territorial e rodovias;
- Fichas descritivas de estações metereológicas (pluviométricas e climatológicas);
- Fontes de matéria prima (pedras, madeira, etc).

3.1.3 - Análise dos Dados Coletados

Os dados coletados, devem ser analisados e avaliados visando principalmente:

- Traçado do perfil dos rios;
- Localização de possíveis quedas naturais;
- Localização de declives com possibilidade de construção de canais;
- Identificação das principais limitações existentes para a formação de pequenos reservatórios, tais como:
 - terras produtivas e benfeitorias;
 - estradas e pontes;
 - áreas de reserva florestal.
- Confecção de mapas de rios e riachos com indicação de curvas de nível.

3.1.4 - Identificação dos Locais Aproveitáveis

Considera-se um local aproveitável para a instalação de uma ou mais unidades de μ CH's, aquele que apresenta as seguintes características:

- Rios e riachos perenes que permitem o funcionamento da μ CH no mínimo 90% do ano;
- Quedas suficientemente altas ou declives com possibilidade de construção de canais, onde é possível obter potências compatíveis com as necessidades dos moradores;
- Moradores com um mínimo de instrução, para que pelo menos um ou dois possam ser treinados para operar e dar manutenção à μ CH.

Com base nos elementos obtidos no ítem anterior pode-se identificar os locais onde se poderá construir pequenas barragens e locais com queda natural dos rios.

3.1.5 - Reconhecimento

O reconhecimento da área adequada para a instalação de μ CH's pode ser feito por via aérea, terrestre e, em algumas regiões, fluvial.

Em se tratando de microusinas hidroelétricas, recomenda-se o reconhecimento do local pré-escolhido por via terrestre, não se usando a via aérea por ser antieconômica e a via fluvial, em se tratando de microusinas, geralmente se trabalha em rios e riachos de pequenas vazões não navegáveis.

O trabalho de reconhecimento visa:

- Identificar as condições geomorfológicas da bacia ao longo do curso principal e dos afluentes;
- Permitir a confirmação dos locais e das quedas naturais escolhidas;
- Estimar os perfis dos rios, alturas máximas de barragem e de queda dos locais;
- Verificar se as limitações estabelecidas para a formação de reservatórios foram satisfeitas;
- Avaliar os aspectos topográficos com métodos expeditos;
- Avaliar as vazões empregando métodos expeditos;
- Avaliar as condições geográficas e geotérmicas, com métodos expeditos;
- Inspeccionar os postos meteorológicos (se existentes) quanto à fluviometria e pluviometria.

Nesta fase do estudo para a pesquisa de locais próprios ao aproveitamento hidroelétrico é muito importante observar o

aspecto do melhor aproveitamento possível do potencial energético do curso de água.

3.2 - Estudos Sócio-Econômicos

Conforme o MANUAL DE MINICENTRAIS HIDRELÉTRICAS (2), o conhecimento das condições sociais e econômicas vigentes das populações que serão afetadas pela implantação de um aproveitamento hidroelétrico torna-se importante. Este conhecimento servirá de base para comparação com situações previstas de acontecer após a construção da usina, permitindo ao final a obtenção do benefício entre as condições "com" e "sem" o projeto.

Além do mais, os estudos sócio econômicos permitirão uma primeira caracterização adequada do mercado pretendido pelo aproveitamento, com a especificação dos usos a serem dados à energia gerada. De acordo com a natureza desses usos, é possível classificar-se as usinas segundo as seguintes características:

a) usinas destinadas a um mercado não atendido previamente;

b) usinas destinadas à substituição de outras fontes geradoras (grupos diesel/elétricos);

c) usinas destinadas à interconexão de diversos microgeradores de indução, ligados à rede de distribuição por uma linha CCBT ou bifásica.

Além disso as usinas classificadas em (a), (b) ou (c) poderão ainda ser:

d) usinas destinadas principalmente ao atendimento de instalações produtivas isoladas tais como, fazendas, núcleos de pequenas propriedades rurais, etc;

e) usinas destinadas ao atendimento de núcleos urbanos;

f) usinas para regularização de tensão nos extremos da rede de distribuição.

As usinas do grupo (d) requerem estudos sócio-econômicos menos abrangentes, já que a energia terá aplicações limitadas. Portanto, o trabalho aqui descrito abrange, principalmente, aqueles aproveitamentos destinados ao suprimento de energia a núcleos de pequenas propriedades rurais.

3.2.1 - Levantamento Sócio-Econômico das Populações Afetadas

Definida a área de influência da usina deverão ser levantados os seguintes dados quantitativos da população a ser afetada:

População:

- número atual de habitantes da área;
- evolução do número de habitantes nos últimos anos;
- distribuição espacial da população.

Condições Sociais da População:

- grau de escolaridade da população;
- atendimento escolar existente na área;
- atendimento médico disponível na área;
- principais enfermidades que ocorrem na região.

Condições Econômicas:

- principais atividades econômicas na área, segundo os mais importantes produtos no setor agrícola;
- distribuição da população na área, segundo suas atividades agrícolas principais: monocultura, policultura, variedades de culturas, etc;

- níveis de rendimento da população, segundo faixas de rendimento bruto familiar mensal médio.

Condições de Infra-Estrutura:

- rede viária existente na área: principais rodovias, quilometragem da rede pavimentada, não pavimentada, estradas vicinais, etc;
- condições gerais de tráfego nas principais vias segundo épocas do ano;
- existência e condições de funcionamento das redes elétricas da comunidade afetada: extensão da rede, número de ligações prediais, parcela da população atendida.

Os dados e informações levantadas servirão de base para a avaliação sócio-econômica do empreendimento e da capacidade de participação financeira da comunidade nos custos de instalação da microusina. Ter-se-á, também, uma noção mais precisa sobre o retorno do capital investido, da expectativa da comunidade em relação à microusina e também saber-se-á da possibilidade de treinamento do pessoal da própria comunidade para dar manutenção à microusina.

3.3 - Seleção da Turbina

Para o programa de desenvolvimento de microcentrais hidroelétricas no interior do RS é recomendada a aplicação dos seguintes tipos de turbinas:

- Turbina Pelton;
- Turbina Francis;
- Turbina de impulsão radial (MICHEL-BANKI).

A seleção do tipo de turbina depende do campo de aplicação e, principalmente, da altura e vazão da água e demais critérios tais como sensibilidade a materiais em suspensão, a possibilidade e magnitude de manutenção assim como o custo da turbina.

Na Fig. 3.1 estão representadas as turbinas acima mencionadas com seus campos de aplicação em função de altura de queda, da vazão da água e a potência de cada máquina.

A potência efetiva no eixo da turbina é calculada por:

$$N_T = \eta_T \cdot H \cdot Q \cdot \gamma_w \quad (\text{kW}) \quad (3.1)$$

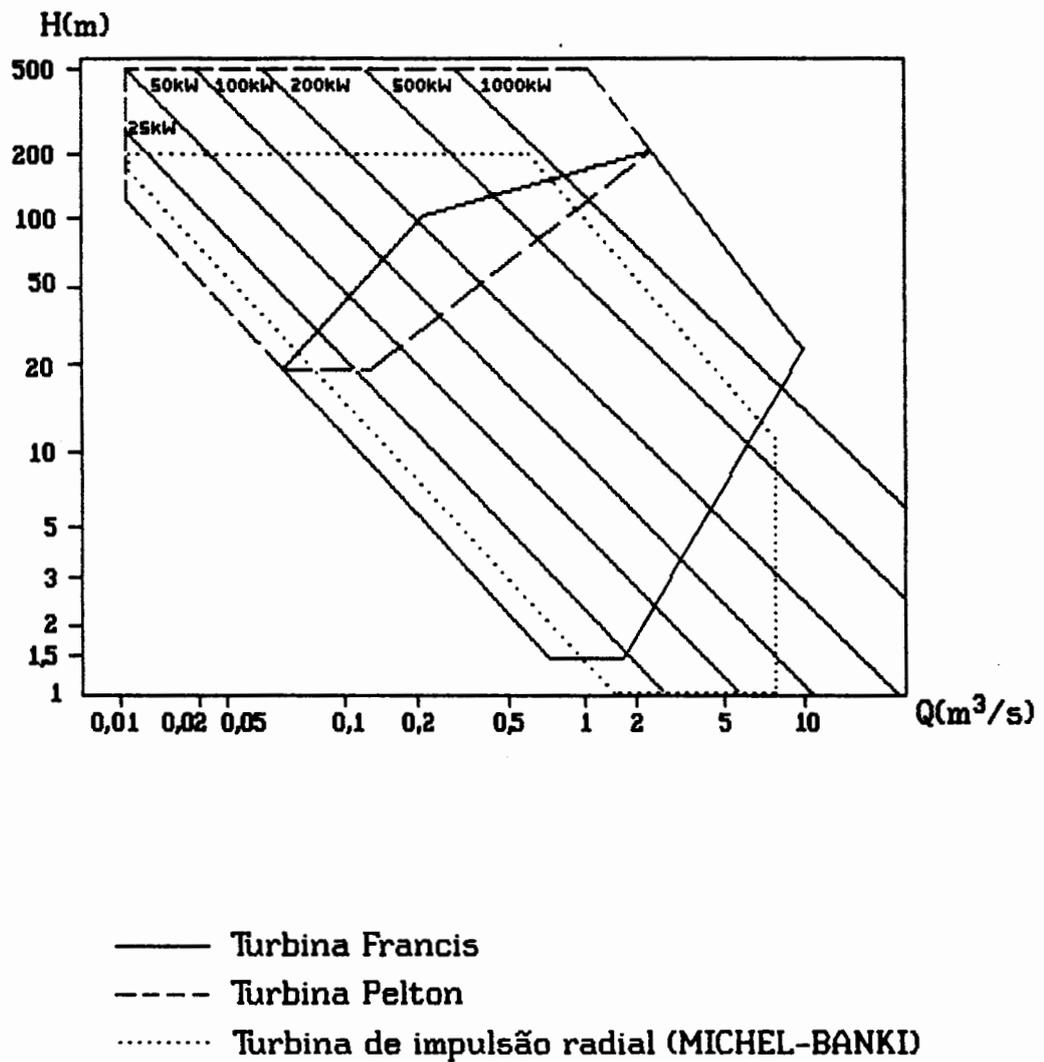


Fig. 3.1 - Campos de Aplicação para cada Tipo de Turbina

onde: η_T = rendimento da turbina, simplifadamente
assumido como $\eta_T = 0,8$
 H = altura da queda (m)
 Q = vazão de projeto (m^3/s)
 γ_w = peso específico da água = $9,81 \text{ kN/m}^3$

3.3.1 - Turbina Pelton

A turbina Pelton é uma turbina de fluxo livre. A energia potencial da água é transformada em energia cinética mediante injetores que facilitam o impulso da água sobre as pás da roda motriz, razão pela qual a mesma trabalha em condições de pressão atmosférica, aproximadamente. Devido a isso, a altura líquida, H , de uma turbina Pelton é limitada em sua cota inferior pelo ponto de impacto do jato sobre as pás da roda motriz.

Em turbinas Pelton equipadas com múltiplos injetores - e com rodas motrizes com grande diâmetro - a situação é mais complexa. Mede-se nessas a pressão manométrica.

Em microcentrais hidroelétricas, o emprego de turbinas Pelton pode resultar em economia com vazões a partir de 10 l/s e quedas desde 20 m . A combinação necessária do salto (queda) com a vazão de projeto para obter uma certa potência de uma

turbina Pelton é mostrado na Fig. 3.1.

O diâmetro da coroa de pás (da roda Pelton), D , em função da queda líquida, H , da vazão, Q , e do número específico de revoluções, n_s , pode ser calculado segundo [3] como segue (Fig. 3.2):

$$D = \frac{97,5 \cdot \sqrt{Q}}{n_s \cdot \sqrt{H}} \quad (3.2)$$

Q em m^3/s

H em m

Sendo: $n_s = 240 \cdot \frac{d}{D} \cdot \sqrt{Z}$ (rpm)

d = diâmetro do jato (Fig. 3.3)

D = diâmetro da coroa de pás nos pontos de impacto
(m)

Z = número de jatos

O diâmetro do jato (saída do injetor) pode ser calculado segundo [3] por:

$$d = 0,55 \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{H}} \quad (m) \quad (3.3)$$

onde: Q = vazão de projeto (m^3/s)

H = queda (m)

A abertura do injetor tem um diâmetro menor de acordo

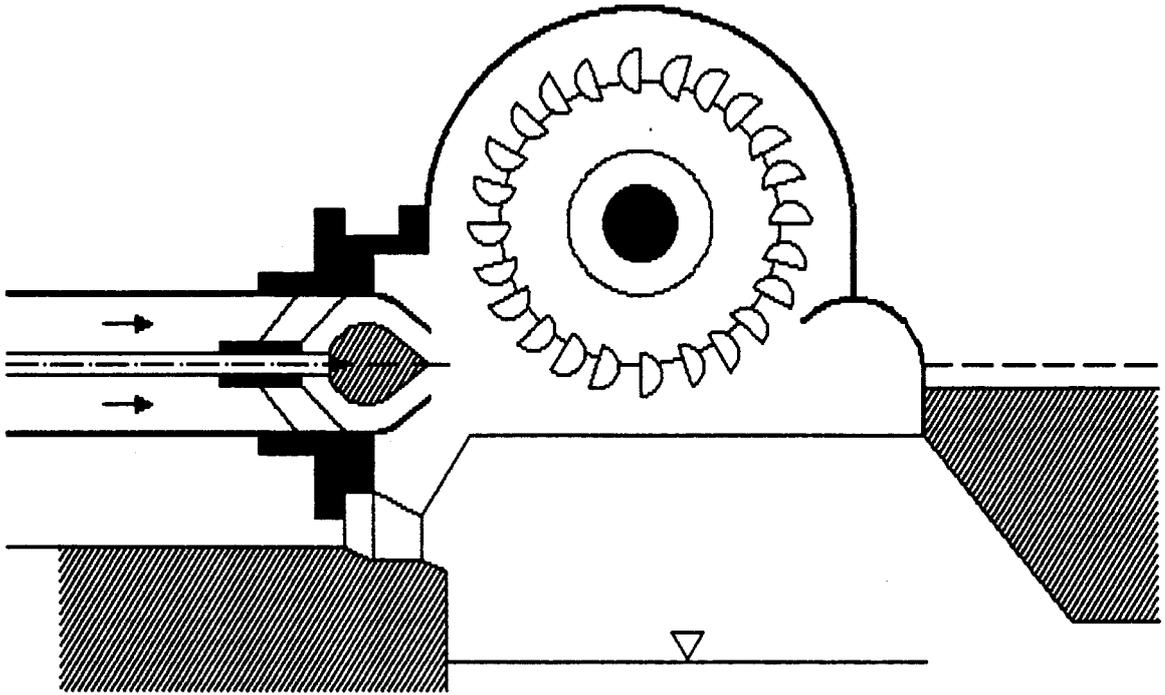


Fig. 3.2 - Corte do Conjunto de uma Turbina Pelton

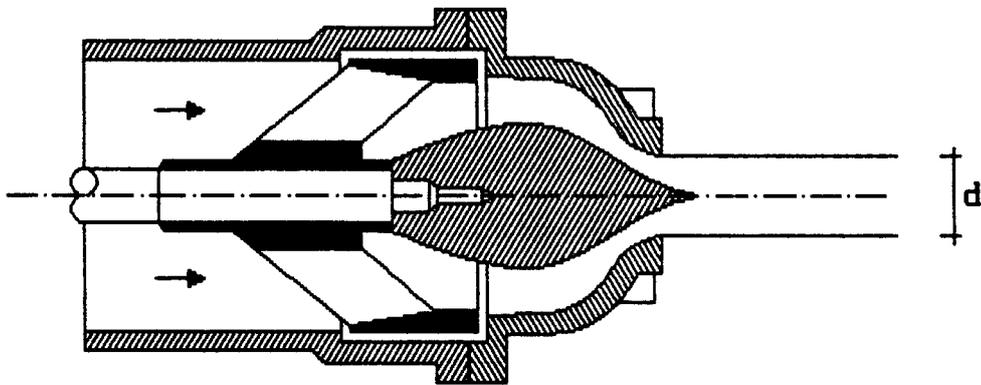


Fig. 3.3 - Bico Injetor e Diâmetro do Jato

com as especificações do fabricante.

Para otimizar o rendimento da turbina, proporcionando uma livre saída da água depois da incidência do jato nas pás, deve-se respeitar, segundo [3], a seguinte condição:

$$\frac{D}{d} \geq 10 \quad (3.4)$$

onde: D - diâmetro do círculo do rotor no ponto de incidência do jato (m)
d - diâmetro do jato de água (m)

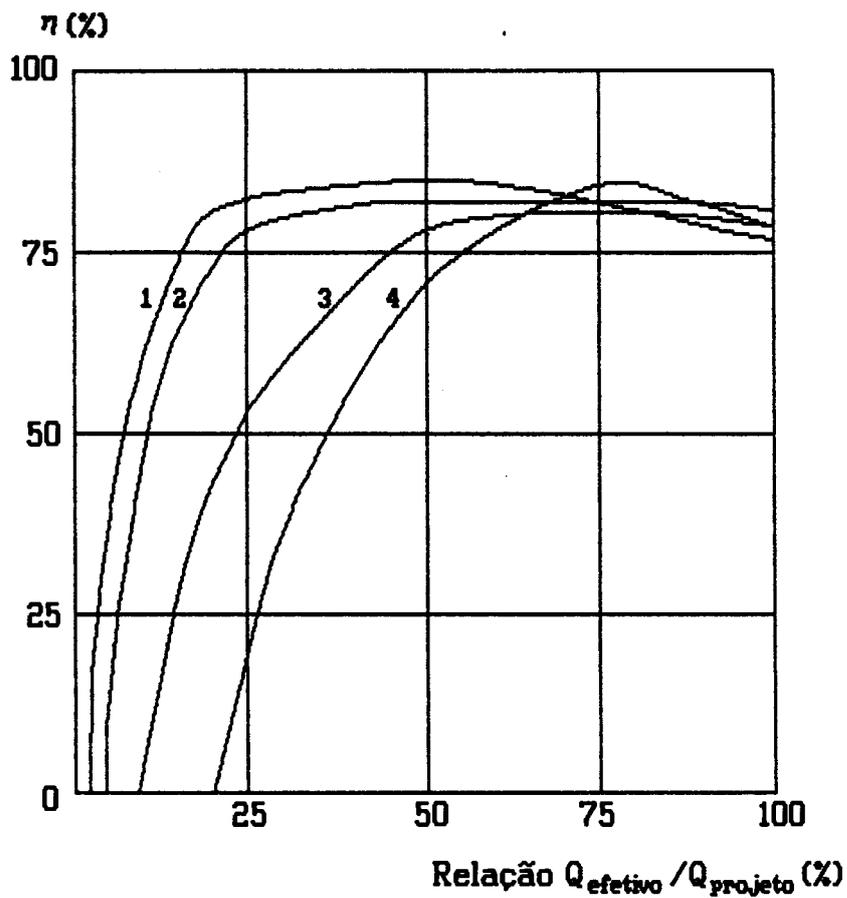
Com isto se obtém o diâmetro ótimo de círculo do rotor:

$$D_{\text{ótimo}} = \frac{5,88 \cdot \sqrt{Q}}{Z^{0,5} \cdot H^{0,25}} \quad (\text{m}) \quad (3.5)$$

As turbinas Pelton em comparação com as turbinas Francis tem a vantagem de uma melhor curva de rendimento (η relacionado com o grau de abertura $Q_{\text{efetivo}}/Q_{\text{projeto}}$) com mostra a Fig. 3.4. Esta curva apresenta-se mais horizontal desde os 25% = $Q_{\text{efetivo}}/Q_{\text{projeto}}$.

A razão para isto explica-se pela pouca variação da velocidade do fluxo em função das vazões.

Também a sensibilidade ao desgaste por materiais em



- | | |
|------------------|-----------------|
| 1 - Pelton | com $n_s = 20$ |
| 2 - Michel-Banki | com $n_s = 100$ |
| 3 - Francis | com $n_s = 100$ |
| 4 - Francis | com $n_s = 360$ |

Fig. 3.4 - Curvas de Rendimento dos Diversos Tipos de Turbinas para $\mu\text{CH}'s$

suspensão trazidos pelas águas motrizes - isto se refere apenas a grãos finos - é, para turbinas Pelton, menor que para turbinas Francis ou turbinas de impulsão radial.

Trabalhos de manutenção e reparação em turbinas Pelton são mais fáceis e mais rápidos comparado com as turbinas Francis, graças à construção relativamente simples do rotor assim como o fácil acesso ao mesmo.

3.3.2 - Turbina Francis

O campo de aplicação das turbinas Francis em mini e microcentrais hidroelétricas é de 2 a 150 metros de altura e desde 100 l/s de vazão de projeto da água motriz (Fig. 3.1).

De acordo com as condições locais, o eixo da turbina pode ter uma posição vertical ou horizontal. A posição horizontal do eixo é mais indicado, por que esta facilita a conexão direta de geradores de fabricação usual (síncronos ou assíncronos). Turbinas Francis com eixos verticais não só implicam em trabalhos difíceis de reparação e manutenção, mas também requerem mais espaço em cima da máquina (para conectar geradores), e isso resulta em um peso elevado de máquinas (elevando os custos) e, além do mais, necessita-se de meios de levantamento.

Portanto, após projetar, construir e colocar em funcionamento duas microcentrais hidroelétricas, acionadas uma por turbina Francis e outra por turbina Pelton, constatou-se as seguintes desvantagens da turbina Francis:

- A desmontagem e montagem da turbina em casos de reparação e manutenção é muito trabalhosa.

- A turbina é muito susceptível à cavitação.

- A curva de rendimento da turbina não é ótima (particularmente com vazões muito menores que as vazões de projeto como mostra a Fig. 3.4).

- A turbina é mais sensível a materiais em suspensão arrastados pela água; possibilidades de desgaste acarretam uma redução do rendimento.

A vantagem da turbina Francis sobre a turbina Pelton encontra-se no fato de que, devido ao tubo de sucção a totalidade do desnível entre montante e jusante é aproveitado para a geração de energia hidroelétrica.

Para o dimensionamento global da turbina Francis, em se tratando de unidades de potências acima de 500 kW, deve-se consultar uma bibliografia mais específica [8,9,10]. Mas como o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma sistemática para implantação de microcentrais hidroelétricas com potências inferiores a 500 kW e que devem atender a pequenas

propriedades rurais, pode-se determinar o diâmetro do rotor segundo [3] como segue:

$$D = (0,16 \cdot n_s + 35,1) \cdot \frac{\sqrt{H}}{n} \quad (3.6)$$

onde: n = número de revoluções (velocidade efetiva de rotação) (rpm)

n_s = velocidade de rotação específica (rpm)

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{1,36 \cdot N}}{H \cdot \sqrt{H}} \quad (3.7)$$

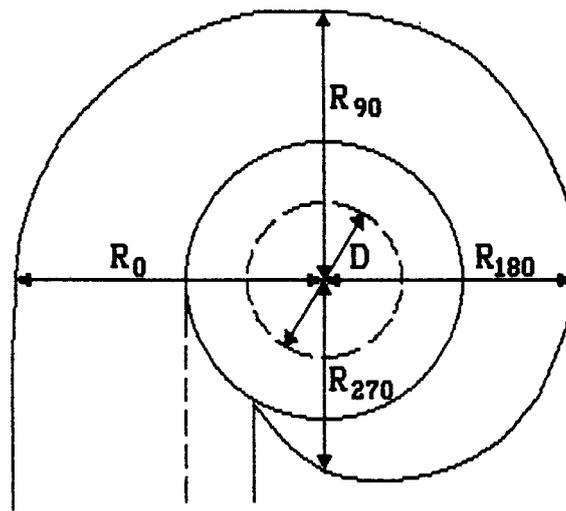
onde: N = potência da turbina (kW)

H = altura de queda da água (m)

Havendo verificado o diâmetro estimado da roda, determina-se aproximadamente (Figs. 3.5 e 3.6) as dimensões do conjunto da turbina, ou seja, a caixa do caracol.

3.3.3 - Turbinas de Impulsão Radial (MICHEL-BANKI)

Atualmente, a fabricação de turbinas de impulsão radial alcança unidades com potências até 800 kW. Como se pode verificar na Fig. 3.1, a vazão absorvida pela turbina varia de 25 a 700 l/s (de acordo com as dimensões da máquina) com alturas de queda da ordem de 1 a 200 metros.



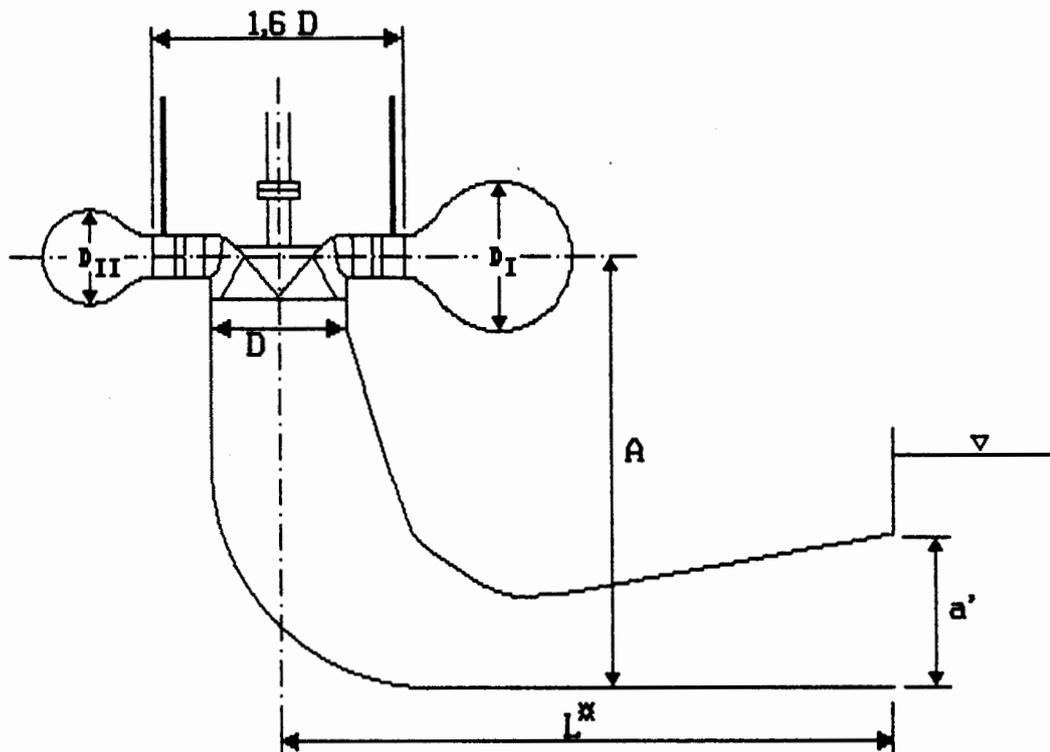
$$R_0 \cong 2,2 \cdot D$$

$$R_{90} \cong 2,0 \cdot D$$

$$R_{180} \cong 1,7 \cdot D$$

$$R_{270} \cong 1,3 \cdot D$$

Fig. 3.5 - Dimensões da Espiral de uma Turbina Francis [3]



$$L^{**} \cong \left(5 - \frac{n_s}{200}\right) \cdot D \quad (\text{m})$$

(para tubos verticais de sucção)

$$L^{**} \cong 2,2 \cdot D \quad (\text{m})$$

$$A \cong \left(3,4 - \frac{n_s}{400}\right) \cdot D \quad (\text{m})$$

$$D_I \cong 1,0 \cdot D$$

$$D_{II} \cong 0,6 \cdot D$$

$$a \cong 1,2 \cdot D$$

$$b \cong 3,0 \cdot D$$

Fig. 3.6 - Estimativa Global das Dimensões de uma Turbina Francis [3]

A turbina de impulsão radial pode ser instalada com uma saída livre da água ou com tubo de sucção. Esta última turbina, no entanto, necessita de um tubo de sucção, no qual é possível aproveitar-se todo o desnível da água.

O conjunto da turbina de impulsão radial está mostrado na Fig. 3.7, onde também pode-se verificar o caminho percorrido pelo fluxo de água no rotor da turbina.

O número de pás instaladas no rotor varia de 26 a 30 segundo a circunferência da roda cujo diâmetro é da ordem de 200 a 600 mm.

Comparado com os outros tipos de turbinas, a turbina de impulsão radial tem a grande vantagem da construção multicelular. Ou seja, com a divisão do rotor em células na proporção 1:2 pode-se operar a turbina com um terço de sua capacidade (na presença de vazões médias ou baixas) e com toda a sua capacidade (na presença de vazões de projeto). Mediante esta disposição de capacidades variáveis de fluxo, qualquer vazão de água é aproveitada com ótimo rendimento (as curvas de rendimento são quase horizontais) (Fig. 3.8). Ademais, devido à regulagem, pode-se operar a turbina a partir de 20% de sua potência. Tais condições de baixa percentagem de utilização, encontram-se muitas vezes em regiões com eletrificação recente, onde a demanda de energia aumenta de forma paulatina,

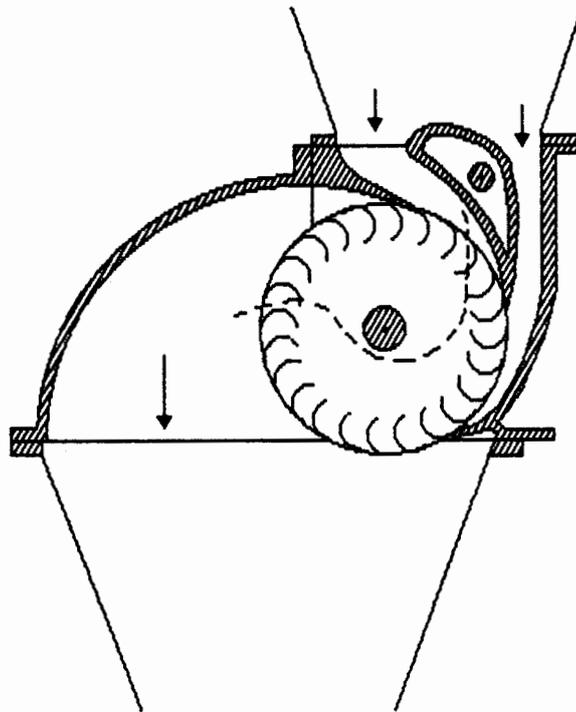


Fig. 3.7 - Turbina de Impulsão Radial (MICHEL-BANKI) com Entrada Vertical

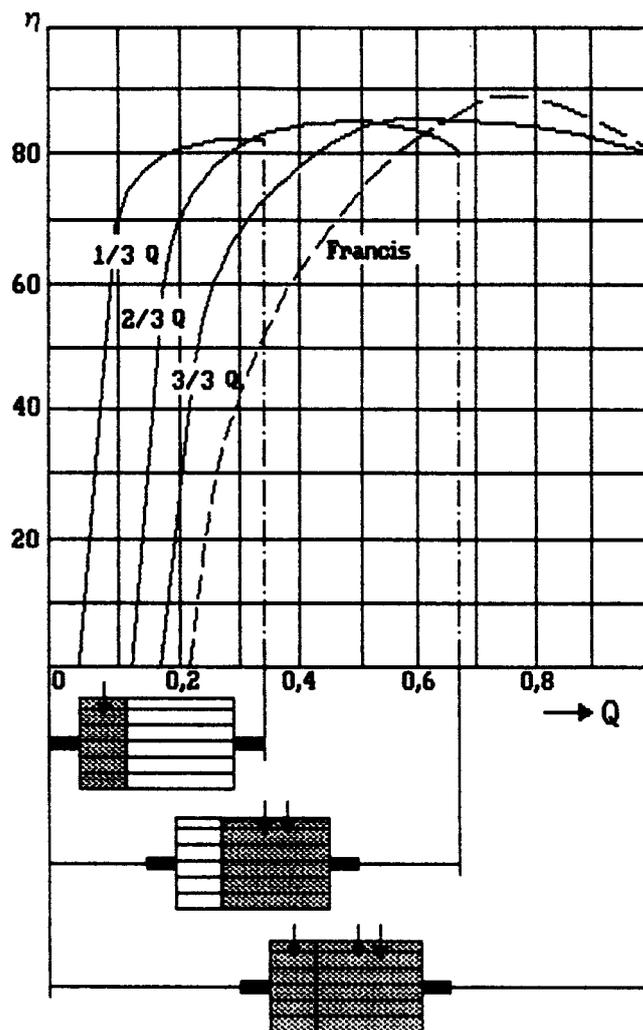


Fig. 3.8 - Curvas de Rendimento de Acordo com as Diferentes Vazões com Uso de Uma ou Ambas as Células

somente depois de algum tempo a microcentral alcança o valor máximo de produção de energia.

O dispositivo de regulagem de vazões variáveis trabalha com pás giratórias, as quais também podem servir como elementos de fechamento da turbina em casos em que a queda não excede os 30 m (Fig. 3.7).

A maior vantagem da turbina MICHEL-BANKI encontra-se na rápida montagem do conjunto da máquina (com uma obra civil modesta) e em seu fácil acesso em todos os elementos do equipamento durante a manutenção.

Para maiores informações, que envolvam aspectos constituintes e materiais utilizados, é aconselhável a consulta de uma bibliografia mais específica [11,12].

A seguir (capítulos 4 e 5) será discutida a implantação de duas μ CH's (Unidades I e II), localizadas no município de Três Coroas (RS) com a finalidade de testar a sistemática para a implantação proposta neste trabalho.

CAPÍTULO 4

CONSTRUÇÃO DA CENTRAL - UNIDADE I

Segundo a sistemática discutida no Capítulo 3, a Unidade I da central é como segue. A turbina é do tipo Francis normal de 15 kW e o motor de indução trifásico da marca EBERLE com os seguintes dados de placa:

Mod: B 132 M4	N ^o 15458	Isol.: F
cv 15	Liga: Δ Y	Cat.: H
V 220/380	Hz 60	RPM 1750
A 38/22	I_p / I_n 8,7	

Proteção IP 55 em regime contínuo.

Além do conjunto turbina-gerador a Unidade I é composta das seguintes partes, cada qual constituindo um conjunto de obras e instalações projetadas harmonicamente para poder operar efetivamente em conjunto:

- a) Barragem;
- b) Captação e condutos d'água;

- c) Casa de máquinas;
- d) Restituição de água.

4.1 - Barragem

A barragem usada para bloquear a passagem de água é do tipo em arco (Fig. 4.1). Optou-se por esse modelo de barragem por que as condições naturais existentes no local são apropriadas para esse forma de construção, ou seja: margens altas constituídas de rochas resistentes e sãs, fundo do rio igualmente em rochas resistentes e sãs.

A principal vantagem da barragem em arco é que ela tira proveito da propriedade das estruturas em arco resistirem com facilidade à cargas uniformemente distribuídas sobre seu dorso, transmitindo-as para suas ombreiras. Nestas condições, as forças decorrentes do emprego hidrostático são transferidas para as margens e o fundo do rio.

O arco da barragem apresenta um comprimento de 18 m, largura de 1,20 m e altura máxima, no meio do leito do rio, de 2 m. Foi construída com rochas encontradas no próprio local, fixadas com massa de cimento e areia na proporção de 1 : 5.

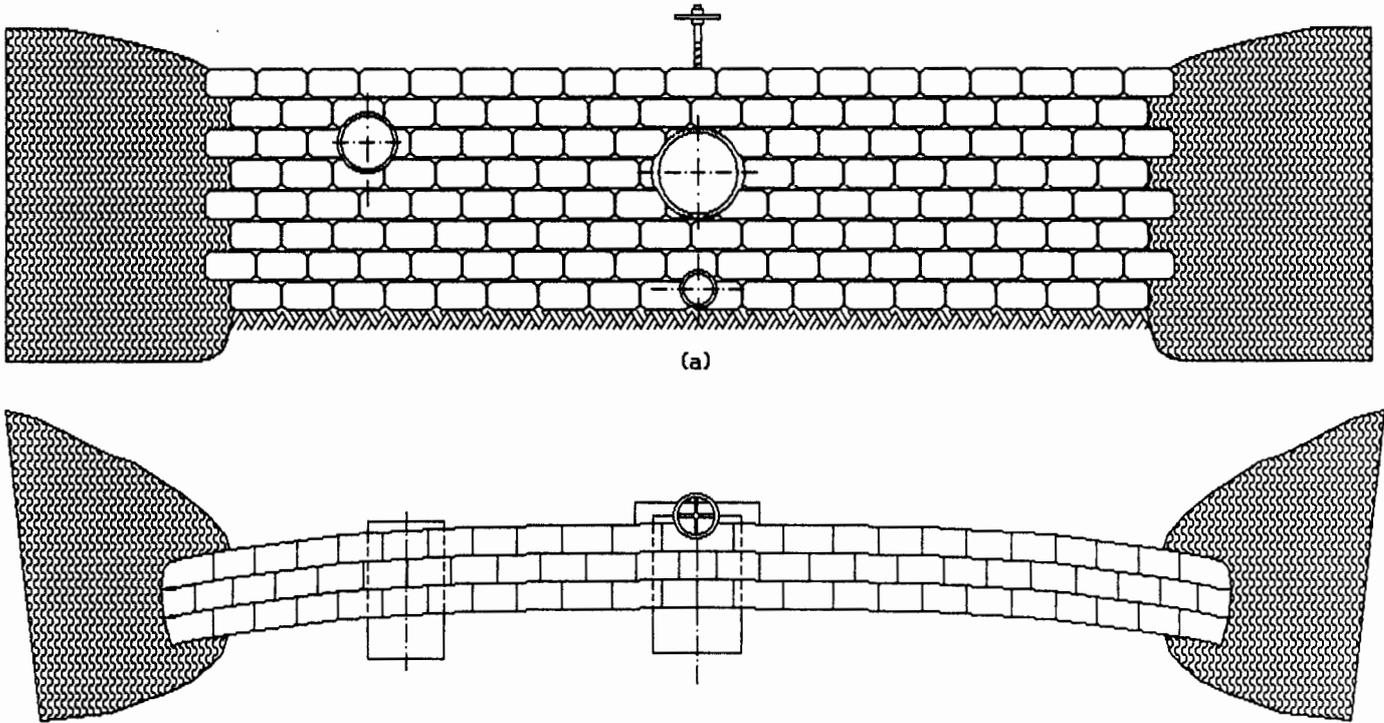


Fig. 4.1 - Vistas (a) Frontal e (b) Superior da Barragem da Unidade I

4.2 - Captação

A tomada de água está plenamente incorporada à barragem, e seu equipamento consta do seguinte (Fig. 4.2):

a) Grades de Proteção: com a finalidade de interceptar material sólido carregado pelo rio (pedras e folhas). É constituída por painéis de barras de seção retangular e cujo espaçamento é de 10 mm.

b) Comporta: tem a função de abrir ou fechar a admissão da água no conduto forçado. Equipada com uma haste rosqueada de 15 mm de diâmetro conectada a uma rosca sem fim, a qual permite um fechamento relativamente rápido (Fig. 4.2).

c) Tomada de fundo para retirada de material sedimentado, com a função de minimizar o efeito do assoreamento.

d) Tomada de reserva para futuras experiências.

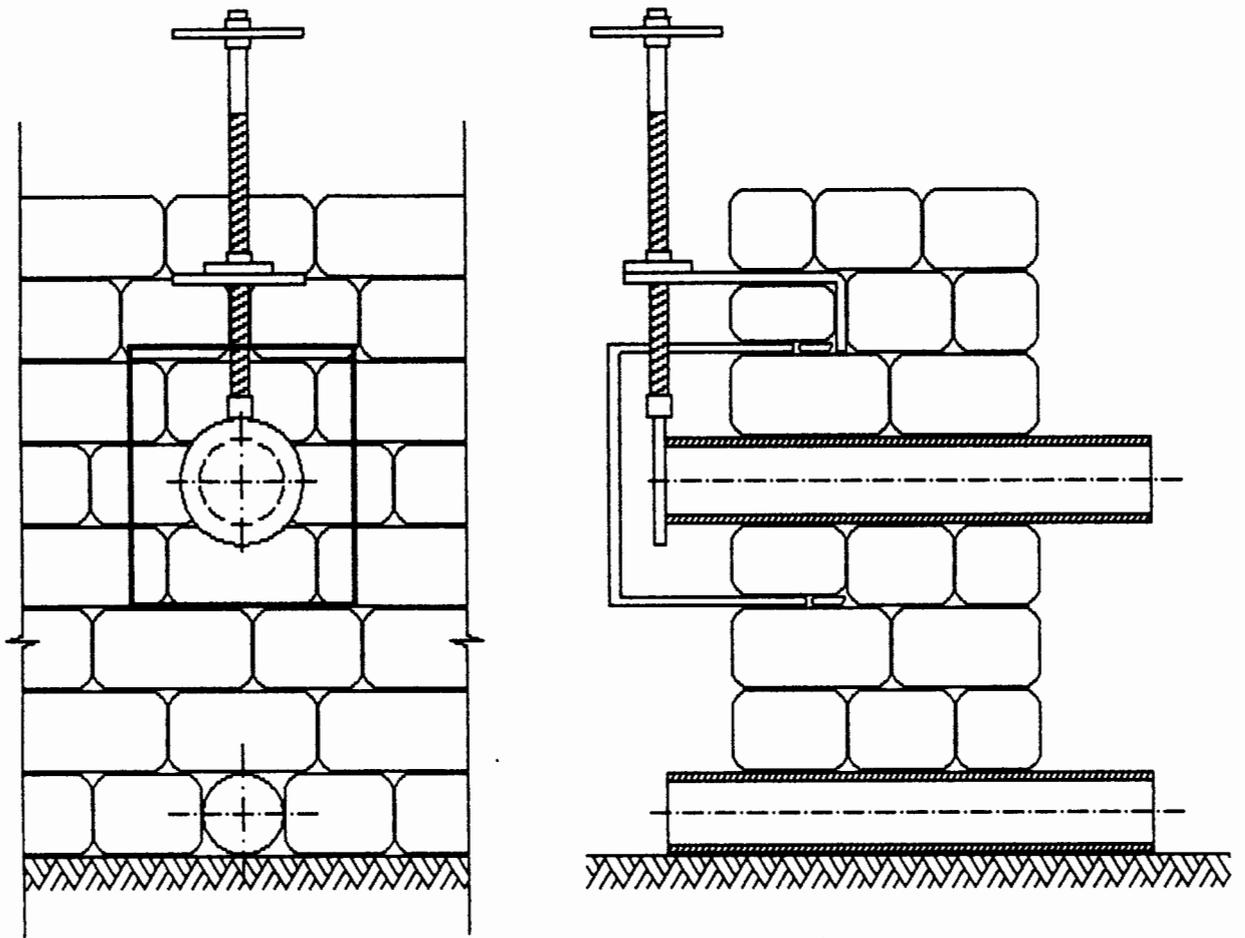


Fig. 4.2 - Tomada de Água e Comporta

4.3 - Conduto de Água

4.3.1 - Projeto Geral e Sistema de Apoio

O conduto forçado conduz a água diretamente da barragem até a casa de máquinas, sem bifurcações, com um comprimento de 52 m (Fig. 4.3).

Para evitar-se perdas desnecessárias, a tubulação do duto forçado acompanha a inclinação do terreno, não apresentando curvas.

Os apoios do conduto forçado consistem em pilares de concreto. Estes suportes não admitem deslizamentos de tubo na direção longitudinal. As forças verticais são absorvidas mediante cintas de fixação que são presas no concreto dos pilares conforme a Fig. 4.4.

4.3.2 - Material Usado para o Conduto Forçado

Na escolha do material usado para fabricação dos tubos optou-se por lâminas de aço forjado. A razão de optar-se pelo uso desse material e não tubos de PVC rígido, justifica-se por razões de segurança, pois a tubulação está colocada no leito

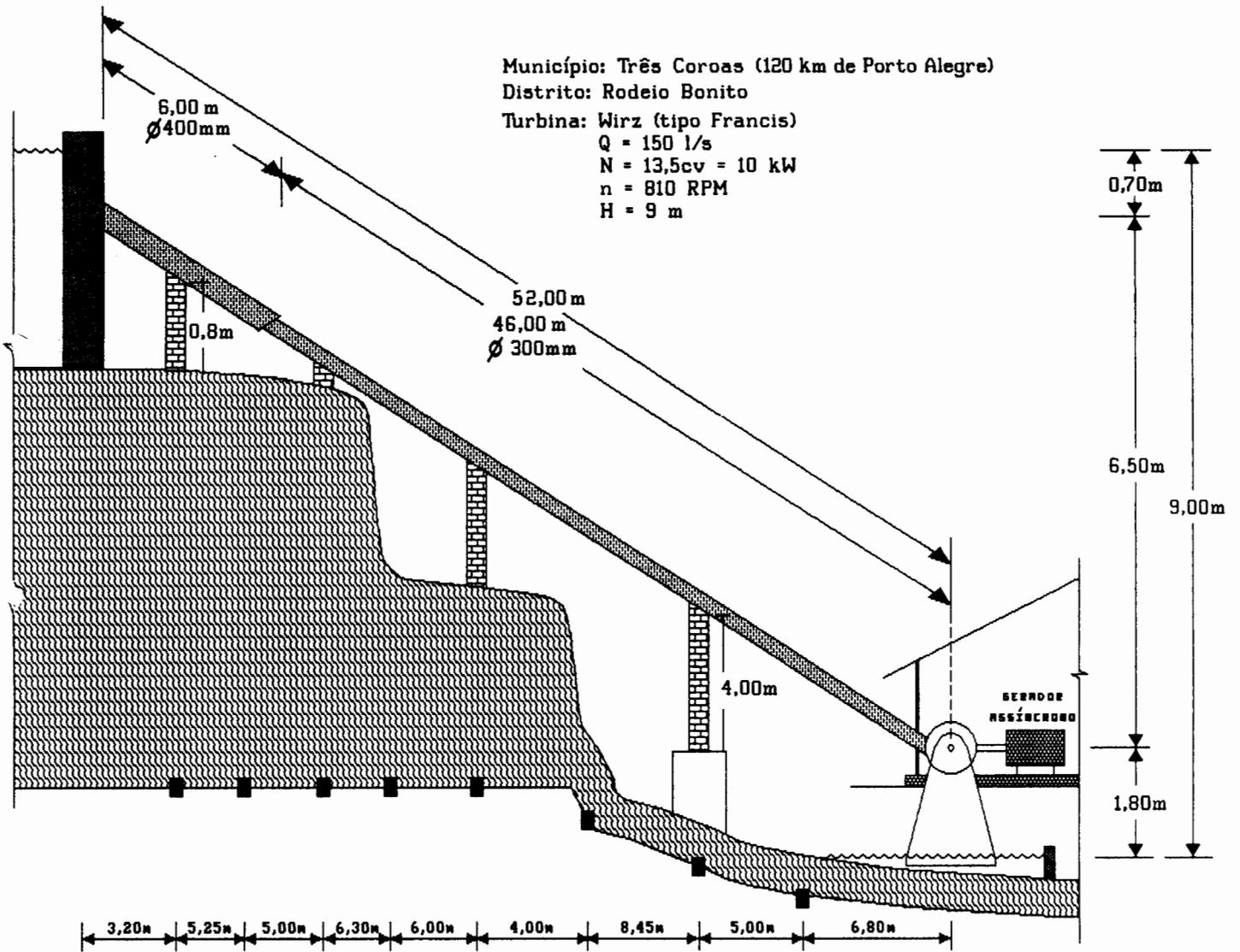


Fig. 4.3 - Diagrama Esquemático da Microusina - Unidade I

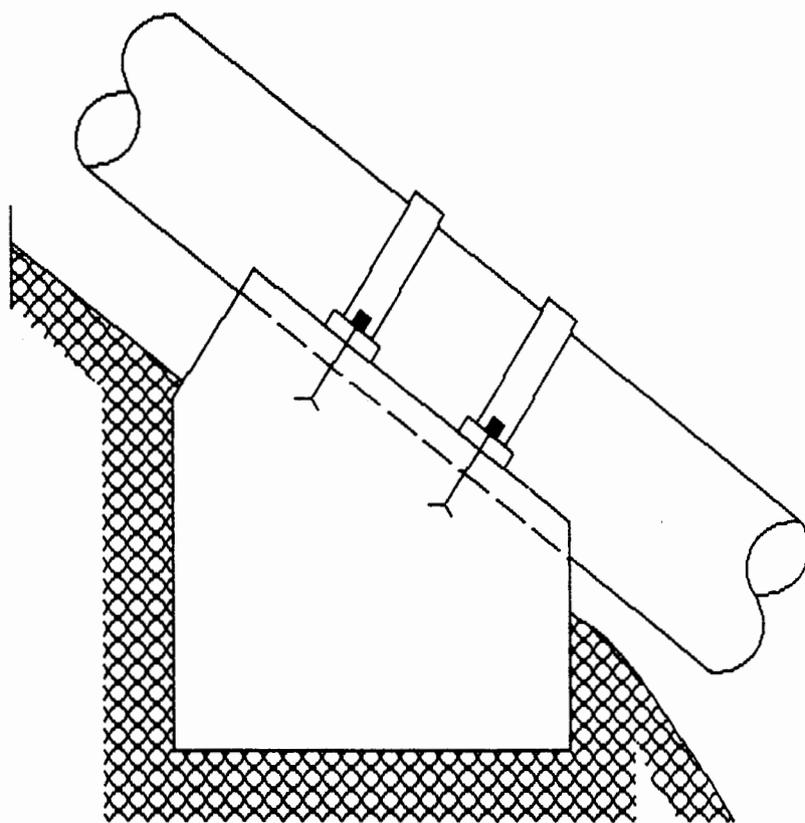
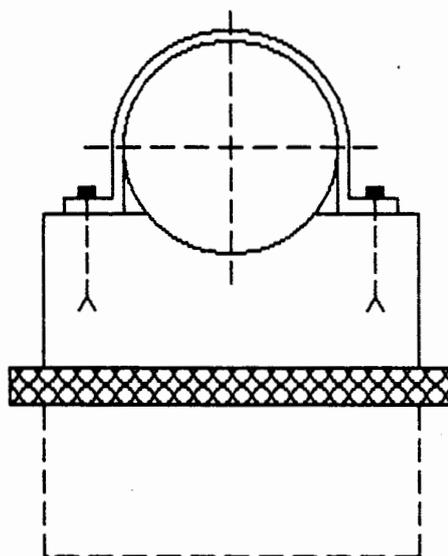


Fig. 4.4 - Apoios do Conduto Forçado

do rio e, em épocas de enchentes, parte da tubulação fica totalmente imersa na água, sendo que materiais sólidos, tais como pedras e árvores que acompanham a correnteza da água poderiam danificar uma tubulação menos resistente.

Os tubos são fabricados em comprimentos de 6 m e as uniões são feitas através de flanges soldados nas extremidades dos tubos. Na união dos flanges usaram-se juntas de papelão empastadas com graxa. As juntas de papelão mostraram-se satisfatórias tanto na vedação como também por absorverem perfeitamente os pequenos movimentos longitudinais resultantes da variação de temperatura.

4.4 - Dimensionamento Hidráulico

4.4.1 - Seleção do diâmetro adequado:

Para determinar-se o diâmetro adequado para o conduto forçado usa-se a equação:

$$d = 1,13 \sqrt{\frac{Q}{V}} \quad [1] \quad (4.1)$$

d_e = diâmetro econômico (m)

Q = vazão ($\frac{m^3}{s}$)

V = velocidade da água dentro do tubo (m/s)

A velocidade máxima recomendada é de 5 m/s [1,3,6]. Para evitar-se golpes de arinete quando a turbina é fechada bruscamente e reduzir-se as perdas de carga no conduto forçado, optou-se por uma velocidade de 3 m/s.

A vazão média do córrego é de 150 l/s [4], portanto:

$$d_e = 1,13 \sqrt{\frac{0,150 \text{ m}^3/\text{s}}{3 \text{ m/s}}}$$

$$d_e = 0,26 \text{ m} = 260 \text{ mm}$$

Como não existe no comércio um tubo de 260 mm, usou-se um de 300 mm de diâmetro e recalculou-se a velocidade:

$$d_e = 1,13 \sqrt{\frac{Q}{V}}$$

$$0,30 = 1,13 \sqrt{\frac{0,15}{V}}$$

$$V = 2,13 \text{ m/s}$$

A velocidade da água de 2,13 m/s no conduto forçado está

abaixo da máxima recomendada, porém, este fato apenas vem a contribuir numa menor perda de carga na canalização.

4.4.2 - Queda Líquida e Perdas de Carga:

A queda líquida resulta da diferença entre a queda bruta e as perdas de carga do conduto forçado.

$$H = H_r - \sum \Delta h \quad (4.2)$$

onde: H = queda líquida
 H_r = queda bruta
 $\sum \Delta h$ = soma das perdas de carga individuais

A queda bruta na turbina Francis é de 9 m.

As perdas de carga individuais são calculadas como segue:

1- Perda de Carga nas Grades

$$h_r = \xi_r \frac{V^2}{2g} \quad (3) \quad (4.3)$$

onde: ξ_r = coeficiente de perda
 V = velocidade da água na entrada da grade

com
$$\xi_r = \beta \operatorname{sen} \alpha \left(\frac{d_r}{a} \right)^{4/9} \quad (4.4)$$

onde: β = coeficiente da forma das barras da forma da grade e, no caso, $\beta = 2,42$ [3]

α = ângulo de inclinação em relação à horizontal, no caso, $\alpha = 90^\circ$

d_r = espessura da barra (5 mm)

a = espaço entre as barras (10 mm)

portanto:
$$\xi_r = 2,42 \operatorname{sen} 90^\circ \left(\frac{0,5}{0,1} \right)^{4/9}$$

$$\xi_r = 0,96$$

$$h_r = 0,96 \frac{(2,13)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_r = 0,22 \text{ m}$$

2 - Perda de Carga na Entrada

$$h_E = \xi_E \frac{V^2}{2g} \quad (4.5)$$

onde ξ_E = coeficiente de entrada que depende da forma de entrada

V = velocidade dentro do tubo (m/s)

para o caso:
$$\xi_E = 0,5 \quad [8]$$

portanto:

$$h_E = 0,5 \frac{(2,13)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_E = 0,12 \text{ m}$$

3 - Perdas por Atrito no Tubo

$$h_A = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad [3] \quad (4.6)$$

onde:

$$\lambda = 0,01 \left(\frac{K}{D} \right)^{0,194} \quad (4.7)$$

L = comprimento do tubo (m)

D_i = diâmetro interno do tubo (m)

V = velocidade do tubo (m/s)

Como trata-se de tubo de lâminas de aço forjado, $K = 1,5$ m [3]:

$$\lambda = 0,01 \left(\frac{1,5}{0,3} \right)^{0,194}$$

$$\lambda = 0,0124$$

portanto:

$$h_A = 0,0124 \frac{52}{0,3} \frac{(2,13)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_A = 0,50 \text{ m}$$

Como se pode verificar, a perda por atrito em um tubo de alta pressão é a mais importante de todas as perdas individuais devido ao comprimento do tubo.

A soma de todas as perdas no conduto forçado é:

$$\Delta h = 0,22 + 0,12 + 0,50$$

$$\Delta h = 0,84 \text{ m}$$

Portanto, a queda líquida do projeto, conforme a equação 4.2, é:

$$H = 9 - 0,84$$

$H = 8,16 \text{ m}$

CAPÍTULO 5

CONSTRUÇÃO DA CENTRAL - UNIDADE II

A unidade II consta de uma turbina tipo Pelton de 3 kW, acoplada a um gerador assíncrono de 3 kVA, 230 V, 14 A, 60 Hz, isolamento tipo B e 1820 rpm. Ainda fazem parte do conjunto turbina-gerador, as seguintes partes (todas projetadas para que realizem suas funções de maneira harmônica sem prejuízo ao meio ambiente):

- a) Barragem;
- b) Captação e Conduto de Água;
- c) Casa de Máquinas;
- d) Restituição da Água.

O tipo de barragem usada para reter a passagem da água é de terra e entroncamento.

A escolha do local para a construção da barragem foi uma imposição das condições topográficas encontradas e situa-se no topo da cachoeira onde não causa danos ecológicos e a água

represada não invade terras produtivas, duas preocupações que devem sempre fazer parte das atividades do projetista.

A razão para optar-se por esse tipo de barragem justifica-se pelas condições apropriadas encontradas no local, tais como, solo bastante argiloso e rochas de formas e tamanhos diversos próximo ao local de construção.

Como a microusina é a fio d'água, a função da barragem é apenas para elevar a nível da água do riacho, permitindo o afogamento da tomada de água, razão pela qual tem altura reduzida (2 m) e é construída num trecho encachoeirado do riacho, onde já existe uma variação de cota de fundo entre o início e o final do trecho que permite o aproveitamento da queda natural para produzir a energia desejada.

O comprimento da barragem é de 10 m e a largura na crista é de 2 m, permitindo passagem tranquila de pedestres e animais.

O vertedouro foi construído na margem esquerda da barragem e tem uma largura de 1,80 m e profundidade de 30 cm, sendo a única parte onde foi usada massa de cimento, para evitar a erosão.

5.1 - Conduitos de Água

O conduto forçado conduz a água diretamente da barragem até a casa de máquinas, sem bifurcações ou desvios. Devido às condições desfavoráveis do terreno (inclinação acentuada, mata fechada), também não usou-se chaminé de equilíbrio, apesar de que tecnicamente, este procedimento seria recomendável (Fig. 5.1).

O comprimento da tubulação é de 210 m - 60 m de PVC rígido e 150 m de tubos de aço. A razão para usar-se dois tipos de materiais diferentes para o duto forçado, justifica-se pelas dificuldades encontradas no local, tais como declividades bastante acentuadas, onde é impossível colocar canalizações de aço, devido ao seu peso elevado.

Para evitar o uso de pilares de sustentação da tubulação, foram inseridas duas curvas de 45°, no início e no final da cachoeira e todos os tubos foram colocados diretamente sobre o solo.

Município: Três Coroas (120 km de Porto Alegre)

Distrito: Rodeio Bonito

Turbina: Wirz (tipo Pelton)

$Q = 8,21 \text{ l/s}$

$n = 1000 \text{ RPM}$

$H = 65 \text{ m}$

$N = 5 \text{ kW}$

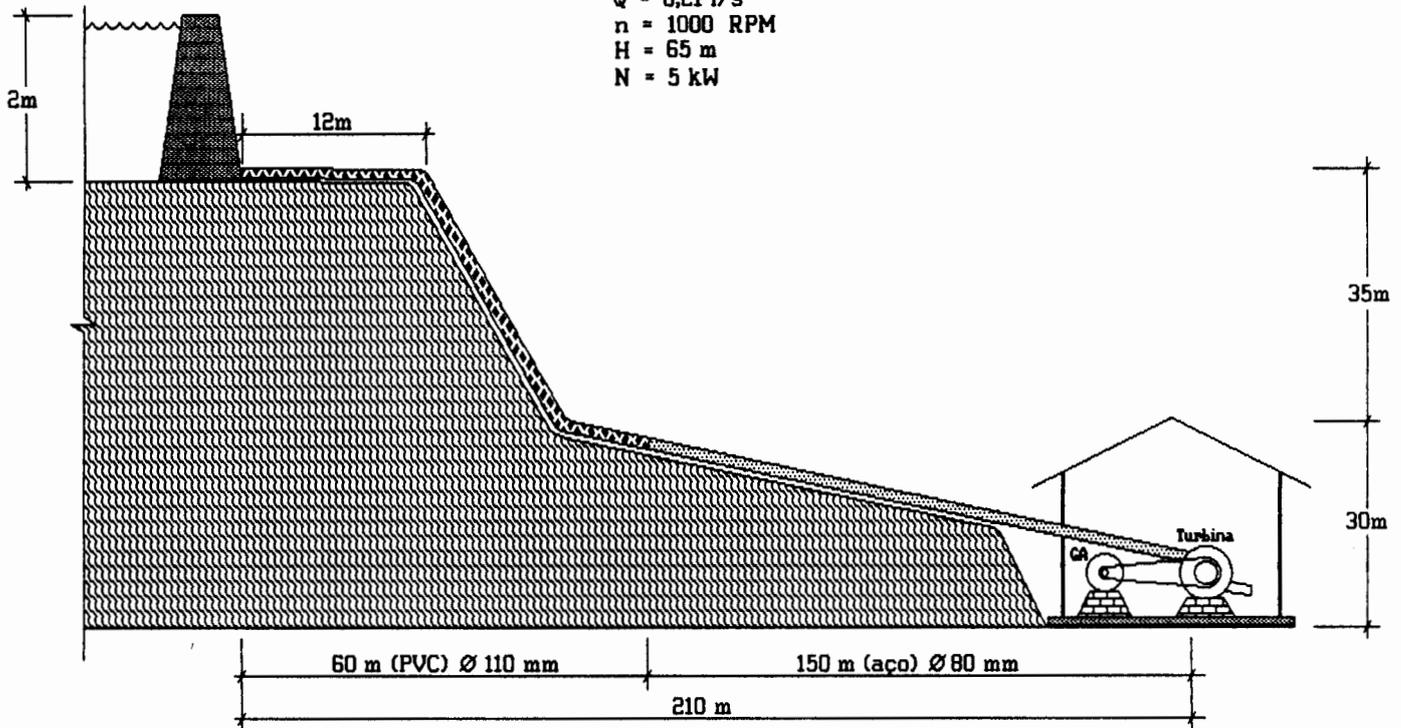


Fig. 5.1 - Diagrama Esquemático da Microusina - Unidade II

5.2 - Captação

A tomada de água está plenamente incorporada à barragem e seu equipamento consta do seguinte:

a) Grades de Proteção: tem a finalidade de interceptar material sólido carregado pelo riacho. São constituídas por painéis de barras de seção circular com espaçamento de 10 mm.

b) Válvula tipo Gaveta: tem a função de abrir e fechar a admissão da água no conduto forçado. A válvula está localizada logo abaixo da barragem e sua instalação é absolutamente necessária, embora possa elevar os custos da microusina, devido à impossibilidade de se colocar uma comporta na barragem.

5.3 - Dimensionamento Hidráulico

5.3.1 - Seleção do Diâmetro Adequado

Teoricamente, o diâmetro mais econômico é aquele em que a relação benefício/custo é máxima. Entende-se por benefício o valor da energia a ser produzida durante toda a vida útil da

central e por custo, a soma dos custos de materiais, montagem, manutenção, juros e amortizações. É, portanto, o diâmetro em que um acréscimo de dimensão, resultando em menores perdas hidráulicas e, conseqüentemente, maior potência instalada, promove benefícios que não compensem o acréscimo do custo.

Dado às dificuldades na obtenção de uma fórmula exata que considere todos os parâmetros acima mencionados, alguns deles complexos e de difícil determinação e, principalmente, em trabalhos de microcentrais, recomenda-se o uso, sem grandes erros como o econômico, o diâmetro calculado pela equação 4.1.

Um programa para computador, escrito em linguagem basic, que mostra em detalhes métodos de cálculo para minimizar os custos de instalação de μ CH's, é apresentado no Anexo I.

Como já abordado anteriormente, a velocidade máxima recomendada [1,3,6] é de 5 m/s. Considerando-se que a tubulação de aço é velha (material doado) e a superfície interna já apresenta rugosidades em consequência da corrosão do material, optou-se por uma velocidade de 2 m/s.

A vazão média do córrego, determinada por [7], corresponde a 8,21 l/s.

Portanto, com esses dados pode-se determinar o diâmetro

econômico, através da equação 4.1.

$$d_e = 1,13 \sqrt{\frac{0,0082 \text{ m}^3/\text{s}}{2 \text{ m/s}}}$$

$$d_e = 0,073\text{m} = 73 \text{ mm}$$

Como o tubo de 73 mm não é produzido comercialmente, optou-se por um imediatamente superior, ou seja, 80 mm e recalculou-se a velocidade a partir da equação 4.1:

$$0,08 = 1,13 \sqrt{\frac{0,0082 \text{ m}^3/\text{s}}{V}}$$

de onde obtém-se:

$$V = 1,64 \text{ m/s}$$

5.3.2 - Queda Líquida e Perdas de Carga

A queda líquida resulta da diferença entre a queda bruta e as perdas de carga no conduto forçado, como mostra a equação 4.2.

A queda bruta foi determinada através de um clinômetro

[7] e corresponde a 65 m.

As perdas individuais são calculadas como segue:

1 - Perda de Carga nas Grades

Para o cálculo da perda de carga nas grades utilizam-se as equações 4.3 e 4.4.

portanto:

$$\xi_r = 2,42 \operatorname{sen} 90^\circ \left(\frac{0,5}{0,1} \right)^{4/3}$$

$$\xi_r = 0,96$$

$$h_r = 0,96 \frac{(1,64)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_r = 0,13 \text{ m}$$

2 - Perda de Carga na Entrada

Para o cálculo da perda de carga na entrada utiliza-se a equação 4.5, onde ξ_E (coeficiente de perda) depende da forma de entrada.

No caso em questão a entrada é brusca, portanto, $\xi_E = 0,50$ [8].

portanto:

$$h_E = 0,5 \frac{(1,64)^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_E = 0,07 \text{ m}$$

Como se pode verificar, a perda de carga é praticamente

desprezível. Isto deve-se à pequena velocidade no duto forçado.

3 - Perda de Carga nas Curvas

No duto forçado foram usadas duas curvas de 45° , como já foi citado.

Para determinar a perda de carga nas curvas utiliza-se a equação 5.1.

$$h_c = \xi_c \frac{V^2}{2g} \quad (5.1)$$

onde: ξ_c = coeficiente de perda de carga; depende do ângulo da curva (Tabela 5.1)

V = velocidade dentro do tubo (m/s)

α	10°	15°	$22,5^\circ$	30°	45°	60°	90°
ξ_c	0,044	0,062	0,154	0,165	0,320	0,684	1,265

Tabela 5.1 - Coeficiente de perda de carga em curvas [3]

Para o caso em questão $\alpha = 45^\circ$, assim $\xi_c = 0,320$.

portanto:

$$h_c = 0,32 \frac{1,64^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_c = 0,04 \text{ m}$$

4 - Perda de Carga por Atrito

A perda de carga por atrito no tubo de alta pressão é a mais significativa de todas as perdas individuais devido ao comprimento dos tubos.

Na determinação da perda de carga por atrito, usam-se as equações 4.6 e 4.7.

Na equação 4.7, o parâmetro K pode assumir diversos valores, conforme mostra a Tabela 5.2.

Material	K
aço (tubos novos)	1,5 m
ferro fundido	2,5 m
aço (usado, corroído)	5,0 m
aço (corroído, depois de bastante tempo sem uso)	7,0 m
plástico (PVC)	0,5 m

Tabela 5.2 - Determinação do parâmetro K da equação 4.7, para o cálculo das perdas de carga por atrito [3]

Na determinação das perdas de carga por atrito na tubulação forçada, o problema foi dividido em duas partes: primeiro a tubulação de PVC de 60 m de comprimento, diâmetro interno de 100 mm e velocidade de 1,05 m/s; segundo, a tubulação de aço de 150 m de comprimento, diâmetro interno de

80 mm e velocidade da água de 1,64 m/s.

- Determinação da perda de carga nos tubos de PVC:

Pela tabela 5.2, obtém-se o valor de K para tubos de PVC que é 0,5 m. Então, aplica-se a equação 4.7, como segue:

$$\lambda = 0,01 \left(\frac{0,5}{0,1} \right)^{0,194}$$

$$\lambda = 0,0124$$

Agora aplica-se a equação 4.6, para o cálculo das perdas de carga nos tubos de PVC:

$$h_{\Delta} = 0,0124 \frac{60}{0,1} \frac{(1,05)^2}{2 \cdot 9.81}$$

$$h_{\Delta} = 0,42 \text{ m}$$

- Determinação das perdas de carga nos tubos de aço:

Pela tabela 5.2, obtém-se o valor de K para tubos de aço que é 7,0 m. Então, aplica-se a equação 4.7, como segue:

$$\lambda = 0,01 \left(\frac{7,0}{0,08} \right)^{0,194}$$

$$\lambda = 0,018$$

Agora aplica-se a equação 4.6, para o cálculo das perdas de carga nos tubos de aço:

$$h_{\Delta} = 0,018 \frac{150}{0,08} \frac{(1,64)^2}{2 \cdot 9.81}$$
$$h_{\Delta} = 4,68 \text{ m}$$

Efetuando a soma de todas as perdas no duto forçado resulta:

$$\Delta h = 0,13 + 0,07 + 0,04 + 0,42 + 4,68$$

$$\Delta h = 5,34 \text{ m}$$

Portanto, a queda líquida da microcentral, pela equação 4.2, é:

$$H = 65 - 5,34$$

$$H = 59,66 \text{ m}$$

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 - Principais Conclusões

A existência de comunidades isoladas que representam pequenas cargas distribuídas em grandes áreas não justifica economicamente a construção de redes de distribuição. Estes pequenos centros poderão ser atendidos, quando as condições geográficas o permitirem, mediante a utilização de pequenas quedas de água.

Através deste trabalho mostrou-se como é possível eletrificar uma comunidade rural de baixa renda, bastando apenas uma política dirigida neste sentido.

Após a construção das Unidades I e II, que atendem propriedades rurais (minifúndios de baixa renda), pode-se concluir que a sistemática para implantação de μ CH's no Rio Grande do Sul é a seguinte:

- Localização;

- Estudo sócio-econômico que compreende: capacidade de pagamento da comunidade, retorno do capital investido, expectativa da comunidade em relação à microusina e treinamento de pessoal;

- Projeto hidráulico envolvendo: topografia, levantamento de reservas hídricas e determinação da vazão;

- Plano político para solicitação de recursos e apoio;

- Construção da central;

- Avaliação do funcionamento: geração, regulação e transmissão da energia elétrica.

A unidade I possui linhas de transmissão com comprimento de 3 km, uma microcentral de 10 kW e atenderá a 16 residências. A unidade II possui linhas de transmissão com comprimento de 2 km, uma microcentral de 5 kW e atenderá a 10 residências.

Os geradores instalados nas duas unidades são do tipo de indução. Optou-se por este tipo de gerador por ser de

construção simples e de custo consideravelmente inferior, comparado com o gerador síncrono ou de corrente contínua. Entretanto, não tem sido utilizado mais amplamente devido às dificuldades que apresenta quanto a regulação de tensão e frequência quando não está ligado à uma rede elétrica e que esta possa assumir o controle. Tais problemas de regulação podem ser atualmente amenizados mediante equipamentos eletrônicos tendo estes, porém, a desvantagem de não terem ainda a confiabilidade exigida.

6.2 - Continuação do Trabalho

Os próximos passos da linha de pesquisa em μ CH deverão ser a associação de micro geradores assíncronos com controle eletrônico de tensão e frequência, bem como melhorar a confiabilidade do funcionamento deste tipo de controle e a construção e instalação de protótipos isolados da rede de distribuição.

No local onde está instalada a Unidade II, que apresenta atualmente altura de queda de 65 m, é possível alcançar alturas de até 200 m. Em vez de se instalar apenas uma unidade é aconselhável o uso de 3 unidades interligadas.

As vantagens desta substituição são imediatas:

a) facilidade de manutenção e transporte das unidades no local de difícil acesso como é o caso em questão;

b) Continuidade da geração no caso de alguma unidade defeituosa;

c) Substituição da tubulação forçada, que é pesada e onerosa, por uma linha de transmissão elétrica;

d) Não necessita barragem de grande porte ou chaminé de equilíbrio;

e) expansão do sistema de geração de acordo com as necessidades sem custo inicial elevado;

f) associação de geração hidroelétrica com outras distintas;

g) centro de controle único, modulado e simples;

h) disponibilidade das partes no mercado convencional como é o caso de conjunto de moto bombas.

Por outro lado, o autor sugere que seja implementado nessa comunidade de 26 residências que será beneficiada com as μ CH's, um novo conceito de demanda, chamado "demanda orientada", que permitirá a participação e o controle da comunidade na instalação, operação e manutenção de sua própria fonte de energia. Em relação ao consumo, a demanda orientada permite no máximo 1 kW por residência, garantindo iluminação, refrigeração, rádio e televisão. O aquecimento deve ser

provido por outras formas de energia de conversão mais direta. Desta forma, pretende-se observar o comportamento da comunidade com relação ao uso limitado de energia e estabelecer-se o abastecimento energético para redes de eletrificação rural de baixo custo. Desta forma a energia torna-se facilmente disponível sem grandes investimentos e sem haver necessidade das caras linhas de transmissão e distribuição.

As duas unidades de μ CH's descritas neste trabalho serão conectadas com a rede de distribuição de energia elétrica para que se possa acompanhar, durante o período de um ano, o comportamento do conjunto geração, conexão, distribuição e consumo, tanto no aspecto técnico como social.

BIBLIOGRAFIA

01. SOUZA, ZULCY DE; FUCHS, RUBENS DARIO; SANTOS, AFONSO HENRIQUES MOREIRA; **Centrais Hidro e Termelétricas**. Editora Edgard Blücher LTDA., 1983.
02. MANUAL DE MINICENTRAIS HIDROELÉTRICAS; Publicação do Ministério das Minas e Energia. **Eletrobras - DNAEE**, 1985.
03. Taller Subregional Sobre Micro-Centrales Hidroelectricas; Publicação **UNESCO-GTZ**. Montevideo, 1990.
04. FISH, LORIVAN; **Metodologia de Aproveitamento de Pequenas Bacias Hidrográficas para Geração de Energia para o Meio Rural**. Porto Alegre. Dissertação (Mestr. Eng.) UFRGS, 1983.
05. COSTA, ENNIO CRUZ DA; **Mecânica dos Flúidos**. Editora Globo 1973.
06. MANUAL DE MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS; Publicação do Ministério das Minas e Energia. **Eletrobras - DNAEE**, 1985.

07. HAAS, GILBERTO: **Contribuição ao Estudo do Aproveitamento de Microcentrais Hidroelétricas de Baixa Vazão, Para Uso Comunitário.** Porto Alegre. Dissertação (Mestr. Eng.) UFRGS, 1984.
08. MACINTYRE, ARCHIBALD JOSEPH: **Máquinas Motrizes Hidráulicas.** Editora Guanabara Dois S.A., 1983.]
09. SCHREIBER, GERHARD P.: **Usinas Hidroelétricas.** Editora Edgard Blücher LTDA., 1981.
10. BRAN, RICHARD & SOUZA, ZULCY DE: **Máquinas de Fluxo.** Editora Ao Livro Técnico S.A., 1984.
11. MARTINEZ, G. B.: **Microcentral Hidrelétrica Rural.** Publicação EFEI, 1990.
12. MONTEIRO, FRANCISCO CARLOS: **Desenvolvimento de Turbina Banki Para Aplicação Rural.** Porto Alegre. Dissertação (Mestr. Eng.) UFRGS, 1984.
13. FARRET, F. A.; ALGARVE, A. S.; RIGHI, L. A.: Associação de Microgeradores Assíncronos sem Controle de Velocidade Para Cogeração de Energia Elétrica a Partir de Fontes Renováveis. **Revista Mundo Elétrico.** Editora Gruenwald, Janeiro - 1990.

14. CAPELETO, GILBERTO JOSÉ; FERREIRA, JORGE LUIZ; Chuveiros Elétricos - Influência no Sistema e Alternativas. I^o Concurso de Contribuições Técnicas - CONTEC. Publicação CEEE, Outubro-1987.
15. SOUZA, ZULCY DE; Dimensionamento de Máquinas de Fluxo. Editora Edgard Blücher Ltda., 1991.
16. GREGORIG, ROMANO; Máquinas Hidráulicas. Universidade de Minas Gerais, 1960.
17. WEVER, HERMANN H. & CAMARGO, JOSÉ VICENTE J. DE; Perfil Energético Brasileiro. Revista IPESI, Março/Abril - 1990.
18. NRECA, MICRO-HYDROPOWER SOURCEBOOK; A Practical Guide to Design and Implementation in Developing Countries. SDH Publication, USA, 1986.
19. FARRET, FELIX ALBERTO; MICHELS, ADEMAR; BUENO, JORGE O.; Tecnologia Alternativa Para Microcentrais Elétricas Através de NUDEMI's. I Taller Subregional Sobre Microcentrales Hidroeléctricas, Montevideo - Uruguai, Noviembre, 1990.
20. POTESS, E. SANTO; Centrales Eléctricas. Editorial Gustavo Gili S.A., Barcelona, 1971.

21. BUENO, JORGE OMAR: *Geração Assíncrona com Controle Eletrônico de Velocidade e Tensão pela Carga Baseado em Microprocessadores*. Santa Maria. Dissertação (Mestr. Eng.) UFSM, 1991.

ANEXO I

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O DIMENSIONAMENTO DE
MICROCENTRAIS HIDROELÉTRICAS

O programa computacional apresentado neste anexo foi desenvolvido em linguagem BASIC, elaborado conjuntamente com o Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria e visa estabelecer um método computacional para determinação de parâmetros para minimizar custos e otimizar equipamentos.

```
10 PRINT" VAZAO DO RIO (METROS CUBICOS/SEG):":INPUT QR
20 PRINT" DESNIVEL (METROS):": INPUT H
30 PRINT" COMPRIMENTO DO CONDUTO (METROS):":INPUT LC
40 PRINT" RENDIMENTO DA TURBINA (VALOR UNITARIO):":INPUT T
45 PRINT" COEFICIENTES DE PERDAS HIDRAULICAS (K):": INPUT K
50 PRINT" PREÇO UNITARIO DO CONDUTO (U$ POR KG):":INPUT PW
60 PRINT" FRC DO CONDUTO (FATOR UNITARIO):":INPUT FC
70 PRINT" ESPESSURA DO CONDUTO (MILIMETROS):":INPUT EC
80 PRINT" PREÇO UNITARIO DAS MAQUINAS (U$/KG):":INPUT PG
```

```
90 PRINT" FRC DAS MAQUINAS ELETRICAS (FATOR UNITARIO):":INPUT
  FM
100 PRINT" PERDA ELETRICA (ADIMENSIONAL):": INPUT KF
110 PRINT" PREÇO DO KWH (U$/KWH):":INPUT PH
120 PRINT" FRC DAS LINHAS DE TRANSMISSAO (FATOR
  UNITARIO):":INPUT FL
130 PRINT" PREÇO UNITARIO DAS LINHAS DE TRANSMISSAO
  (U$/KG):":INPUT PR
140 PRINT" COMPRIMENTO DAS LINHAS DE TRANSMISSAO
  (METROS):":INPUT LF
160 PRINT" CUSTO DE OBRAS CIVIS, ELETRONICAS E OUTROS
  (U$):":INPUT CC
170 GLS
180 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:
190 PRINT" INTERVALO DE VARIAÇÃO DO DIAMETRO DO CONDUTO
  (METROS) E"
200 PRINT" INCREMENTO A SER USADO PARA INVESTIGAR O
  INTERVALO (D1,"
205 PRINT" D2,INCREMENTO)": INPUT M,O,Y
210 PRINT:PRINT:PRINT
220 PRINT" INTERVALO DE VARIAÇÃO DA AREA DA SEGAO DA LINHA
  (MILIMETROS"
225 PRINT" QUADRADOS) E INCREMENTO A SER USADO PARA
  INVESTIGAR O INTER-"
230 PRINT" VALO (A1,A2,INCREMENTO)":INPUT P,Q,C
250 PRINT:PRINT:PRINT
```

```
251 REM
255 REM  O INTERVALO DA VARIÁVEL X PODE SER QUALQUER INTERVALO
      ENTRE
256 REM  OS VALORES D E 2.
258 REM
260 PRINT"  INTERVALO DE VARIAÇÃO DE X (VARIÁVEL  PARAMETRICA
      DE CALCULO"
270 PRINT"  DA VAZAO DE PROJETO) E INCREMENTO A SER USADO PARA
      INVESTI-"
280 PRINT"  GAR O INTERVALO (X1,X2,INCREMENTO)": INPUT I,J,B
290 CLS:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:
      PRINT:PRINT
300 PRINT"                                AGUARDE! ESTA PROCESSANDO."
310 FOR X=1 TO J STEP B
312 IF X=0 THEN GOTO 574
320 FOR A=P TO Q STEP C
322 IF A=0 THEN GOTO 572
330 FOR D= M TO O STEP Y
332 IF D=0 THEN GOTO 570
340 QC=SQR((D^5)*H/(K*LC))
350 QM=(QC*QR)/(QC+QR)
360 QP=QM*(1-(1/2.7182818#^X))
370 A1=0
380 A2=7870*LC*3.1416*EC*(1/10^3)
390 A3=A2*EC*(1/10^3)
400 PC=((D^2*A1)+(A2*D)+A3)*LC*PW*FC*(QR+QC)/(QR+(QC*
```

```

      (1/2.7182818#^X)))
410 N=(1-((1-(1/2.7182818#^X))^2))*(1-(1/2.7182818#^X))*H*QM*
      T*9.810001
420 PM=(N^.75*6*PG*FM*(QR+QC)/(QR+(QC*(1/2.7182818#^X))))
430 PM= PM + (N^.75*3*KF*PH*8760)
440 PL=(PR*LF*8960*(1/10^6)*A*FL*(QR+QC))/(QR+(QC*
      (1/2.7182818#^X)))
450 PL=PL + (N^2*LF*PH*8760*1000/(535^2*58*A))
460 E=CV
470 CV=(CC+PG+PM+PL)/N
480 EE=E
490 IF CV<EE THEN E=CV
500 IF CV<EE THEN AA=D
510 IF CV<EE THEN BB=A
520 IF CV<EE THEN DD=N
530 IF CV<EE THEN FF=QP
540 IF CV<EE THEN GG=E
550 IF EE=0 THEN GOTO 570
560 IF CV>EE THEN CV=E
570 NEXT D
572 NEXT A
574 NEXT X
580 CLS:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
590 PRINT"                                P R O C E S S O U !"
600 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
610 PRINT"  DIAMETRO OTIMO DA TUBULAÇÃO:"PRINT AA

```

```
620 PRINT" BITOLA OTIMA DO FIO:":PRINT BB
630 PRINT" VALOR DA POTENCIA NOMINAL OTIMA:": PRINT DD
640 PRINT" VAZAO OTIMA DE PROJETO:":PRINT FF
650 PRINT" CUSTO ANUAL POR KVA INSTALADO:":PRINT GG
660 PRINT:PRINT:PRINT
670 PRINT" PARA REDIMENCIONAR OS INTERVALOS E INCREMENTOS
TEGLE 1.":PRINT
680 PRINT" PARA SAIR DO PROGRAMA TECLE 0." :INPUT Z
685 CLS
690 IF Z=1 THEN GOTO 180 ELSE END
```