

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL
PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE TURBINAS PARA MICRO,
MINI E PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

DENISE BARROS ALEXANDRE

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Janeiro – 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL
PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE TURBINAS PARA MICRO,
MINI E PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

DENISE BARROS ALEXANDRE

Orientador: Prof. Dr. Nelson Miguel Teixeira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Janeiro – 2004

REPRODUÇÃO
AUTORIZADA

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Alexandre, Denise Barros, 1974-

A381d Desenvolvimento de sistema computacional para pré-di-
mensionamento de turbinas para micro, mini e pequenas
centrais hidrelétricas / Denise Barros Alexandre. --
Botucatu, [s.n.], 2004.

xv, 110 f. : il. color., gráfs., tabs.

Dissertação (mestrado) -- Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas.

Orientador: Nelson Miguel Teixeira.

Inclui bibliografia.

1. Turbinas hidráulicas. 2. Usinas hidrelétricas.
I. Teixeira, Nelson Miguel. II. Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu)
Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

Palavras-chave: Sistema computacional; PCH.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO
DE TURBINAS PARA MICRO, MINI E PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS"

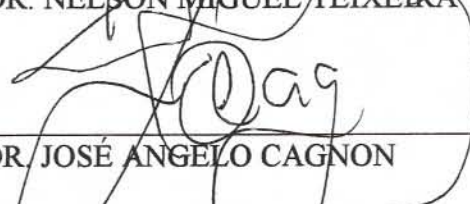
ALUNA: DENISE BARROS ALEXANDRE

ORIENTADOR: PROF. DR. NELSON MIGUEL TEIXEIRA

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. NELSON MIGUEL TEIXEIRA



PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON



PROF. DR. ISIDORO CASAL CAMINHA JUNIOR

Data da Realização: 30 de janeiro de 2004.

Dedico

*À minha família, pelo apoio inigualável, amor também inigualável,
e por todas as coisas boas que me desejam sempre.*

*Ao meu amor, Elson, por estar ao meu lado todos os dias — sejam dias de sol, ou não;
construindo a nossa vida a dois.*

*A duas amigas muito especiais: Iara, por se a melhor “amiga de fé e irmã camarada”;
e à Keila, que conseguiu o milagre de me fazer “ver no escuro”.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Nelson Miguel Teixeira, pela orientação e pelas coisas tão preciosas que me proporcionou: amizade, compreensão, apoio e incentivo.

À FCA-Unesp e ao curso de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os professores e funcionários que conheci neste período, pela sua contribuição na realização deste estudo.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação em Agronomia, pela amizade tão acolhedora.

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO.....	1
SUMMARY	3
2 INTRODUÇÃO	5
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
3.1 Considerações sobre Micro, Mini e Pequenas Centrais Hidrelétricas.....	8
3.1.1 Histórico de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs, no Brasil.....	8
3.1.1.1 Cronologia dos estudos e projetos de PCHs	9
3.1.2 Programa Nacional de Pequenas Centrais Elétricas (PNCE)	14
3.1.2.1 Abrangência do Programa.....	15
3.1.3 Evolução no conceito de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).....	17
3.1.4 Classificação das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)	18
3.1.5 Micro, mini e pequenas centrais hidrelétricas no meio rural.....	20
3.1.6 Os benefícios da geração através de microcentrais hidrelétricas	20
3.2 Equipamentos Hidromecânicos	22
3.2.1 Sistema de Adução	22
3.2.2.1 Canal de Adução	23
3.2.2 Câmara de Carga (Castelo D'água).....	24
3.2.3 Tubulação	25
3.2.3.1 Tubulação de Adução.....	25
3.2.3.2 Tubulação Forçada.....	26
3.2.3.3 Blocos de Apoio (Sela) e de Ancoragem	27
3.2.4 Unidade Geradora.....	28
3.2.4.1 Turbinas Hidráulicas	28
3.2.4.2 Sistema de Regulação.....	38
3.2.4.2.1 Reguladores de Velocidade.....	39
3.2.4.2.2 Volantes de Inércia.....	40
3.2.4.3 Geradores Síncronos	40
3.2.5 Casa de Máquinas (Casa de Força).....	41

3.3 Estudos Hidrológicos, Topográficos e Geológicos	42
3.3.1 Estudos Hidrológicos.....	42
3.3.1.1 Verificação da vazão.....	43
3.3.2 Estudos Topográficos	43
3.3.3 Estudos Geológicos	44
3.4. O uso da informática como ferramenta de apoio	44
4 MATERIAL	46
4.1 Projeto do sistema computacional	47
5 MÉTODOS.....	49
5.2 Verificação dos dados de entrada do sistema computacional.....	50
5.2.1 Verificação da queda líquida e vazão	51
5.2.3 Verificação da altitude.....	51
5.3 Método para dimensionamento preliminar hidrodinâmico.....	54
5.3.1 Roteiro para dimensionar turbinas hidráulicas do tipo Francis, Kaplan e Pelton.....	54
5.3.1.1 Passo 1 do roteiro: dados de entrada	55
5.3.1.2 Passo 2 do roteiro: cálculo da rotação específica da turbina.....	55
5.3.1.3 Passo 3 do roteiro: cálculo do rotor.....	57
5.2.1.4 Passo 4 do roteiro: cálculo da caixa espiral	66
5.2.1.5 Passo 5 do roteiro: cálculo das dimensões do tubo de sucção	68
5.2.1.6 Passo 6 do roteiro: cálculo da altura máxima de sucção.....	70
5.2.1.7 Passo 7 do roteiro: cálculo do rendimento e potência.....	71
5.3.2 Roteiro para dimensionar turbina hidráulica do tipo Michell-Banki.....	72
5.3.2.1 Passo 1 do roteiro: cálculo da potência no eixo da turbina	72
5.3.2.2 Passo 2 do roteiro: cálculo da rotação da turbina (n), em rpm.....	72
5.3.2.3 Passo 3 do roteiro: cálculo do rotor.....	72
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
6.1 Fluxogramas dos dimensionamentos realizados pelo sistema computacional	74
6.1.1 Turbinas Francis, Kaplan e Pelton: cálculo dos rendimentos da turbina e potências	75

6.1.2 Turbinas tipo Francis, Kaplan e Pelton: cálculo da rotação específica da turbina	76
6.1.3 Turbinas tipo Francis e Kaplan: cálculo da rotação específica do rotor.....	77
6.1.4 Turbinas tipo Francis: cálculo do rotor e tubo de sucção	78
6.1.5 Turbinas tipo Kaplan: cálculo do rotor e tubo de sucção	79
6.1.6 Turbinas tipo Francis: cálculo da caixa espiral	80
6.1.7 Turbinas tipo Kaplan: cálculo da caixa espiral.....	81
6.1.8 Turbinas tipo Francis e Kaplan: cálculo da altura máxima de sucção.....	82
6.1.9 Turbina tipo Michel-Banki: cálculo da potência	83
6.1.10 Turbina tipo Michel-Banki: cálculo da rotação	84
6.1.11 Turbina tipo Michel-Banki: cálculo do rotor.....	85
6.2 Manual de Utilização do Sistema de Dimensionamento	86
6.2.1 Menu Principal.....	86
6.2.2 Entrada de dados principais.....	88
6.2.3 Tela de resultados	88
6.3. Validação do sistema computacional.....	91
6.3.1 Obtenção de dados de resultados.....	91
6.3.1.1 Estudo de caso para a turbina Francis	91
6.3.1.2 Estudo de caso para a turbina Kaplan	93
6.3.1.3 Estudo de caso para a turbina Pelton.....	94
6.3.2 Confronto entre a Turbina Michell-Banki e Francis através da potência versus vazão.....	96
7 CONCLUSÃO.....	101
Quanto ao confronto entre a turbina Michell-Banki e Francis, através da potência versus vazão:	101
Quanto aos aspectos gerais	102
Quanto ao sistema computacional	102
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE	107
Anexo 1 - Uso de Fluxogramas	107

1.1 Simbologia utilizada	108
Anexo 2 - Tabela do cálculo da potência no eixo da turbina Michell-Banki	109

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1 – Situação das PCHs no Brasil	13
Quadro 2 – Características e Limites das PCHs	19
Quadro 3 – Classificação de PCHs conforme potência instalada e queda de projeto	19
Quadro 4 – Inclinação “m” para os diversos tipos de terreno	24
Quadro 5 – Classificação de turbinas de acordo com faixas de quedas.	31
Quadro 6 – Campo de aplicação das turbinas não convencionais.....	32
Quadro 7 – Dados fornecidos ao sistema	55
Quadro 8 – Intervalos de rotação específica para turbinas hidráulicas	56
Quadro 9 – Simbologia usada nos fluxogramas do sistema	108

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Dados de entrada para simulação de dimensionamento de turbina Francis	91
Tabela 2 – Resultados obtidos na simulação de dimensionamento de Turbina Francis	91
Tabela 3 – Dados de entrada para simulação de dimensionamento de turbina Kaplan	93
Tabela 4 – Resultados obtidos na simulação de dimensionamento de Turbina Kaplan.....	93
Tabela 5 – Dados de entrada para simulação de dimensionamento de turbina Pelton.....	94
Tabela 6 – Resultados obtidos na simulação de dimensionamento de Turbina Pelton	94
Tabela 7 – Potência versus vazão, em função da queda, para a turbina Michell-Banki.	96
Tabela 8 – Equações da linha de tendência das curvas do gráfico da Figura 44.....	97
Tabela 9 – Potência versus vazão, em função da queda, para a turbina Francis.	98
Tabela 10 – Equações da linha de tendência das curvas do gráfico da Figura 45.....	99
Tabela 11 – Razão entre potências das turbinas Michell-Banki e Francis.....	100
Tabela 12 – Cálculo da potência no eixo da turbina Michell-Banki	109

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Canal de adução com inclinação “m”	24
Figura 2 –Foto de um conduto forçado	27
Figura 3 – Foto de uma Unidade Geradora com turbina Francis	28
Figura 4 – Ábaco para seleção de turbinas aplicáveis a microcentrais hidrelétricas	33
Figura 5 – Ábaco para seleção de turbinas - campo de utilização da turbina Pelton	34
Figura 6 – Ábaco para seleção de turbinas - campo de utilização da turbina Banki.....	35
Figura 7 – Ábaco para seleção de turbinas - campo de utilização da turbina Francis Caixa Aberta	36
Figura 8 – Ábaco para seleção de turbinas - campo de utilização da turbina Francis Caixa Espiral.....	37
Figura 9 – Foto com destaque para o regulador de velocidade	39
Figura 10 – Foto com destaque para o volante de inércia	40
Figura 11 – Foto com destaque para o gerador de uma turbina hidráulica	41
Figura 12 – Esquema do processo de implantação de PCH	50
Figura 13 – Esquema para geração hidráulica.....	51
Figura 14 – Definição da altura geométrica de sucção.....	53
Figura 15 – Esquema da sucção de uma turbina de eixo horizontal	54
Figura 16 – Dimensões do rotor e caixa espiral da turbina Francis	60
Figura 17 – Detalhe do rotor da turbina Francis	60
Figura 18 – Dimensões do rotor e caixa espiral da turbina Kaplan	61
Figura 19 – Rotor da turbina Kaplan.....	61
Figura 20 – Dimensões das pás ou conchas da turbina Pelton	63
Figura 21 – Rotor da turbina Pelton	64
Figura 22 – Dimensões do injetor da turbina Pelton	64
Figura 23 – Turbinas Pelton de 1 jato e 2 jatos	65
Figura 24 – Caixa Espiral da turbina hidráulica.....	67
Figura 25 – Turbina Francis de eixo horizontal e caixa espiral de chapa soldada, com destaque do rotor	67

Figura 26 – Dimensões do Tubo de Sucção da Turbina Francis	69
Figura 27 – Dimensões do Tubo de Sucção da Turbina Kaplan	70
Figura 28– Fluxograma: Turbinas Francis, Kaplan e Pelton - rendimentos da turbina e potências	76
Figura 29 – Fluxograma: Turbinas Francis, Kaplan e Pelton – rotação específica da turbina....	77
Figura 30 – Fluxograma: Francis, Kaplan e Pelton - rotação específica do rotor	78
Figura 31 – Fluxograma: Turbinas Francis e Kaplan – cálculo do rotor e tubo de sucção	79
Figura 32– Fluxograma: Turbina Kaplan - cálculo do rotor e tubo de sucção.....	79
Figura 33– Fluxograma: Turbina Francis - cálculo da caixa espiral	80
Figura 34 – Fluxograma: Turbina Kaplan - cálculo da caixa espiral	81
Figura 35 – Fluxograma: Turbinas Francis e Kaplan – altura máxima de sucção	82
Figura 36 – Fluxograma: Turbina tipo Michel-Banki - potência	83
Figura 37 – Fluxograma: Turbina tipo Michel-Banki - rotação da turbina.....	84
Figura 39 - Tela de entrada dos dados.....	87
Figura 40 - Campos de entrada de dados.....	88
Figura 41 - Mensagem de alerta para campos de entrada de dados	88
Figura 42 - Tela dos dados auxiliares para cálculo das dimensões da turbina.....	89
Figura 43 - Tela dos dados das dimensões das Turbinas.....	90
Figura 44 – Gráfico da potência versus vazão, para a turbina Michell-Banki	97
Figura 45 – Gráfico de Potência versus vazão – turbina Francis	98

LISTA DE EQUAÇÕES

	Página
Equação (1).....	52
Equação (2).....	55
Equação (3.a).....	56
Equação (3.b).....	56
Equação (4.a).....	56
Equação (4.b).....	56
Equação (5).....	57
Equação (6).....	57
Equação (7).....	57
Equação (8).....	57
Equação (9).....	57
Equação (10).....	58
Equação (11).....	58
Equação (12).....	58
Equação (13).....	58
Equação (14).....	58
Equação (15).....	59
Equação (16).....	59
Equação (17).....	59
Equação (18).....	59
Equação (19).....	59
Equação (20).....	59
Equação (21).....	60
Equação (22).....	61
Equação (23).....	61
Equação (24).....	62
Equação (25).....	62

Equação (26.a).....	62
Equação (26.b).....	62
Equação (26.c).....	62
Equação (26.d).....	62
Equação (26.e).....	62
Equação (26.f).....	62
Equação (27).....	63
Equação (28).....	63
Equação (29).....	63
Equação (30).....	64
Equação (31).....	64
Equação (32).....	64
Equação (33).....	66
Equação (34).....	66
Equação (35).....	66
Equação (36).....	66
Equação (37).....	66
Equação (38.a).....	68
Equação (38.b).....	68
Equação (38.c).....	68
Equação (39).....	68
Equação (40).....	68
Equação (41).....	68
Equação (42).....	70
Equação (43).....	70
Equação (44).....	71
Equação (45).....	71
Equação (46).....	71
Equação (47).....	71
Equação (48).....	72

Equação (49).....	72
Equação (50).....	72
Equação (51).....	73
Equação (52).....	73
Equação (53).....	73
Equação (54).....	73
Equação (55).....	73
Equação (56).....	73
Equação (57).....	73

1 RESUMO

O Brasil é o país que possui uma das maiores reservas mundiais de hidroenergia, em razão da quantidade imensa de rios em seu território. Em diversas áreas isoladas, tais como grupos populacionais dispersos em áreas rurais, a mais importante alternativa de produção e utilização de energia renovável é representada pelas Micro, Mini e Pequenas Centrais Hidrelétricas, que promovem oferta de energia elétrica utilizando pequenos aproveitamentos hidroenergéticos.

Para pequenos aproveitamentos, o projetista de uma central hidrelétrica deve, ao definir o tipo de turbina hidráulica, fixar-se nos rotores Pelton, Francis e Kaplan e nas turbinas Banki, por serem os mais frequentemente encontrados na prática usual.

O projeto destes aproveitamentos hidroenergéticos requer muitos detalhes, regras e cálculos matemáticos que exigem tempo e conhecimento do assunto, tornando desejável uma ferramenta que forneça, de forma rápida e clara, a informação sobre os dados envolvidos no dimensionamento de equipamentos. Na sociedade moderna, tal necessidade de informação é constantemente suprida pela informática, com o uso de softwares específicos para o assunto em foco. Com esta idéia, foi desenvolvido o presente trabalho,

considerando-se que a criação de um software que atende aos requisitos dos projetos de aproveitamentos hidroenergéticos executa o papel importante de ser uma ferramenta de desenvolvimento da eletrificação rural.

Este trabalho pretende, especificamente para geração de energia elétrica através de pequenas centrais hidrelétricas, estabelecer um roteiro completo para pré-dimensionar turbinas hidráulicas, implementar este roteiro em sistema computacional, e criar uma interface de software de fácil uso. A partir das variáveis: vazão do rio, altura de queda do rio, e altitude local, as quais são fornecidas pelo usuário do sistema computacional, são proporcionados os resultados: cálculo da rotação específica e altura máxima de sucção, esta para tratar do fator cavitação; rendimento e potência da turbina hidráulica, e as dimensões principais do rotor, caixa espiral e tubo de sucção.

Para a validação do sistema computacional, foram comparados os resultados obtidos através da simulação de situações experimentais, elaboradas por outros pesquisadores.

DEVELOPMENT OF COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATIONS OF THE DIMENSIONS OF TURBINES FOR MICRO, MINI AND SMALL HYDROELECTRIC POWER STATIONS. Botucatu, 2004. 109p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: DENISE BARROS ALEXANDRE

Adviser: NELSON MIGUEL TEIXEIRA

SUMMARY

Brazil is the country that possesses one of the largest world reservations of hydraulic power, in reason of the immense amount of rivers in its territory. In diverse isolated areas, such as dispersed population groups in rural areas, the most important alternative of production and use of renewable energy is represented by the Micro, Mini and Small Hydroelectric Power Stations, that promote offer of electric energy using small uses hydroelectric power.

For small uses, the planner of hydroelectric power plants, when defining the type of hydraulic turbine, to fix itself in the Pelton, Francis and Kaplan rotors and in the Banki turbines, for they be more frequently the found in the usual practice.

The project of these uses hydroelectric power requests many details, rules and mathematical calculations that demand time and knowledge of the subject, turning desirable a tool that supplies, in a fast and simple form, the information on the data involved in the sizing of equipment. In the modern society, such need of information constantly is supplied by computer science, with the use of specific software for the subject in focus. With this idea, the present work was developed, being considered that the creation of a software that assists to the requirements of the projects of uses hydroelectric power executes the important paper of being a tool of development of the rural electrification.

This work intends, specifically for generation of electric energy through small Hydroelectric Power Stations, to establish a complete guide of orientation for to

make initial calculations of the dimensions of hydraulic turbines, to implement this guide of orientation in computational system, and to create an interface of software of easy use.

Starting from the variables: outflow of the river, height of fall of the river, and local altitude, which is supplied by the user of the computational system, is proportionate the results: calculation of the specific rotation and maximum height of suction, this to deal with the factor cavitation; income and power of the hydraulic turbine, and the main dimensions of the rotor, box spiral and suction tube..

For the validation of the computer program, the results obtained through the simulation of experimental situations were compared, elaborated by other researchers.

Keywords: hydraulic, turbine, rotor, hydroelectric power plants, hydroelectric power station, software, computer program, Francis, Pelton, Kaplan, Michell-Banki.

2 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica de potências localizadas em áreas distantes dos centros de consumo, utilizando energia hidráulica, só foi possível devido ao desenvolvimento alcançado na área tecnológica, ligada à alta tensão e aos materiais utilizados na isolação da energia elétrica.

Atualmente, todo o sistema elétrico opera com uma margem de oferta inferior aos parâmetros internacionais de segurança, que é de 10% na oferta de energia em relação ao consumo. No Brasil, esse índice é de 5%, conforme ELETROBRÁS (1998).

Os últimos 50 anos foram marcados pela construção de grandes usinas, tendo em vista os recursos hidrológicos existentes, e demais benefícios técnico-econômicos. Atualmente, tais recursos encontram-se escassos e a oferta de energia elétrica, com a perspectiva de crescimento do mercado, torna-se um produto de grande preocupação.

As usinas em operação e em construção somam apenas cerca de 25% do potencial hidrelétrico. Portanto, estima-se que as fontes hidráulicas continuarão a desempenhar importante papel no atendimento à crescente demanda de energia elétrica, pelo menos ao longo das duas próximas décadas.

A fonte hídrica, com fins energéticos, é responsável por 96,8% da energia elétrica consumida no país. E, se considerarmos o mundo, a fonte hídrica será responsável apenas por 19% do total da geração de energia elétrica.

Os manuais de Micro, Mini e Pequenas Centrais Hidrelétricas foram elaborados através do convênio entre ELETROBRÁS E DNAEE (1985), sob a coordenação da primeira. Os manuais consolidaram a tecnologia nacional nesta área, e possibilitaram meios para a promoção de estudos, projeto, construção e operação destes tipos de centrais hidrelétricas a baixos custos, em curto espaço de tempo.

Segundo o Plano Decenal, as Pequenas Centrais Hidrelétricas representam a mais importante alternativa mundial de produção e uso localizado de energia renovável em relação aos sistemas energéticos centralizados, promovendo a ampliação da oferta de energia elétrica em áreas isoladas, pequenos centros agrícolas e industriais.

O Brasil, que chegou a contar com mais de 1.800 PCHs, gerando em torno de 1.110 MW, passou por um processo de desativação da geração descentralizada, resultando, até a década de 80, no abandono de mais de 1.400 PCHs. Nessa época, deu-se ênfase aos grandes empreendimentos, construindo grandes centrais hidrelétricas; coincidindo com o fechamento das pequenas, sob a alegação de serem antieconômicas. Em 1999, encontravam-se em operação 331 unidades, gerando 605 MW, ou seja, menos de 1% de toda a capacidade do país. É importante ressaltar que, no momento, o governo está incentivando a construção de PCHs.

As modernas tecnologias em máquinas e equipamentos rurais vêm trazendo cada vez mais a necessidade de um uso racional e planejado da energia no meio rural. A decisão sobre a utilização de fontes alternativas pode representar um fator técnico e econômico de enorme importância para a propriedade rural.

O desenvolvimento de um sistema computacional que possa analisar os dados apropriados de um recurso hídrico e, a partir de um processamento, oferecer uma saída de informações que sirvam de apoio a esta tomada de decisão serve como uma ferramenta ideal para favorecer os pequenos aproveitamentos hídricos.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um sistema computacional, em todas as suas fases de análise, projeto e programação, utilizando modelo

matemático para dimensionamento das turbinas hidráulicas Francis, Kaplan, Pelton e Michell-Banki, com o objetivo de realizar aproveitamentos energéticos. Pretende-se elaborar um estudo onde fiquem definidas as informações básicas para se desenvolver um sistema computacional para apoio à decisão de seleção de turbinas hidráulicas, de uma forma que possibilite também futuras implementações em outras linguagens de programação.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Considerações sobre Micro, Mini e Pequenas Centrais Hidrelétricas

3.1.1 Histórico de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs, no Brasil

As primeiras Centrais Hidrelétricas no Brasil foram instaladas no início do século, devido à industrialização no interior do país, principalmente através das indústrias têxteis. Até a década de 50, o Brasil apoiou a sua eletrificação nas pequenas e médias centrais, sendo estas pertencentes à iniciativa privada ou ao município. Foram criadas verdadeiras malhas com a interligação de pequenos sistemas municipais, visando o aumento da confiabilidade e melhor operação (SANTOS e BAJAY, 1986).

A política tarifária da época e uma inflação significativa passaram a inibir novos investimentos no setor elétrico. Tal fato, associado a outros de natureza política, fez com que o Estado começasse a ter maior participação no setor, garantindo a expansão do parque gerador (SANTOS e BAJAY, 1986).

Viana (1997) cita que, desta forma, o Brasil construiu Furnas no final da década de 50, sendo a primeira central brasileira a ter potência acima de 1.000 MW. Toda a filosofia de suprimento de energia elétrica estava sendo mudada, com o surgimento dos grandes sistemas elétricos de natureza estatal, ao invés dos pequenos sistemas com características regionais e pertencentes à iniciativa privada ou municipal.

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

A crise do petróleo de 1973, com o aumento acelerado do preço do mesmo, fez com que se despertasse para as novas fontes de energia, principalmente as renováveis. Diante desse contexto, o governo brasileiro, no início dos anos 80, estabeleceu diretrizes no sentido de acelerar o aproveitamento das fontes energéticas, com destaque para as PCHs. Desta maneira, ressurgia a discussão sobre PCHs, que estavam quase no esquecimento, conclui Viana (1997).

3.1.1.1 Cronologia dos estudos e projetos de PCHs

As cronologias acerca dos estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas, no Brasil, de 1980 a 1999, estão transcritas a seguir, conforme levantamentos realizados por Viana (1997) e ELETROBRÁS & ANEEL (2000).

A ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A., em convênio com o DNAEE, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, hoje ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, publicou, em 1982, a primeira versão do Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas, enquanto que, em maio de 1983, é realizado na EFEI o primeiro curso de PCH em um aproveitamento real, utilizando como orientação o citado manual, sob a coordenação da ELETROBRÁS.

Em junho de 1985, são editados os Manuais de Micro e Minicentraís Hidrelétricas, enquanto que, em Novembro do mesmo ano, inaugura-se na Escola Federal de Engenharia (EFEI) os laboratórios Hidro e Eletromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas (LHPCH-LEPCH). Estes laboratórios tinham a finalidade de testar, pesquisar e desenvolver máquinas hidráulicas e elétricas como turbinas e geradores, além de componentes hidráulicos e elétricos usados em PCHs. Várias turbinas de fabricantes nacionais foram testadas de 1986 a 1990, sendo que as pesquisas foram e estão sendo realizadas até os dias atuais.

Em outubro de 1987, foi assinada a Portaria nº 136, do DNAEE, que revoga a 109, reconceitua a PCH e reconhece os manuais de Micro, Mini e Pequenas Centrais Hidrelétricas.

De 1983 a 1988, foram realizados 8 cursos de PCHs, utilizando os manuais da ELETROBRÁS, sendo o último, em Abril/88, ministrado na EFEI para membros da Organização Latino Americana de Energia - OLADE. No período de 1988 a 1993, foram realizados cinco cursos de curta duração (40 horas), de Microcentrais Hidrelétricas.

Em novembro de 1994, a Portaria nº 776, do DNAEE, cria o Grupo de Trabalho para Avaliação da Oportunidade para Lançamento do Novo Programa para Implantação e Recuperação de PCH. O Grupo de trabalho encaminha ao Diretor Geral do DNAEE, em fevereiro de 1995, o relatório final acerca do assunto. Como consequência, a Lei nº 9074, de julho de 1995, estabelece em seu item II, do Artigo 7, que como autoprodutor, as gerações hidrelétricas de potências entre 1 a 10 MW necessitam de autorização para sua implantação; e no Artigo 8, que potências até 1 MW estão dispensadas de concessão, permissão e autorização; enquanto a Lei nº 9427, de 26 de dezembro de 1996, estabelece que autoprodutor e produtor independente abaixo ou igual a 1 MW não necessitam de autorização e concessão, e de 1 a 10 MW necessitam apenas de autorização. Nesta mesma lei, extingue-se o DNAEE e cria-se a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

Em junho de 1996, em São Paulo, é realizado o III Encontro para o Desenvolvimento de Energias Renováveis Solar, Eólica, Biomassa e PCH, tendo em uma de suas sessões, o Seminário para Definições das Diretrizes para o Aproveitamento de PCHs, onde o plenário aprovou um documento contendo as metas, diretrizes e o plano de ação para o

futuro dos aproveitamentos hidroenergéticos de pequeno porte. O trabalho de Souza (1996) mostra o documento citado e a seguir está transcrito o mesmo:

a) Metas

- Aumento da geração hidrelétrica de pequeno porte na matriz energética, atingindo 2500 MW, no caso das PCHs até o ano 2006.
- Substituição da geração Dieselétrica dos sistemas isolados por geração de Centrais de Pequeno Porte.
- Atendimento às comunidades e/ou propriedades rurais não energizadas.

b) Diretrizes

- Criação do Centro de Referência para Aproveitamentos Hidroenergéticos de Pequeno Porte.
- Revisão do conceito de PCH, considerando os seguintes pontos:
 - As condições de risco;
 - Compatibilização dos aspectos técnicos e ambientais, em função das características locais;
 - Flexibilização dos limites de potência.
- Revisão da regulamentação, considerando o novo ambiente legal/institucional e destacando a definição das condições de comercialização de energia.
- Compatibilização da regulamentação setorial e ambiental.
- Integração junto aos diversos agentes responsáveis pelos recursos hídricos.
- Introdução de novas tecnologias nos equipamentos e na exploração dos recursos hidroenergéticos.
- Complementação e elaboração de documentos técnicos de divulgação.
- Criação de formas específicas de financiamento, bem como benefícios fiscais para - implantação das centrais e para fabricação de equipamentos.
- Introdução no currículo das instituições de ensino superior e técnico de tópicos específicos sobre aproveitamentos hidroenergéticos de pequeno porte.
- Introdução no ensino básico de noções sobre aproveitamentos.

c) Plano de ação

- Criação de uma rede de laboratórios credenciados para ensaios e certificação.
- Divulgação dos procedimentos para implantação do Centro de Referência para as instituições envolvidas, com apresentação das candidaturas até final de setembro de 1996.
- Fixação, com nível de detalhamento, de normas e procedimentos para apresentação de projeto e obtenção de autorização ou concessão.
- Introdução da questão dos aproveitamentos hidroenergéticos de pequeno porte, no projeto de reestruturação do setor elétrico brasileiro.
- Descentralização das atribuições do poder concedente através do convênio com os estados, no caso de instrução, análise, aprovação, autorização e concessão.
- Implementação de estudos para recuperação, modernização e repotenciação de centrais.
- Desenvolvimento e disseminação de tecnologias de automação e controle.
- Implantação de uma política de controle de qualidade na fabricação de equipamentos.

Souza (1996) cita ainda em seu trabalho que, para que essas ações sejam concretizadas, seria indispensável a criação do Centro de Referência em Aproveitamentos de Pequeno Porte. Este centro teria como objetivo inicial, dentro das diretrizes estabelecidas, detalhar e coordenar as ações para implantação do plano de ação. Como objetivo permanente, o Centro seria o pólo de um sistema radial de informações, onde os núcleos de competência em cada área alimentariam o mesmo. Tal sistema dinamizaria, a baixo custo, o processo de troca de informações, evitando a duplicação de esforços e reduzindo o tempo para transferências de novas tecnologias ao produto final.

O Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) aceita a EFEI para sediar o Centro Nacional de Referência em Aproveitamentos Hidroenergéticos de Pequeno Porte (CERPCH), assinando, em dezembro de 1996, um Protocolo de Intenções para implantação do mesmo. A partir desta data, a EFEI e seus parceiros têm 90 dias para apresentar um Plano de Trabalho, definindo as atribuições de cada partícipe.

Entretanto, antes da assinatura do Protocolo de Intenções, ou melhor em setembro de 1996, foi assinado o importante Decreto nº 2003, de 10/09/96, que

regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente ou Autoprodutor. Este decreto define como:

Produtor Independente de Energia Elétrica: a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio, que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida por sua conta e risco;

Autoprodutor de Energia Elétrica: a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão e autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu próprio uso.

O CERPCH, criado com os auspícios do IV Fórum de Energia Renovável, lançou como meta para o setor energético nacional alcançar, até o ano 2005, uma potência instalada em PCHs de 2500 [MW]. Potência factível, já que o potencial dos pequenos aproveitamentos hidroenergéticos no país ainda não foi inventariado e, presumivelmente, podem alcançar cifras consideráveis, já que o potencial hídrico alcança cifras na ordem de 250 [GW], ou seja, quatro vezes a atual potência instalada no país. (TIAGO FILHO, 1999)

O autor observa que para alcançar tal objetivo, é sugerido um programa de disseminação das PCHs no país, mas que atendam as particularidades regionais e que se dê incentivos à substituição dos derivados de petróleo por energia hídrica renovável e não poluente. No Quadro 1, são mostrados os dados de 1997, referentes a PCHs:

Quadro 1 – Situação das PCHs no Brasil

Situação das PCHs	Quantidade	Potência total em MW
Em estudo	222	654,5
Em projeto	140	317,7
Em operação	331	604,6
Em recapacitação	3	7,8
Abandonada	428	154,5
Em situação desconhecida	1089	327,9

Fonte: CERPCH, 1999.

Em agosto de 1998, o Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, realizou o 1º Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, na cidade de Poços de Caldas, MG. Dentro das pautas das discussões destacam-se os seguintes temas sobre PCHs:

- Aspectos Político-Institucionais, Econômicos e Ambientais;
- Equipamentos Eletromecânicos e Aspectos Operacionais;
- Projeto e Construção;
- Recapacitação de Usinas.

Rosa e Viana (1999) observam que, após o limite de ampliação de PCHs para 30.000 kW, o empreendimento neste mercado tornou-se mais interessante. Por isso, houve necessidade da definição das características específicas para este tipo de aproveitamento. Este processo de definição contou com a realização de uma audiência pública em 4 de dezembro de 1998, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução nº 394, que caracterizou como PCHs, centrais com potência total instalada de 30.000 kW e área inundada de 3 Km².

Em 2000, a ELETROBRÁS/ANEEL, edita um documento intitulado “Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas”, consolidando as principais alterações e evoluções ocorridas nesse período. Este documento permitirá aos futuros investidores e aos atuais empreendedores, que atuam na área de PCHs, valioso instrumento orientador, atualizado pelo resultado de pesquisas na área de engenharia, metodologias e critérios para levantamentos e estudos ambientais, técnicas modernas de projeto e construção de PCHs, bem como a legislação e temas institucionais hoje vigentes no Setor Elétrico Brasileiro.

3.1.2 Programa Nacional de Pequenas Centrais Elétricas (PNCE)

O referido programa foi elaborado pela ELETROBRÁS/DNAEE (1984) e aprovado pelo governo nacional através do Ministério das Minas e Energia (MME), objetivando principalmente reduzir o consumo de derivados de petróleo, formação básica de infra-estrutura para a expansão de fronteiras agrícolas, alternativa para a eletrificação rural,

utilização da mão-de-obra local não especializada e utilização de equipamentos nacionais dentre outros.

O objetivo deste programa consiste em dinamizar a implantação de PCEs para expansão da oferta de energia elétrica a mercados atendidos ou não por Concessionária:

- *Promover a recuperação/recapitação de PCHs existentes, modernizando suas instalações de forma a tornar a produção de energia mais eficiente e competitiva;*
- Captar a poupança privada, em forma de investimentos em autoprodução ou produção independente de energia elétrica.

As PCEs terão importante papel social na complementação da infraestrutura agrícola (irrigação e beneficiamento), urbana (pequenos centros) e industrial (áreas isoladas), contribuindo para a geração de emprego e fixação da população local.

Também podem ser identificados benefícios para o Setor Elétrico tais como:

- A complementação local de geração, contribuindo para o suprimento das pontas de carga, regulação de tensão e melhoria da garantia do abastecimento;
- Suprimento aos centros isolados;
- Alternativas à eletrificação rural tradicional;
- Contribuição para redução ou substituição do consumo de derivados de petróleo empregados para geração elétrica;
- Adiamiento de investimentos em transmissão.

Ademais, é válido lembrar que a energia elétrica é um dos principais insumos indispensáveis ao processo de desenvolvimento econômico do país.

3.1.2.1 Abrangência do Programa

- Tipos de Empreendimentos

O Programa Nacional de Pequenas Centrais Elétricas abrange os pequenos aproveitamentos elétricos com potência até 10 MW, incluindo:

- Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs;

- Pequenas Centrais Térmicas - PCTs (incluindo consumidores que geram vapor do processo);
- Tecnologias não convencionais (fontes alternativas).

- **Prioridades**

No escopo do PNCE, são prioritários os projetos de PCEs que contemplem:

- Menor custo de geração com a qualidade requerida da energia elétrica para os consumidores;
- Reduzir ou mesmo substituir o consumo de derivados de petróleo empregados para geração elétrica em sistemas isolados, onde exista viabilidade de geração empregando energéticos primários;
- Transformar em autoprodutores, aqueles consumidores industriais que empregam combustíveis exclusivamente para geração de processo;
- Ampliar o fornecimento de energia elétrica para o meio rural (atendimento aos sistemas isolados);
- Implementar aproveitamentos que sinalizem maiores custos evitados.

- **Público Alvo**

O universo dos possíveis interessados em PCEs pode ser assim agrupado:

- Empresa Concessionária
 - Federal;
 - Estadual;
 - Municipal;
 - Privada.
- Produtor Independente;
 - Autoprodutor;
 - Consórcio; e
 - Cooperativas.

3.1.3 Evolução no conceito de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)

O Manual de PCH está atualmente em processo de revisão pela ELETROBRÁS, visando uma atualização geral que incorporará, dentre outros, os seguintes aspectos:

- Os reflexos da informática na prática da engenharia, após o advento dos microcomputadores;
- Às exigências da legislação ambiental em vigor no país.

Além disso, está se propondo que o conceito de PCH seja atualizado visando incorporar a experiência adquirida em projetos dessa natureza, bem como às diversas mudanças na legislação; cita Pereira (1998).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no uso de suas atribuições, através de resoluções estabelece novos conceitos em relação a PCHs, como segue:

- Resolução n ° 393, de 04 de dezembro de 1998: estabelece os procedimentos gerais para registro e aprovação dos estudos de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas.

- Resolução n ° 394, de 04 de dezembro de 1998: estabelece os critérios para o enquadramento de empreendimentos hidrelétricos na condição de pequenas centrais hidrelétricas.

- Resolução n ° 395, de 04 de dezembro de 1998: estabelece os procedimentos gerais para registro e aprovação de estudos de viabilidade e projeto básico de empreendimentos de geração hidrelétrica, assim como da autorização para exploração de centrais hidrelétricas até 30 MW e dá outras providências.

- Resolução n ° 396, de 04 de dezembro de 1998: estabelece as condições para implantação, manutenção e operação de estações fluviométricas e pluviométricas associadas a empreendimentos hidrelétricos.

3.1.4 Classificação das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)

A Portaria nº 136, de 06/10/87, do DNAEE, estabelece e define a PCH como segue:

- Estabelece que, para fins de análise pelo DNAEE do projeto relativo a PCH, serão observados os Manuais elaborados pela ELETROBRÁS;
- Define que, para efeito do disposto no item anterior, será considerada PCH o aproveitamento que tenha potência instalada total de no máximo 10 MW e potência máxima por gerador de 5 MW;
- Permite a aceitação de soluções de engenharia e planejamento não contempladas nos referidos manuais, desde que torne mais conveniente o projeto e conduza a um custo final da energia gerada inferior a qualquer outra alternativa de suprimento, para o mercado a ser atendido.

Os manuais referidos nesta Portaria são três:

- Manual de Microcentrais Hidrelétricas;
- Manual de Minicentrais Hidrelétricas;
- Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas.

O Quadro 2 fornece as características e os limites das Micro, Mini e Pequenas Centrais Hidrelétricas contidos nos referidos manuais.

Quadro 2 – Características e Limites das PCHs

Características	Micro	Mini	Pequenas
Potência Máxima (kW)	100	1.000	10.000
Altura Máxima da Barragem (m)	3	5	10
Vazão Máxima da Central (m ³ /s)	2	15	20
Número Mínimo de Grupos Geradores para a Vazão Máxima	1	2	2
Potência Máxima do Grupo Gerador (kW)	100	1.000	5.000
Período de Recorrência para Obras de Desvio - Vazão de Cheias (anos)	-	5 a 10	10
Período de Recorrência para Obras Permanentes - Extravassores - Cheia Máxima (anos)	-	500 - 1.000	500 - 1.000
Período Máximo para Implantação (meses)	6	12 a 24	18 a 36
Regularização	Q ₉₅ ou no máximo regularização diária		

Fonte: ELETROBRÁS/DNAEE (1982)

Viana (1997) cita que no caso das microcentrais, cuja limitação de potência é de 100 kW, pode-se considerar tal potência como limite superior para centrais hidrelétricas no meio rural. Obviamente, existem exceções a este limite, principalmente em propriedades agro-industriais.

O Quadro 3 apresenta a classificação relativa a PCHs, em termos de queda de projeto.

Quadro 3 – Classificação de PCHs conforme potência instalada e queda de projeto

Denominação	Potência instalada (kw)	Queda de projeto (m)		
		Baixa	Média	Alta
Microcentrais Hidrelétricas	Até 100	Menos de 15	15 - 50	Mais de 50
Minicentrais Hidrelétricas	100 a 1.000	20	20 - 100	Mais de 100
Pequenas Centrais Hidrelétricas	1.000 a 10.000	25	25 - 130	Mais de 130

Fonte: ELETROBRÁS/DNAEE (1982)

3.1.5 Micro, mini e pequenas centrais hidrelétricas no meio rural

Simone (2000) ressalta que, para pequenos aproveitamentos o projetista deve fixar-se nos rotores Pelton, Francis e Kaplan e nas turbinas Banki por serem os mais freqüentemente encontrados na prática usual.

Micro e mini centrais hidrelétricas requerem projetos bastante simples e o uso intensivo de mão de obra e de indústrias locais. A usina irá pertencer a autoprodutores, cooperativas de eletrificação rural, produtores independentes, ou pequenas empresas concessionárias (BAJAY e WALTER, 1989).

3.1.6 Os benefícios da geração através de microcentrais hidrelétricas

A microcentral hidrelétrica destina-se a propriedades rurais situadas em locais distantes da rede elétrica convencional e com potencial hidráulico, propiciando conforto residencial e aumento de produção através da utilização de equipamentos eletro-rurais tais como: picadeira, bomba de água para irrigação, ordenhadeira mecânica, resfriador de leite etc, (COSTA, 1999).

Para Viana (1999), as microcentrais hidrelétricas, no passado, foram uma boa alternativa de geração de energia no meio rural. Entretanto na década de 50, com o programa de eletrificação rural, baseado no padrão monofásico e subsidiado pelo governo, iniciou-se a desativação de muitas microcentrais e desestimulou-se a construção de novas usinas em locais onde havia quedas e vazões propícias para este tipo de geração.

Dias Leite (1997) enfatiza que a crise do petróleo, em 1973, fez com que a atenção se dirigisse para as novas fontes de energia, principalmente as renováveis. Diante deste contexto, o Governo brasileiro no início dos anos 80, estabeleceu diretrizes no sentido de acelerar o aproveitamento das fontes energéticas, com destaque para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), ressurgindo a discussão sobre as mesmas que estavam quase no total esquecimento.

Atualmente, com o alto custo da linha de transmissão da concessionária e do custo não subsidiado da energia no meio rural, a construção de microcentrais passa a ser bastante viável para o produtor rural. Como exemplo, Viana (1999), descreve o caso de uma microcentral hidrelétrica (MCH), distante 6km da linha de transmissão da concessionária, com potência de 25 kW construída na Fazenda Boa Esperança, município de Delfim Moreira, sul de Minas Gerais, que a seguir transcrevemos.

Os levantamentos da vazão e da queda, bem como o projeto e acompanhamento da construção da MCH foram realizados pelo Grupo de Energia da EFEI, tendo a CEMIG dado apoio na construção da linha de transmissão e na realização dos testes do grupo gerador, dentro do Programa de Avaliação e Disseminação de MCHs no Estado de Minas Gerais.

Para a execução do projeto, o proprietário utilizou mão de obra local, materiais como pedra e postes de eucaliptos retirados da própria fazenda, aliados à não necessidade de colocação de um transformador, o que levou a MCH a um custo de 800 US\$/kW instalado. Este custo pode ser considerado bastante razoável para este tipo de empreendimento, principalmente se comparado ao custo da linha de transmissão da concessionária que, na época, era o dobro do custo investido na MCH.

Com os benefícios da geração própria de energia, a fazenda passou a ter o conforto da eletricidade nas duas casas existentes, como iluminação, aparelhos domésticos (TV, geladeira, antena parabólica, etc), telefone celular fixo, água quente proveniente do sistema regulador de carga. Antes da geração de energia elétrica, a fazenda Boa Esperança explorava o reflorestamento de pinus, comercializando em madeira bruta. Com a geração, o proprietário instalou uma serraria de 15 kW, onde se iniciou a produção de pranchas de pinus, aumentando a mesma o faturamento mais de dez vezes. A geração de energia pela instalação da MCH trouxe muitos benefícios à propriedade rural, além do conforto e aumentos da produtividade e do faturamento, propiciando novos investimentos nas áreas de piscicultura e turismo.

Além destes benefícios outros poderão ser concretizados na própria fazenda, como citados por Rosa (1999). O proprietário da fazenda Boa Esperança pretende criar um complexo turístico. A idéia é instalar uma pousada e um lago com criação de trutas,

onde vai implantar um sistema de pesque-pague. No momento, já estão finalizados: um chalé, o lago que receberá os peixes, e um espaço como sauna, além de uma churrasqueira.

Segundo a ANEEL & CERPCH (1998), as microcentrais atraem pouco interesse dos investidores. Estes projetos são usados mais para o atendimento de regiões distantes (isoladas). Há 1089 PCHs cujo estado de operação é desconhecido, apesar de uma capacidade média instalada de 300 kW. Muitas delas com uma capacidade instalada abaixo de 100 kW provêm energia para fazendas ou pequenas comunidades. A maioria destas instalações recebeu apoio como parte de desenvolvimento oficial de programa em áreas rurais carentes. Os equipamentos são simples e não requerem um nível alto de habilitação técnica. Há muitos projetos de microcentrais hidrelétricas principalmente na região centro-norte do país.

Segundo a ELETROBRÁS (1994), cerca de metade do potencial hidrelétrico nacional disponível para aproveitamento encontra-se localizado na região Amazônica, particularmente no Estado do Pará.

A viabilidade sócio-ambiental de diversos aproveitamentos dessa região deverá apoiar-se nos princípios de inserção regional, atuando as concessionárias como agentes articuladores junto aos órgãos governamentais competentes e responsáveis por outras ações setoriais, aos quais caberá prover os recursos para realizar tais ações.

3.2 Equipamentos Hidromecânicos

3.2.1 Sistema de Adução

São chamadas de órgãos adutores, ou adutoras, todas as construções que ligam a tomada d'água às turbinas. Essa ligação pode ser efetuada por:

- Canais ou túneis com lâmina d'água livre;
- Tubulações;
- Túneis sob pressão;
- Poços forçados, verticais ou inclinados.

A escolha do tipo da adutora depende do tipo da usina e das condições topográficas. Nas usinas de represamento, a ligação entre a tomada d'água e a turbina é muito curta, de modo que, às vezes, praticamente desaparece. Os canais ou túneis com lâmina d'água livre, os túneis sob pressão e às vezes as tubulações são aplicados nas usinas de desvio e de derivação e conduzem a água quase horizontalmente até o ponto onde se aproveita o desnível concentrado e daí, por uma tubulação forçada ou um poço forçado, vertical ou inclinado, à turbina, conforme Schreiber (1977).

Schreiber (1977) cita, também, que entre a adutora horizontal e a tubulação ou o poço forçado, deve ser intercalado um órgão que compense a mudança da descarga turbinada, nos casos de mudança da carga das turbinas, até que a massa d'água na adutora se adapte às novas condições de operação. Nos casos em que a adutora é um canal ou um túnel com lâmina d'água livre, projeta-se uma pequena bacia em frente da entrada para às tubulações. Entre as tubulações ou túneis adutores e as tubulações ou poços sob pressão, deve ser previsto uma chaminé de equilíbrio.

A ELETROBRÁS (1985), recomenda que nos casos dos aproveitamentos por derivação, quando é aproveitada a conformação topográfica de uma queda natural e a barragem tem por objetivo apenas garantir o afogamento da boca da estrutura de captação, torna-se geralmente necessária a utilização de um canal de adução ou de uma tubulação ligando a tomada d'água de captação até à câmara de carga, a qual por sua vez acopla-se à tubulação forçada.

3.2.2.1 Canal de Adução

De acordo com Mauad (1997), deve ser o mais simples possível. Por motivo de economia, deve-se preferir executá-los sem revestimento. Para isso, faz-se necessário um estudo, mesmo que superficial do terreno de maneira a avaliar se as condições geológicas permitem a construção do canal. Escavações em rocha devem ser evitadas visto o seu alto custo.

Dependendo da geologia do local, o canal de adução pode ser construído em solo natural ou rocha, se for o caso, ou revestido com enrocamento, pedra

argamassada, concreto ou outro material, sendo que a escolha da solução mais adequada deve basear-se na comparação dos custos entre as alternativas a serem fixadas, segundo ELETROBRÁS (1985).

Todo canal deve ser construído com uma declividade constante de 0,5 cm a cada 10 m e o seu traçado deve acompanhar a curva de nível do terreno (Quadro 4).

Quadro 4 – Inclinação “m” para os diversos tipos de terreno

Natureza do Solo	Inclinação “m”
Argila dura	0,75
Aluvião compacto	1,00
Cascalho grosso	1,50
Enrocamento, terra, areia grossa	2,00
Terra mexida	3,00

A Figura 1 mostra um canal de adução típico, com inclinação “m”, conforme os dados mostrados no Quadro 4.



Figura 1 – Canal de adução com inclinação “m”

3.2.2 Câmara de Carga (Castelo D'água)

Quando o sistema de adução utilizado é o canal a céu aberto, faz-se necessário a construção da câmara de carga, ou castelo d'água, que tem a função de fazer a transição da água do canal para a tubulação de alta pressão. A câmara de carga também tem a função de absorver as manobras bruscas que porventura possam ocorrer na central, conforme Mauad (1997).

Souza (1983) descreve que suas dimensões dependem do volume de água aduzido e do comprimento do canal adutor, pois devem possuir um volume de água

suficiente para, numa abertura brusca da admissão das turbinas, atender a sua demanda mais rapidamente do que seria possível se fosse necessário fazê-lo através do canal, cujo tempo de resposta será tanto maior quanto mais longo for.

Suas funções podem ser resumidas nas seguintes:

- Proporcionar um espelho d'água para a reflexão das ondas do golpe de aríete, reduzindo sua intensidade;
- Proporcionar um volume de água de reserva capaz de atender rapidamente ao aumento da vazão requerido pelas turbinas em casos de aumentos bruscos de carga elétrica nos geradores;
- Receber o excesso de água rejeitado pelas turbinas em caso de fechamento brusco e também do canal adutor até que este reaja, reduzindo a velocidade de escoamento sob influência do aumento do nível de água a jusante na câmara.

Às vezes, por questões econômicas, as câmaras cumprem essa função apenas parcialmente, sendo equipadas com vertedouros para escoar o excesso de água.

E conforme recomendações da ELETROBRÁS (1985), as paredes laterais, em planta, devem abrir-se em ângulos de 45° , e a transição entre o fundo do canal e o fundo da câmara de carga deve ser efetuada em rampa não superior a $1V : 2H$.

Após a comporta, o conduto deve receber uma transição em concreto, de modo a se adaptar ao diâmetro fixado para a tubulação forçada.

O topo da estrutura da câmara de carga deve ser construído a um nível aproximado de 30 cm acima do nível da água do reservatório.

3.2.3 Tubulação

Para Schreiber (1977), nas usinas hidrelétricas, as tubulações que ligam a tomada d'água às turbinas, na casa de força, podem ser subdivididas em tubulações adutoras propriamente ditas e em tubulações forçadas.

3.2.3.1 Tubulação de Adução

Segundo Mauad (1997), pode também ser chamada de tubulação de baixa pressão, a tubulação de adução é a alternativa para substituição do canal. O seu uso só se justifica quando as condições topográficas e geológicas não permitem o uso de canal, tais como: margens muito íngremes, exigindo grandes volumes de escavações ou solos rochosos, onde se faz necessário o uso de explosivos.

E o autor comenta que a tubulação de adução tem a função de conduzir a água com um mínimo de perdas, que é de no máximo 1% da altura da queda total, até ao castelo d'água, que neste caso recebe o nome de chaminé de equilíbrio.

Para a ELETROBRÁS (1983), sempre que for possível, por motivo de economia, deve ser utilizado um canal a céu aberto para conduzir a água desde a tomada d'água junto ao rio até à câmara de carga.

Seu dimensionamento obedece ao critério de que, para cada situação, existe uma velocidade econômica de água. Esta é determinada procurando-se comparar o custo anual das perdas de energia com o custo anual do investimento necessário a sua execução (SOUZA, 1983).

3.2.3.2 Tubulação Forçada

Tubulação forçada tem a função de conduzir a água do castelo d'água (câmara de carga ou chaminé de equilíbrio) até a turbina, normalmente é feita de aço, mas também pode ser feita por tubos de PVC (MAUAD, 1997).

São condutos fechados, em que o escoamento se dá a pressões crescentes de montante para jusante, estando sua parte inferior submetida à pressão máxima do aproveitamento. Podem ser executados tanto em galerias como a céu aberto, cita Souza (1983).

O comprimento das tubulações forçadas depende da queda e pode variar de algumas dezenas a várias centenas de metros, conforme Schreiber (1977).

Na Figura 2, vemos um exemplo de conduto forçado.



Figura 2 –Foto de um conduto forçado

3.2.3.3 Blocos de Apoio (Sela) e de Ancoragem

De acordo com as normas da ELETROBRÁS (1985), a tubulação que conduz a água desde a tomada d'água até às máquinas, quando fabricada em aço, deve ser instalada sobre blocos de apoio e de ancoragem.

Com base no autor Souza (1983), os condutos a céu aberto devem ser ancorados ao terreno por meio de blocos de ancoragem. Estes são obrigatórios em todos os pontos de mudança de direção e também nos pontos das reduções de diâmetro. Por meio dos blocos, os esforços devidos a esses fatores são transferidos ao terreno. Entre dois blocos há a necessidade de se instalarem as juntas de dilatação em geral próximas ao bloco de montante. A fim de reduzir os esforços de flexão da tubulação no vão entre dois blocos, são empregados, a intervalos regulares, as selas de apoio, sobre as quais as tubulações podem deslizar, evitando-se esforços de flambagem ou de tração em consequência da dilatação ou da redução de comprimento devidas às variações de temperaturas.

E para o autor Schreiber (1983), os esforços atuantes na ancoragem podem ser classificados em esforços permanentes, ocasionais e excepcionais.

3.2.4 Unidade Geradora

Em conformidade com as recomendações da ELETROBRÁS (1985), a unidade geradora é o equipamento eletromecânico mais importante de um central hidrelétrica. É composta, basicamente, de turbina hidráulica e do gerador e, como equipamentos complementares principais, do regulador, válvula, quadro de comando e volante.

Na figura 3, vemos um exemplo de instalação de unidade geradora, apresentando, da esquerda para a direita da foto, a caixa espiral da turbina Francis, o regulador, o volante e o gerador, destacados nas Figuras 9, 10 e 11.



Figura 3 – Foto de uma Unidade Geradora com turbina Francis

3.2.4.1 Turbinas Hidráulicas

De acordo com Schreiber (1977), atualmente, nas usinas hidrelétricas, são usados dois tipos de turbinas hidráulicas: as de reação e as de ação.

Pode-se definir turbina hidráulica como sendo uma máquina com a finalidade de transformar a maior parte da energia de escoamento contínuo da água que a atravessa em trabalho mecânico. Consiste, basicamente, de um sistema fixo hidráulico e de um sistema rotativo hidromecânico destinados, respectivamente, à orientação da água em escoamento e à transformação em trabalho mecânico.

Segundo Souza (1983), as turbinas hidráulicas são:

- De reação: aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas hidráulicas de reação são do tipo Francis e hélice (Kaplan), podendo ser: de eixo horizontal, vertical ou inclinado; com um ou mais rotores; em caixa aberta ou fechada; com tudo de sucção cônico reto ou cônico em cotovelo;
- De ação: aquela em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas hidráulicas de ação são do tipo Pelton; podendo ser: de eixo vertical ou horizontal; com um ou mais rotores; com um ou mais injetores.

Ainda segundo o autor Schreiber (1983), as normas NEMA descrevem os tipos um pouco mais substancialmente, dizendo que as turbinas de reação dispõem de uma caixa d'água de um mecanismo para regular a admissão da água e distribuí-la igualmente por todas as entradas do rotor e ainda de um tubo de sucção. A turbina de ação contém um ou mais jatos descarregando em direção às conchas do rotor, sob condições de pressão atmosférica, e dispõe de dispositivos para regular a descarga, de uma caixa e de uma passagem de descarga.

As turbinas de reação são do tipo Francis e de hélices. As turbinas de hélices podem ser de pás fixas ou de pás ajustáveis, e, nesse caso, são chamadas de turbinas Kaplan, nome de seu inventor. As turbinas de ação são do tipo Pelton e Michell-Banki.

Para Roma (1993), as turbinas de reação ainda podem ser definidas em dois tipos de máquinas:

- Máquinas Mistas: a água entra radialmente no rotor e é liberada axialmente. Pertencem a este tipo as turbinas Francis, introduzidas em 1849;

- Máquinas Axiais; a água entra e sai do rotor axialmente, e a entrada e saída geralmente tem a mesma área. Pertencem a este tipo as turbinas Hélice e Kaplan, introduzidas a partir de 1912.

Os equipamentos eletro-hidromecânicos que compreendem os grupos geradores (turbinas, geradores elétricos e reguladores de velocidade) são responsáveis pelo funcionamento de qualquer usina hidrelétrica (MACINTYRE, 1983; SOUZA ET AL., 1983).

As turbinas são equipamentos que transformam a energia hidráulica em mecânica. Isto é feito da seguinte forma: a água conduzida pelo sistema de adução escoar através de um rotor, que tem a capacidade de absorver a sua energia e a transforma em rotação, que é a energia mecânica (MAUAD, 1997).

Souza (1983), informa que a escolha das turbinas hidráulicas será feita em função das condições de vazão e queda existentes no local e podem ser classificadas em turbinas de ação e de reação. As turbinas de ação são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação de energia cinética da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas de ação são do tipo Pelton e Michell-Banki. Já as turbinas de reação são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação das energias cinética e de pressão da água em escoamento, através do elemento do sistema rotativo hidromecânico (rotor). As turbinas de reação são do tipo Francis e Kaplan.

Conforme Teixeira et al. (1999), a turbina de ação de fluxo transversal Michell-Banki, conhecida como “Cross-Flow”, idealizada inicialmente pelo engenheiro australiano A.G. Michell, e posteriormente entre 1917 e 1919 por D. Banki, que publicou uma série de artigos relatando as metodologias desenvolvidas e os resultados obtidos com esse tipo de turbina, apresenta uma concepção simples, de fácil fabricação com poucos recursos técnicos, simples na instalação e operação e também apresenta uma curva de carga adequada em sistema de regime altamente variável.

Para Roma e Mauad (1993), as turbinas de reação podem ser definidas em dois tipos de máquinas: máquinas mistas e máquinas axiais. Nas mistas a água entra radialmente no motor e é liberada axialmente. Pertencem a este tipo as turbinas Francis, introduzidas em 1849. Nas máquinas axiais a água entra e sai do rotor axialmente. Pertencem a este tipo as turbinas Hélice e Kaplan, introduzidas a partir de 1912.

HANGZHOU REGIONAL CENTER FOR SMALL HYDRO POWER

(1993), classifica o tipo de turbinas de acordo com faixas de quedas conforme Quadro 5.

Quadro 5 – Classificação de turbinas de acordo com faixas de quedas.

Tipo de turbina		Aplicação
Pela conversão de energia	Pela direção do fluxo	Faixas de quedas (m)
Reação	• Turbinas axiais:	
	- Tubular	< 20
	- Bulbo	< 20
	- Hélice	3 – 80
	- Kaplan	3 – 80
	• Francis	10 - 70
	• Fluxo diagonal	4 – 120
Ação	• Fluxo radial	100 - 700
	• Pelton	100 – 1770
	• Turgo	50 – 400
	• Fluxo cruzado:	
- Michell-Banki	10 – 100	

De acordo com o Quadro 5, as turbinas Francis e Michell-Banki, são as mais indicadas para serem usadas em microcentrais hidrelétricas e, operando em faixas de queda entre 10-100 metros (Banki) e entre 10-70 metros (Francis), atendem às condições de queda de projeto das micro-usinas.

Quanto às turbinas não convencionais, seu campo de aplicação, segundo Viana (1997), é o indicado no Quadro 6.

Quadro 6 – Campo de aplicação das turbinas não convencionais.

Tipo de turbina	Faixa de quedas (m)	Vazões (m³/s)	Faixa de potências (kW)
Michell-Banki	3 - 100	0,02 a 2,00	1 a 100
Bomba funcionando com turbinas (BFT)	6 – 100	0,02 a 0,25	< 50
Turgo	5 – 100	0,01 a 0,18	0,08 a 100

Uma vez obtidas a queda líquida em metros, e vazão em metros cúbicos por segundo, para encontrar o tipo de turbina recomendado para o aproveitamento em estudo, a ELETROBRÁS (1985) indica que se utilize o ábaco apresentado na Figura 4, o qual está detalhado por campo de utilização de cada turbina nas Figuras 5, 6, 7 e 8. Conforme estabelecido também pela ELETROBRÁS (1985), e mostrado na Figura 4, a faixa de potência unitária adotada para as microcentrais é de 100 kw, valendo como entrada os valores de queda (até 200 m) e vazão (até 2 m³/s). É observado pela autora que a escolha da turbina, quando usado o ábaco da Figura 4, é preliminar, uma vez que não existem fronteiras bem definidas entre os vários tipos de turbina.

No ábaco da Figura 4, segundo a ELETROBRÁS (1985), a potência indicada é aproximada, pois supõe rendimentos constantes de 95% para o gerador e de 77% para a turbina, sendo calculada pela expressão:

$$P = 6,80 \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

onde:

P = potência nos bornes do gerador, em kw

Q = descarga da turbina, em m³/s

H = queda bruta, em m.

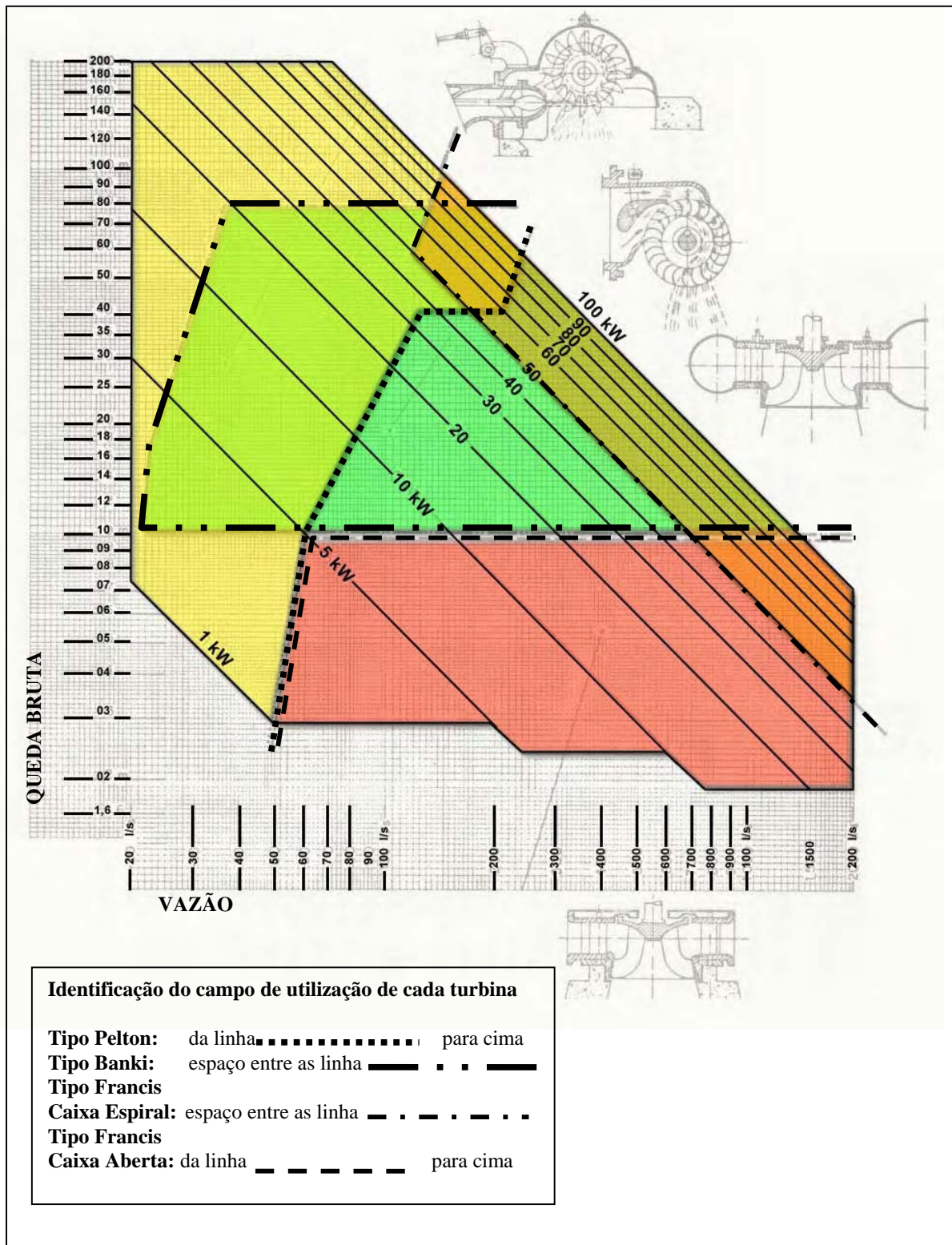


Figura 4 – Ábaco para seleção de turbinas aplicáveis a microcentrais hidrelétricas

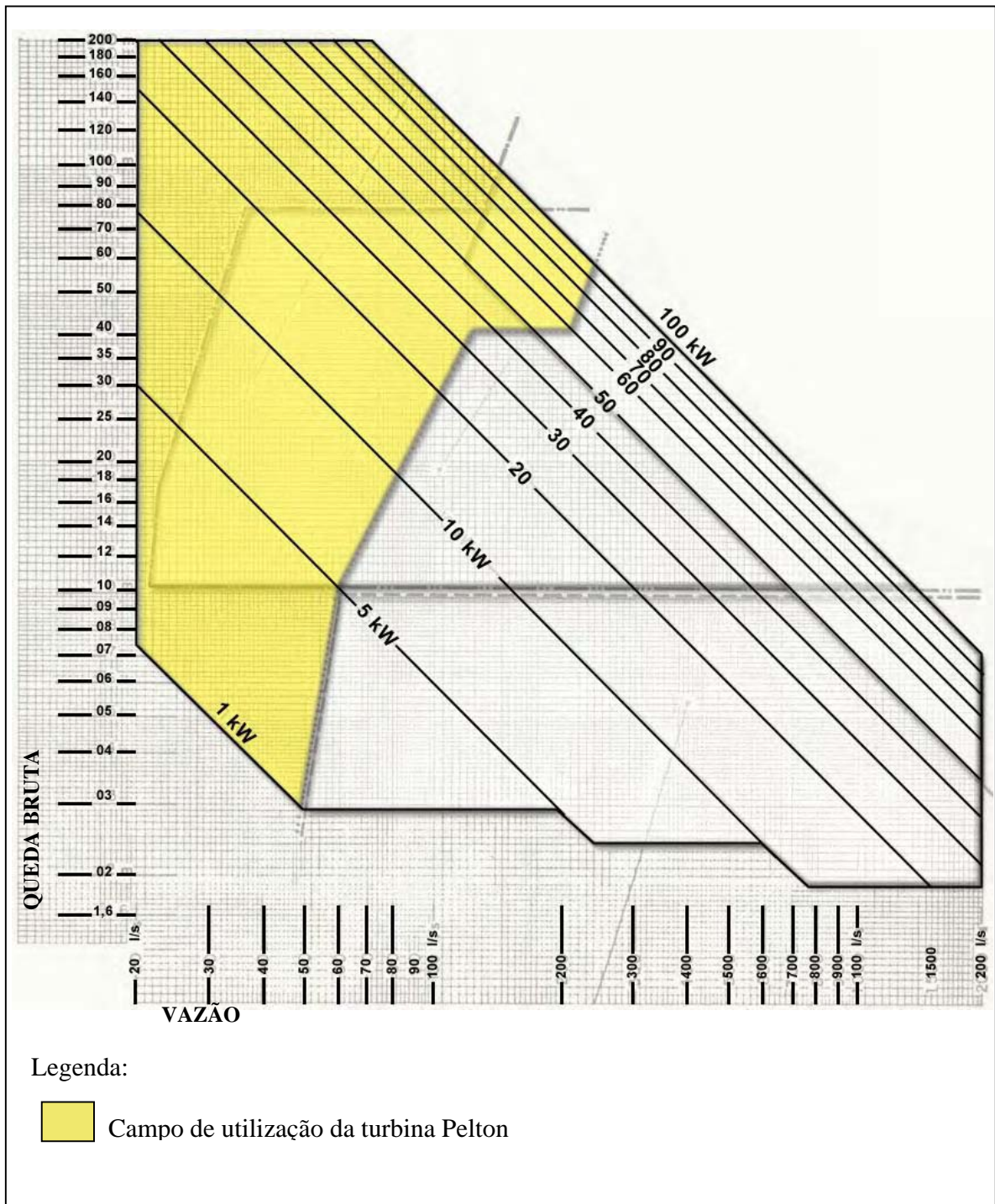


Figura 5 – Ábaco para seleção de turbinas - campo de utilização da turbina Pelton

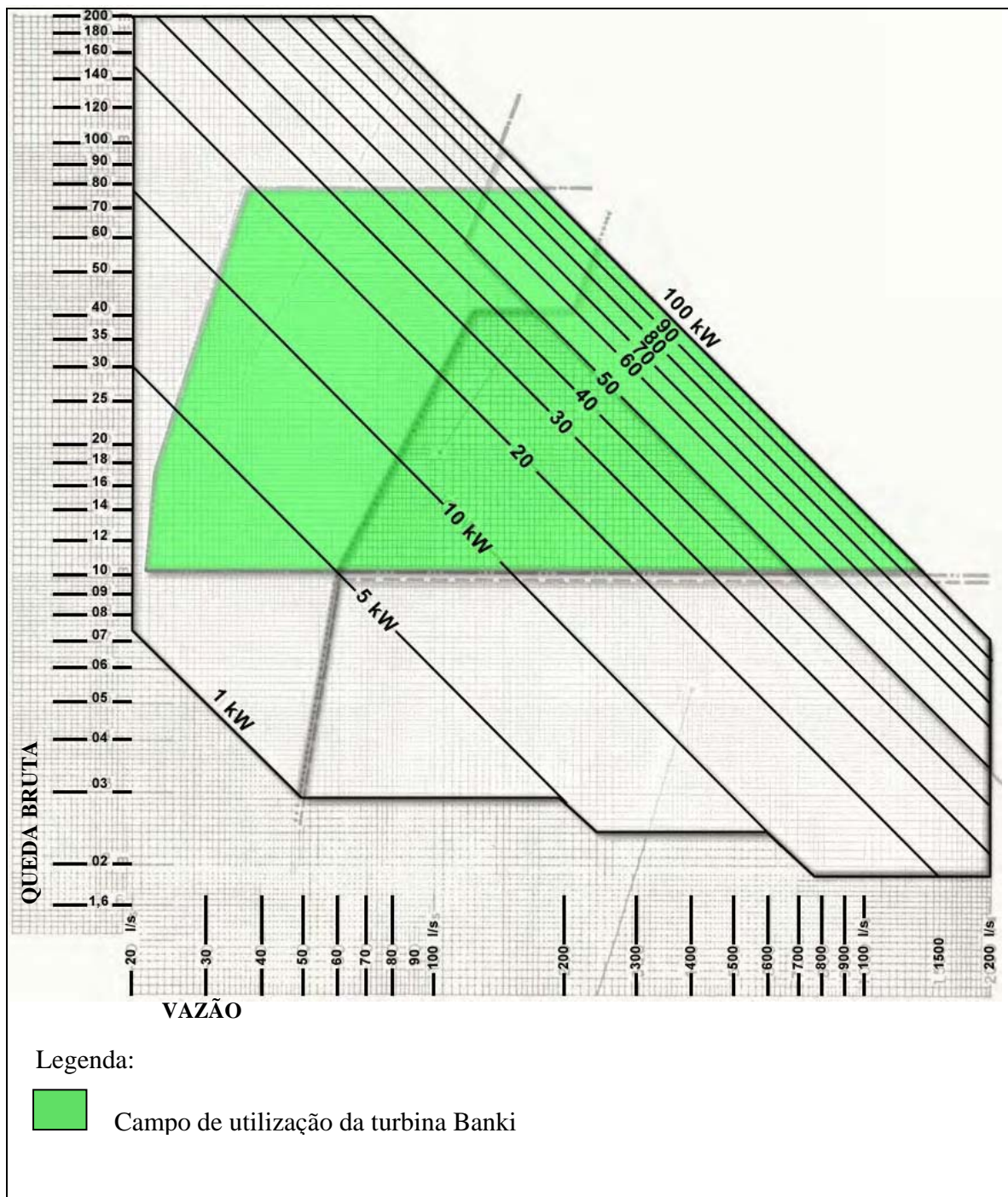


Figura 6 – Abaco para seleção de turbinas - campo de utilização da turbina Banki

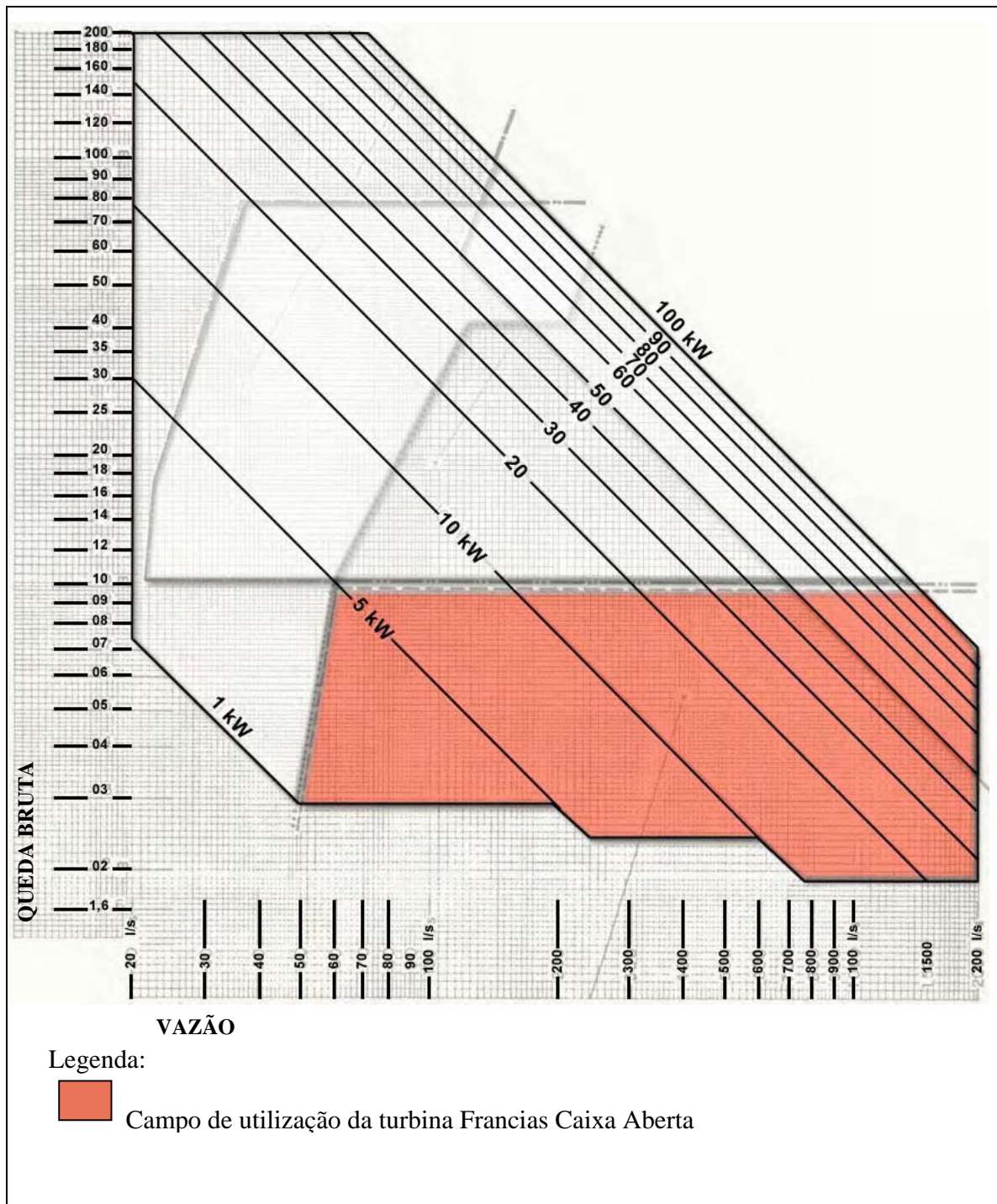


Figura 7 – Ábaco para seleção de turbinas - campo de utilização da turbina Francis Caixa Aberta

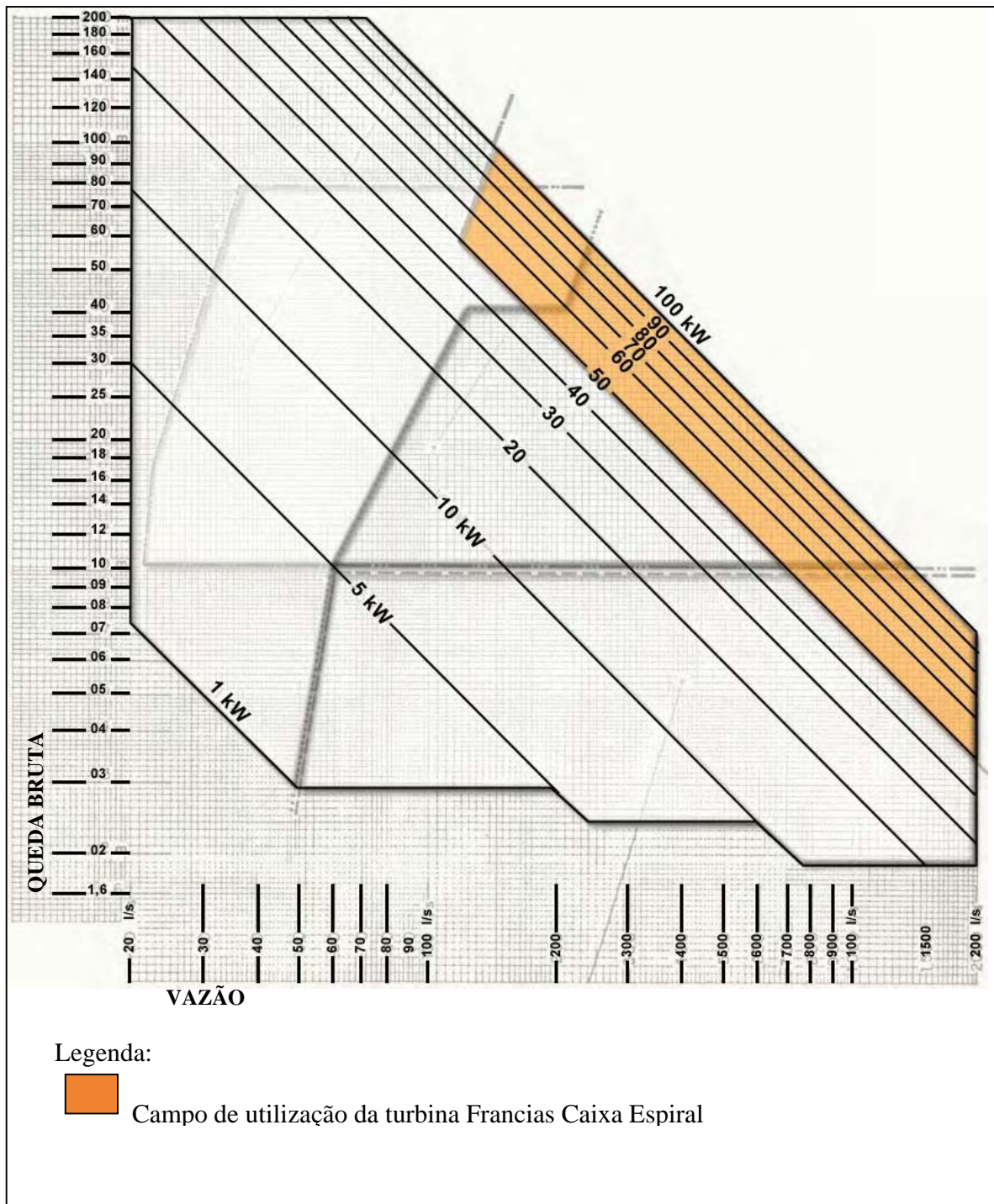


Figura 8 – Ábaco para seleção de turbinas - campo de utilização da turbina Francis Caixa Espiral

Segundo Mauad (1997), os geradores elétricos síncronos são conversores rotativos que transformam energia mecânica de rotação em energia elétrica, ou, no sentido inverso, energia elétrica em energia mecânica de rotação. No primeiro caso constituem os geradores elétricos, e no segundo os motores. Como funcionam com base nos princípios da indução magnética, os motores e geradores são similares em sua forma construtiva diferindo apenas quanto ao emprego.

Os geradores elétricos utilizados em centrais produtoras de eletricidade são máquinas que produzem energia elétrica de corrente alternada com frequência definida pela rotação a que são submetidas. Como a energia elétrica consumida no Brasil foi adotada no padrão de 60 Hz, as máquinas devem girar a uma rotação determinada para gerar a energia em exata sincronia com essa frequência. A rotação da máquina depende de sua forma construtiva, principalmente do número de pólos magnéticos de que é dotada. Como os pólos só existem em pares, o gerador mais simples tem 2 pólos e a sua rotação é de 3.600 rpm.

Os sistemas de transmissão devem ser planejados para permitir o despacho de toda a energia a ser gerada com a menor taxa de indisponibilidade possível.

A ELETROBRAS & DNAEE (1985), orienta que as subestações de energia para microcentrais hidrelétricas devem ser instaladas junto à casa de máquinas. Para o dimensionamento do transformador recomenda-se a escolha da potência máxima do gerador, em kVA. A tensão nominal do primário deve ser igual à tensão do gerador, e a tensão nominal do secundário igual à tensão adotada para a linha. O transformador não deve utilizar fluído isolante que seja tóxico e poluente. A ligação do gerador e subestação deverá ser feita por meio de cabos isolados.

As características de funcionamento do sistema de distribuição são de primordial importância, uma vez que elas definem a tensão de transmissão e a forma de operação da central (BALARIM, 1996).

3.2.4.2 Sistema de Regulação

O sistema de regulação tem por finalidade manter a rotação e, portanto, a frequência da unidade geradora dentro dos limites considerados aceitáveis, em

função da variação da demanda da rede elétrica. Nas microcentrais hidrelétricas esta função é desempenhada pelos reguladores de velocidade, conforme manual da ELETROBRÁS (1985).

3.2.4.2.1 Reguladores de Velocidade

Os reguladores automáticos de velocidade geralmente empregados nas microcentrais hidrelétricas são do tipo mecânico, constituído por um servo-mecanismo acionado por óleo pressurizado, comandado por um pêndulo centrífugo. O pêndulo detecta qualquer variação da velocidade (rotação) da unidade geradora, causada por variação da carga na rede, pondo em funcionamento o servo-mecanismo de acionamento do distribuidor da turbina. O distribuidor regula o fluxo de água através da turbina, controlando deste modo a variação da potência da mesma, de acordo com a variação da carga na unidade geradora, segundo a ELETROBRÁS (1985).

Na Figura 9, vemos um regulador de velocidade, em destaque pelo pontilhado, no primeiro plano da foto.

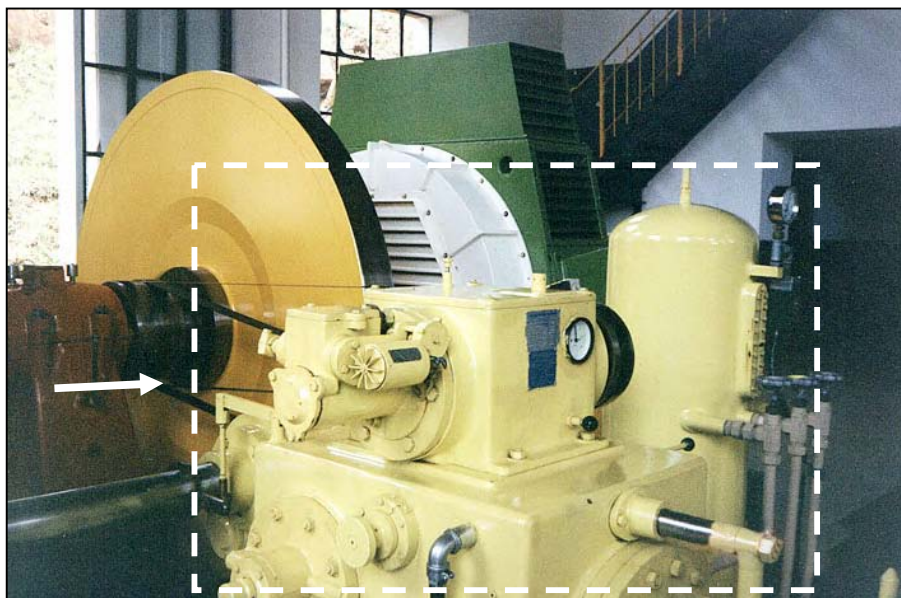


Figura 9 – Foto com destaque para o regulador de velocidade

3.2.4.2 Volantes de Inércia

Conforme manual da ELETROBRÁS (1977), nas unidades geradoras de pequena capacidade ocorre freqüentemente que o momento de inércia (GD^2) das massas girantes é insuficiente para garantir uma regulação estável, ou seja, o regulador não tem capacidade de atender às variações de carga na unidade geradora, dentro de certas condições de regulação previamente impostas, considerando-se apenas o GD^2 do gerador e da turbina. Torna-se necessário então recorrer ao emprego de volantes de inércia, que poderão ser fabricados em ferro fundido ou aço fundido. Estes volantes são normalmente colocados na extensão do eixo do gerador, sendo sua massa e seu diâmetro determinados pelo fabricante da turbina, em função das características da máquina oferecida, e podemos ver um exemplo na Figura 10.



Figura 10 – Foto com destaque para o volante de inércia

3.2.4.3 Geradores Síncronos

De acordo com o autor Kosow (1977), a primeira indicação da possibilidade de intercâmbio entre energia elétrica e mecânica foi apresentada por Michel

Faraday em 1831. Esta descoberta é considerada por alguns como o maior avanço individual no progresso da ciência para atingir o aperfeiçoamento final da humanidade.

Máquinas síncronas são conversores rotativos que transformam energia mecânica de rotação em energia elétrica, ou, no sentido inverso, energia elétrica em energia mecânica de rotação. No primeiro caso, constituem os geradores elétricos; e no segundo, os motores, cita Mauad (1997).

Comenta também, que os geradores elétricos utilizados em centrais produtoras de eletricidade são máquinas que produzem energia elétrica de corrente alternada com a frequência definida pela rotação a que são submetidas. Como a energia elétrica consumida no Brasil foi adotada no padrão de frequência de 60 Hz, as máquinas devem girar a uma rotação determinada para gerar a energia em exata sincronia com aquela frequência.

Fisicamente, o gerador é composto da parte fixa: o estator, e da parte rotativa: o rotor. A carcaça do estator, em fabricação soldada, apóia em seu interior o ferro ativo, composto de pacote de lâminas que levam as ranhuras para as bobinas, segundo Schreiber (1977).

Na Figura 11, vemos um gerador (primeiro plano da foto).



Figura 11 – Foto com destaque para o gerador de uma turbina hidráulica

3.2.5 Casa de Máquinas (Casa de Força)

A orientação da ELETROBRÁS (1985), esclarece que a casa de máquinas é a edificação que abriga os grupos geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como os equipamentos auxiliares necessários ao funcionamento da central hidrelétrica.

As casas de força têm a finalidade de alojar as máquinas e os equipamentos, possibilitar sua montagem ou eventual desmontagem e sua operação e manutenção, segundo Schreiber (1977).

Conforme Mauad (1997), os materiais de construção podem ser quaisquer, dependendo das disponibilidades locais. Usualmente são utilizadas madeira ou alvenaria de tijolo, materiais bastante difundidos e de custo baixo.

3.3 Estudos Hidrológicos, Topográficos e Geológicos

3.3.1 Estudos Hidrológicos

Segundo Souza (1983), hidrologia é a ciência que trata do estudo da água na natureza. É a parte da Geografia física e abrange, em especial, propriedades, fenômenos e distribuição da água na atmosfera, na superfície e no subsolo.

A ELETROBRÁS (1985) recomenda que os estudos hidrológicos a serem realizados nos projetos de microcentrais hidrelétricas visam basicamente à definição, em caráter estimativo de:

- Vazão de projeto da(s) turbina(s), para a determinação da potência a ser instalada;
- Nível d'água de desvio do rio, para a programação da ensecagem no local a ser construída a barragem, quando for o caso;
- Vazão de cheia máxima e nível d'água correspondente, para a determinação da capacidade máxima necessária do vertedouro (sangradouro), durante os períodos de enchentes do rio e orientação de posição do piso da casa de máquinas.

Para o autor Schreiber (1977), todos os estudos hidrológicos devem abranger, pelo menos, 20 anos consecutivos, caso existam dados. Omissões de observações dentro desse período podem ser reconstituídas por meio da correlação entre o local pesquisado

e os postos fluviométricos do mesmo rio, ou num rio vizinho. Porém, de qualquer modo, deverá ser estabelecida a curva-chave para o local da barragem e também para o local da casa de força, caso esta seja afastada daquela.

3.3.1.1 Verificação da vazão

As medidas devem ser feitas preferencialmente no período de seca, quando o nível d'água é mínimo. Realizam-se várias medidas, cada uma em dias diferentes, para se ter maior precisão nos resultados. Adota-se a vazão mínima como sendo representativa da vazão de projeto da turbina.

- Métodos de medição: existem diversas maneiras de se medir vazão. Algumas bem simples, outras mais sofisticadas. A precisão também varia, dependendo do método e aparelho utilizados. Os métodos utilizados para centrais de pequeno porte são:

- Método prático
- Método do flutuador
- Método do molinete
- Método do flutuador integrador
- Método dos vertedores

3.3.2 Estudos Topográficos

Para o planejamento geral do aproveitamento de um rio, precisa-se de estudos topográficos especiais, porque no Brasil existem apenas mapas topográficos em escalas pequenas, que não mostram os detalhes necessários, cita o autor Schreiber (1977).

A orientação da ELETROBRÁS (1985), para projeto de uma minicentral hidrelétrica vários serviços de topografia serão necessários:

- Determinação da queda natural no local do aproveitamento;
- Perfis de seções transversais diversas;
- Perfis de seções longitudinais diversas;
- Áreas para implantação das diversas obras civis necessárias;
- Áreas de drenagem.

3.3.3 Estudos Geológicos

Os estudos geológicos tratam, basicamente, do local da barragem e obras anexas, de modo a garantir uma escolha adequada e segura, sobretudo quanto às fundações, ombreiras e encostas naturais nas vizinhanças das obras (ELETROBRÁS, 1985).

Segundo a Eletrobrás (1985), ao tratar-se de pequenos aproveitamentos, as investigações geológicas devem ser feitas com pouca ajuda de instrumentos, baseando-se essencialmente em observações de campo, informações eventualmente existentes nas áreas e bom senso. Devem ser identificados e evitados aspectos tais como vulnerabilidade a desmoronamentos ou quedas de barreiras, desmatamento intenso ou vegetação rala ou inexistente, existência de bancos de areia ou cascalho que permitam muita permeabilidade, ou rochas fraturadas.

3.4. O uso da informática como ferramenta de apoio

Na sociedade moderna, a informação é a ferramenta principal para se desenvolver o crescimento. É a informação que possibilita a tomada de decisões e o desenvolvimento de projetos. A ciência da computação vem funcionar como uma ferramenta de auxílio à conquista da informação, através de sistemas de informação.

Tudo e qualquer conjunto de atividades necessárias ao controle e uso da informação constitui parte de um Sistema de Informação.

Sistema de Informação pode ser definido como “um esforço organizado para prover informações que permitam à empresa decidir e operar” (Dias, 1985).

O impacto decorrente da boa utilização de informações em tempo hábil é muito grande em qualquer área de atuação. Isto evidencia a força emergente do computador. Seria difícil imaginar uma sociedade moderna sem sua utilização, enfatizou Wolfsdorf (1988).

É com estes conceitos que o presente trabalho pretende utilizar o desenvolvimento de um sistema computacional para auxiliar a decisão sobre quais fontes de energia podem ser utilizadas em uma determinada propriedade agrícola.

4 MATERIAL

O programa computacional em estudo terá como base principal dados de entrada que o usuário fornecerá, sendo eles os valores de vazão do rio, altura bruta ou queda líquida, e altitude local.

As equações usadas para dimensionar, em primeira aproximação, as dimensões do invólucro no interior do qual ocorrerá o escoamento da água através da turbina, foram estabelecidas por Souza (1983) e Martinez (1983).

No modelo, não se utilizou, até o momento, arquivos de banco de dados, visto que se trata de um programa de simulação, baseado em dados fornecidos em tempo real, pelo usuário. A simulação é dinâmica, ou seja, os dados de resultados são exibidos à medida que o usuário realiza suas inserções.

Em relação à demanda, no presente trabalho não foram dimensionadas as cargas a serem ligadas, em razão do enfoque ser o quanto o rio nos fornece de potência, ou seja, proporcional à vazão e à queda.

4.1 Projeto do sistema computacional

Inicialmente, serão levantados os requisitos de informações para o sistema, ou seja, que tipo de informações serão dadas ao usuário, escolhidas conforme sua relevância na tomada de decisões. Na fase de levantamento de requisitos busca-se o entendimento sobre o negócio, visando identificar as funcionalidades exigidas do sistema a partir da visão do usuário.

Abordava GANE (1989), que diferenciamos o trabalho de análise (definindo “o que” o sistema fará) do trabalho do projeto (definindo “como” o sistema fará).

Por fim, será feito projeto físico, ou seja, a implementação na linguagem computacional, produzindo um programa computacional. Nesta fase, será utilizada uma linguagem de programação visual, para uso no Sistema Operacional Microsoft Windows, este pertencente à Microsoft Corporation.

O desenvolvimento do sistema computacional será feito utilizando uma linguagem de ambiente RAD (Rapid Application Development – Desenvolvimento Rápido e Aplicações), que possa também fornecer uma interface amigável com o usuário (GUI – Interface Gráfica), ou seja, facilidade e praticidade de uso.

A linguagem computacional escolhida para o desenvolvimento do software, que proporcionará resultados numéricos para dimensionamento de turbinas hidráulicas é a utilizada pelo programa Microsoft Access, versão 2000 (9.0.2812). Trata-se do programa de gerenciamento de banco de dados do Microsoft Office, pacote de softwares muito utilizado mundialmente, em todos os níveis, de profissionais a usuários comuns.

O Microsoft Access oferece um conjunto eficiente de ferramentas que são sofisticadas o suficiente para desenvolvedores profissionais; e além disso, são de fácil aprendizagem para novos usuários. Seu objetivo é possibilitar criar ou usar soluções eficientes para manipulação de dados que tornem mais fáceis a organização, o acesso e o compartilhamento de informações.

Microsoft Access fornece uma interface familiar, comum a todos os programas do pacote Office, o que possibilita facilidade de alterações e melhorias no programa desenvolvido.

O equipamento a ser utilizado para o desenvolvimento será um microcomputador PC Processador Pentium(r) III GenuineIntel , velocidade 600 Mhz, com um mínimo de 64 MB de memória RAM, Disco Rígido de 20 GB e monitor de vídeo SVGA color.

5 MÉTODOS

Para a implantação de PCH, podemos dividir os estudos e projetos em três partes, esquematizadas na Figura 12:

- Estudos gerais: onde são feitos os levantamentos topográficos, hidrológicos e hidrenergéticos, geológicos e geotécnicos, sócio-ambientais e de mercado;
- Projeto/especificações: aspectos construtivos, componentes hidráulicos, obras civis, equipamentos e sistemas elétricos e mecânicos;
- Análise econômico-financeira: cronogramas físico e financeiro, análise de custos/benefícios;

Nossos estudos se prendem à parte de “PROJETO/ESPECIFICAÇÕES”; e, em específico, abordarão a fase “EQUIPAMENTOS MECÂNICOS”, também esboçada na Figura 12. Esta fase trata, dentre outros, do dimensionamento das turbinas hidráulicas, o qual constitui o foco deste presente trabalho.

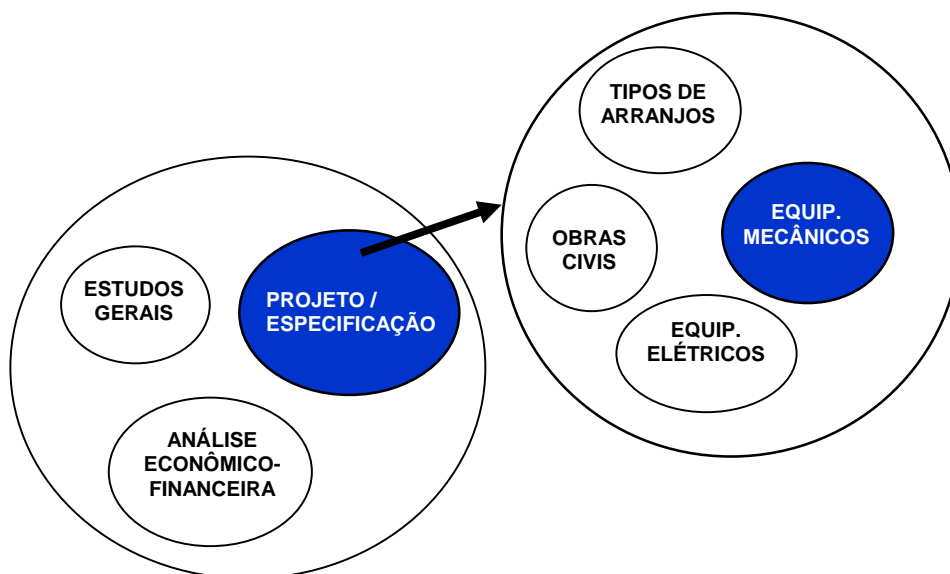


Figura 12 – Esquema do processo de implantação de PCH

5.2 Verificação dos dados de entrada do sistema computacional

O sistema computacional recebe a entrada dos dados, através de digitação feita pelo usuário, que vão servir como base, direta ou indiretamente, a todos os cálculos do dimensionamento. Esta entrada consiste nas informações de vazão do rio, altura bruta ou queda líquida, e altitude local.

As informações de vazão do rio e altura bruta são esboçadas sob os respectivos símbolos **Q** e **H**, na Figura 13; **NM** refere-se ao nível de montante e **NJ**, nível de jusante do rio.

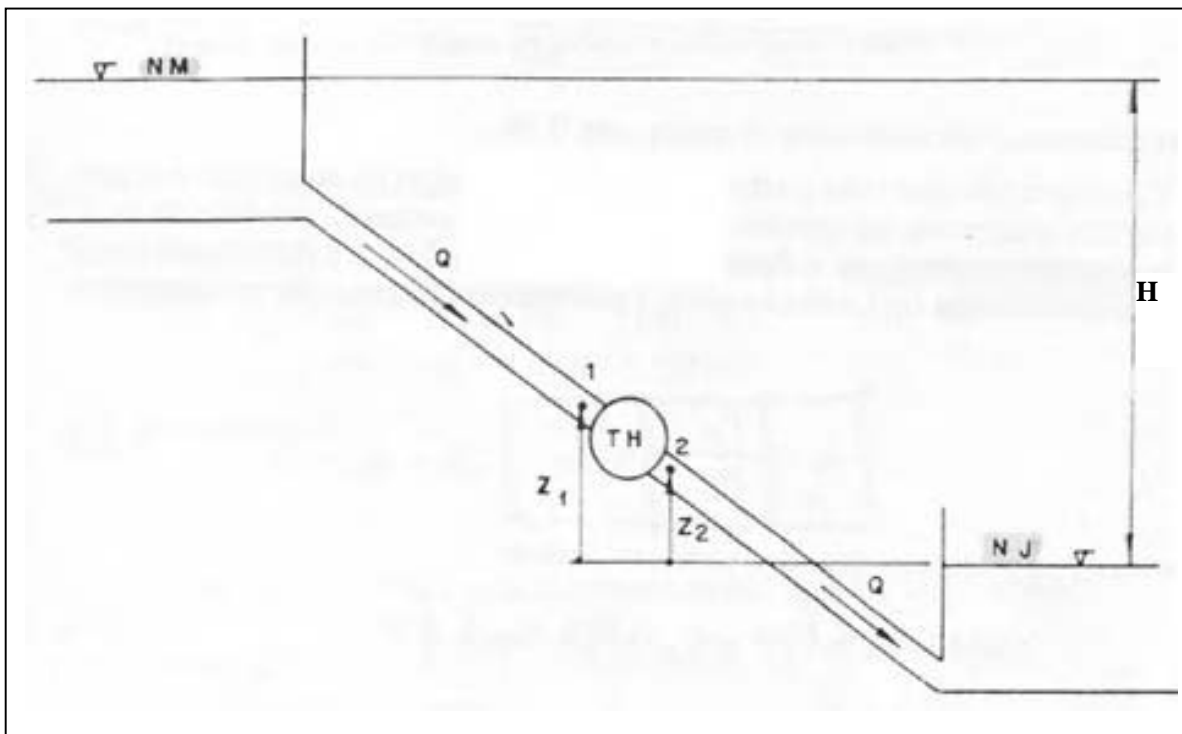


Figura 13 – Esquema para geração hidráulica

5.2.1 Verificação da queda líquida e vazão

Para verificação da queda bruta existem dois métodos tradicionais: método da vara e método da mangueira que, por serem métodos práticos, não apresentam fórmulas de cálculo e, a princípio, não se interessa automatizá-los. Os métodos para verificação da vazão também não serão automatizados pelo presente trabalho, sendo o usuário responsável por obter estes valores de queda e vazão e alimentar o programa computacional, para seu objetivo principal que é o dimensionamento preliminar hidrodinâmico.

5.2.3 Verificação da altitude

É necessária a altitude local para se determinar a altura de sucção, mostrada pelo símbolo h_s , na Figura 14, a qual foi retirada da NB-228 da ABNT. Seja a

instalação esquematizada na Figura 15, para que não haja cavitação no ponto, calcula-se a altura máxima de sucção expressa pela Equação 1:

$$h_{s_{\max}} = 10 - 0,00122 \cdot H_L - \sigma_{\min} \cdot H \quad (1)$$

onde :

H_L = altitude local no nível da jusante.

σ_{\min} = coeficiente de Thoma , que é determinado experimentalmente.

H = desnível entre montante e jusante.

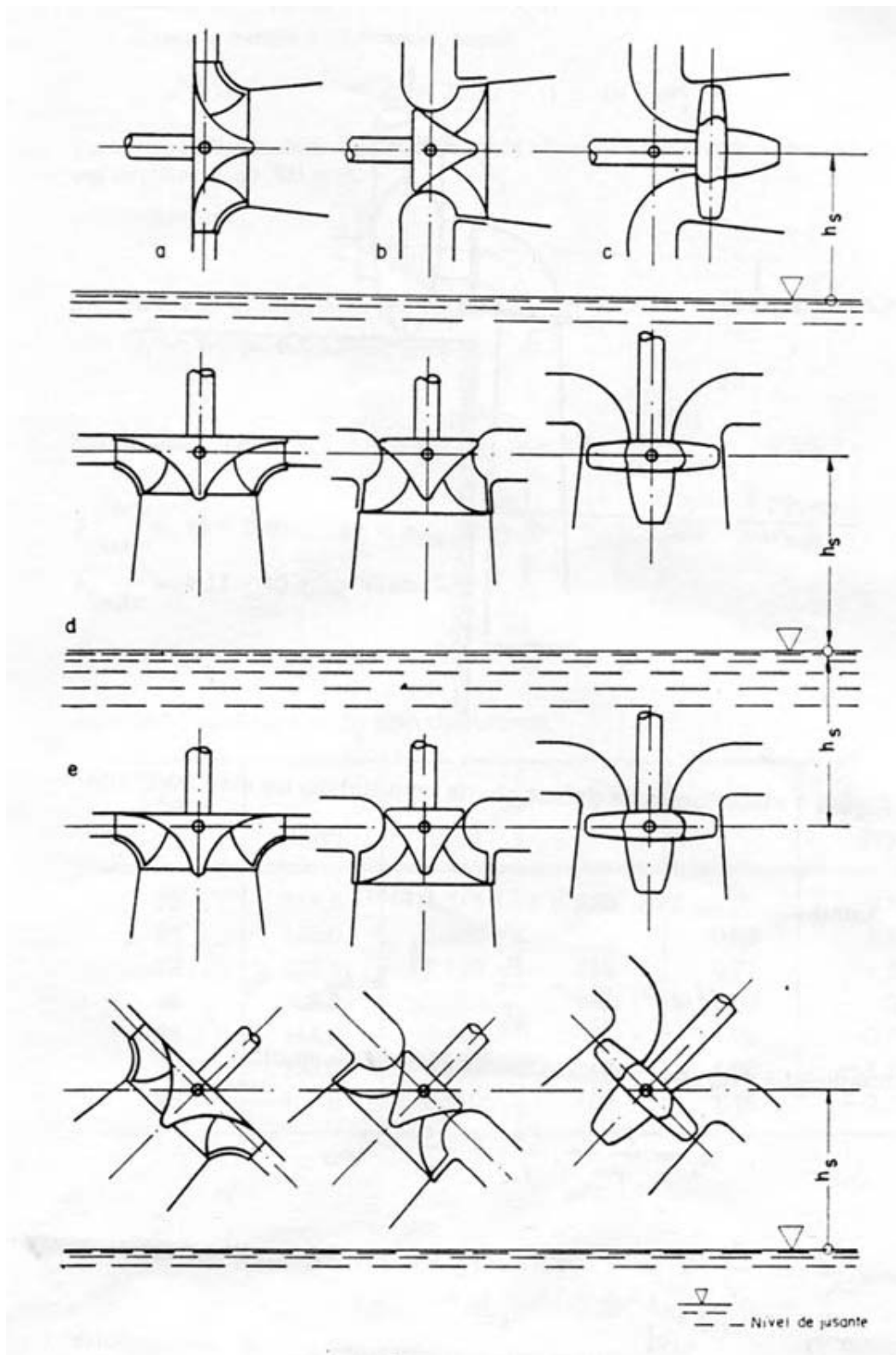


Figura 14 – Definição da altura geométrica de sucção

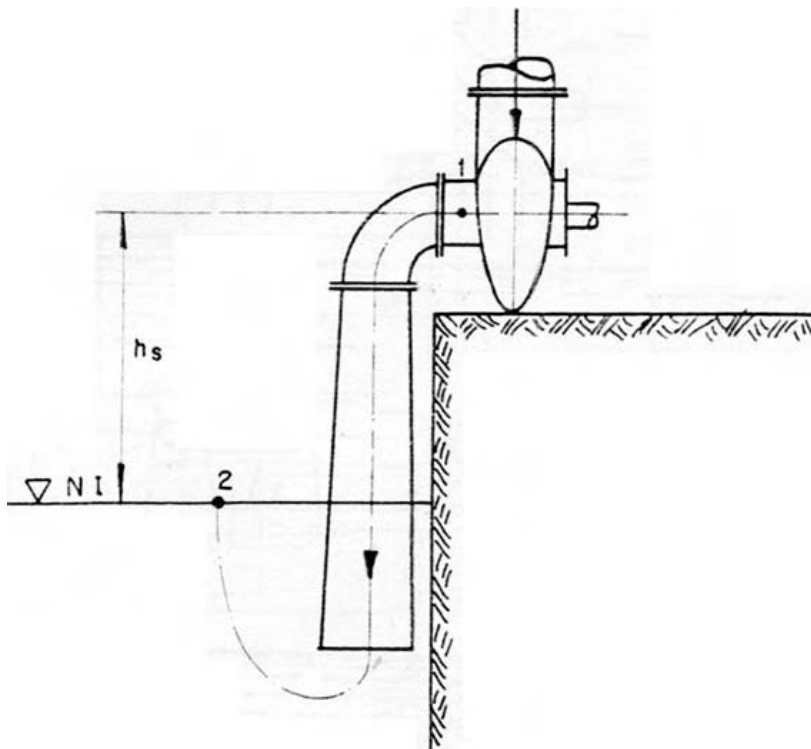


Figura 15 – Esquema da sucção de uma turbina de eixo horizontal

5.3 Método para dimensionamento preliminar hidrodinâmico

Souza (1983) estabelece um roteiro de cálculos a que se refere como “dimensionamento preliminar hidrodinâmico”. Seu objetivo é obter valores numéricos das dimensões principais de turbinas hidráulicas do tipo Francis, Kaplan e Pelton, chegando-se a uma primeira idéia dimensional da turbina, a qual pode servir para outros dimensionamentos da central.

5.3.1 Roteiro para dimensionar turbinas hidráulicas do tipo Francis, Kaplan e Pelton

Com base nas equações transcritas de Souza (1983), foi estabelecido, no presente estudo, um roteiro para dimensionamento das turbinas hidráulicas do tipo Francis, Kaplan e Pelton.

5.3.1.1 Passo 1 do roteiro: dados de entrada

São fornecidos, pelo usuário, os valores de vazão do rio, altura bruta e altitude local, os quais serão citados neste trabalho na forma mostrada no Quadro 7:

Quadro 7 – Dados fornecidos ao sistema

Dado	Simbologia e unidade de medida
vazão	Q (m ³ /s)
altura bruta	H (m)
altitude local	H _L (m)

Calcula-se o trabalho específico (Y), em função do valor da altura bruta (H) fornecido, com resultado em J/Kg.

$$Y = 9,81 \cdot H \quad (2)$$

5.3.1.2 Passo 2 do roteiro: cálculo da rotação específica da turbina

A rotação específica e a cavitação são os fatores que, tecnicamente, predominam na escolha da turbina. A rotação específica é uma característica que possibilita esta escolha tendo por base as grandezas vazão e altura bruta, obtidas no “passo 1”, e a rotação da turbina. Rotação da turbina é uma grandeza ligada à ciclagem do sistema (no Brasil, 60 ciclos) e ao número de pares de pólos do alternador.

A rotação específica é uma característica, sem dimensão, que liga os três elementos: vazão, altura e rotação, satisfazendo ao objetivo de evidenciar o tipo de máquina que melhor se adapta a tais elementos, ou seja, que assuma um só valor para cada conjunto vazão, altura e rotação dados.

Os valores de rotação específica das máquinas radiais são menores que das máquinas axiais. Valores pequenos de rotação específica indicam máquinas tangenciais, tipo turbinas Pelton, valores médios indicam tipo Francis, e grandes indicam tipo hélice ou

Kaplan.

Por meio de modelos de máximo rendimento, Souza fixa intervalos para valores de rotação específica, como mostrado no Quadro 8, nos quais esta característica satisfaz aos objetivos.

Quadro 8 – Intervalos de rotação específica para turbinas hidráulicas

Intervalo de rotação	Turbina hidráulica
$(5 \leq \text{rotação específica} \leq 70)$	Turbinas Pelton
$(30 \leq \text{rotação específica} \leq 450)$	Turbinas Francis
$(350 \leq \text{rotação específica} \leq 1.000)$	Turbinas hélice ou Kaplan

Para chegarmos ao valor de rotação específica, calculamos a rotação da turbina (n):

a) Parte-se de uma provisória:

Para turbinas Francis e Kaplan:

$$n_1 = 5,58 \cdot Y^{0,265} \cdot Q^{-0,5} \quad (3.a)$$

Para turbina Pelton:

$$n_1 = 0,035 \cdot Y^{0,75} \cdot Q^{-0,5} \quad (3.b)$$

b) Encontra-se o nº de pares do alternador (zp):

$$z_{p1} = 60 / n_1 \quad (4.a)$$

$$z_p = \text{parte inteira de } z_{p1} \quad (4.b)$$

c) Calcula-se a rotação da turbina (n):

$$n=60/zp \quad (5)$$

Enfim, calcula-se a rotação específica da turbina (n_{qA}):

$$n_{qA} = 10^3 \cdot n \cdot (Q^{1/2} / Y^{3/4}) \quad (6)$$

5.3.1.3 Passo 3 do roteiro: cálculo do rotor

Para turbinas Francis e Kaplan, é necessário calcular a rotação específica do rotor. Para isso, são seguidos os passos abaixo descritos:

a) Calcula-se a vazão para o projeto do rotor, com base no valor da rotação específica da turbina:

Para Turbina Francis:

Para $60 \leq n_{qA} \leq 150$:

$$Qn = 0,8 \cdot Q \quad (7)$$

Para $150 \leq n_{qA} \leq 350$:

$$Qn = Q / (1,415 - 0,11 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA}) \quad (8)$$

Para Turbina Kaplan – hélice:

Para $300 < n_{qA} < 1000$:

$$Qn = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot n_{qA} + 0,8) \cdot Q \quad (9)$$

Para Turbina Kaplan – regulação dupla:

Para $200 < n_{qA} \leq 600$:

$$Qn = (0,01 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qA}^2 - 0,12 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA} + 1,01) \cdot Q \quad (10)$$

Para $600 < n_{qA} \leq 1.000$:

$$Qn = 0,63 \cdot Q \quad (11)$$

b) Calcula-se a rotação específica do rotor (n_{qAn}):

$$n_{qAn} = 10^3 \cdot n \cdot (Qn^{1/2} / Y^{3/4}) \quad (12)$$

Cálculo das dimensões do rotor:

Para turbina Francis, conforme mostrado nas Figuras 16 e 17:

a) Calcula-se a velocidade tangencial da entrada do rotor ($u4e$):

$$u4e = [(2 \cdot Y) / (0,06 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qAn}^2 - 0,762 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qAn} + 2,68)]^{0,5} \quad (13)$$

b) Calcula-se o diâmetro externo da entrada do rotor ($D4e$):

$$D4e = u4e / (\pi \cdot n) \quad (14)$$

c) Calcula-se o diâmetro da entrada do tubo de sucção ($D5e$), com base no valor da rotação específica do rotor (n_{qAn}):

Para ($60 \leq n_{qAn} \leq 100$):

$$\mathbf{D5e} = \mathbf{D4e} / (3,32 - 0,975 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qAn}) \quad (15)$$

Para ($100 < n_{qAn} \leq 250$):

$$\mathbf{D5e} = \mathbf{D4e} / (0,165 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qAn}^2 - 0,835 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qAn} + 2,017) \quad (16)$$

Para ($250 < n_{qAn} < 350$):

$$\mathbf{D5e} = \mathbf{D4e} / (1,025 - 0,03 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qAn}) \quad (17)$$

d) Calcula-se o diâmetro interno da entrada do rotor (D4i):

$$\mathbf{D4i} = 30 \cdot \mathbf{D5e} \cdot n_{qAn}^{-0,667} \quad (18)$$

e) Calculam-se as alturas externa (Le) e interna do rotor (Li):

$$\mathbf{Le} = 0,25 \cdot \mathbf{D5e} \quad (19)$$

$$\mathbf{Li} = (0,4 + 0,168 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qAn} - 0,0177 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qAn}^2) \cdot \mathbf{D5e} \quad (20)$$

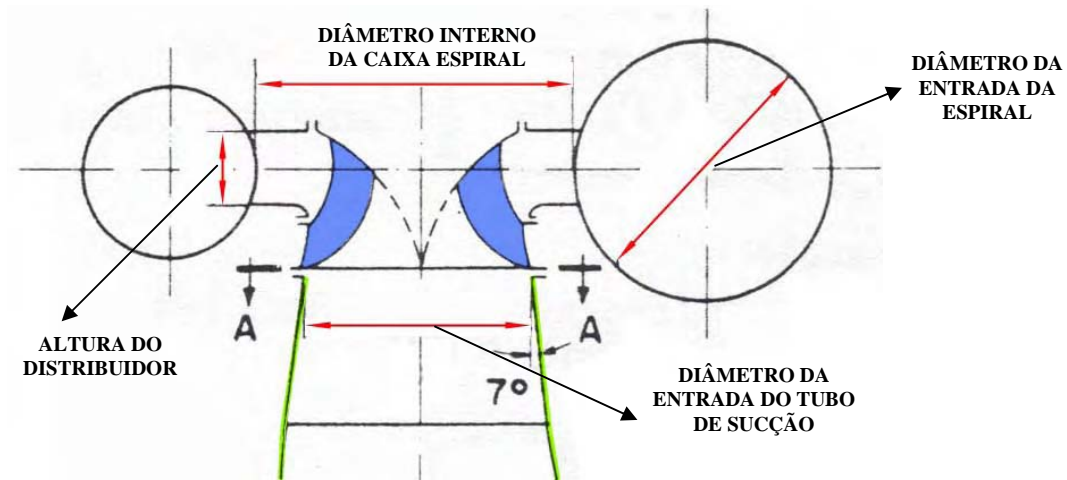


Figura 16 – Dimensões do rotor e caixa espiral da turbina Francis

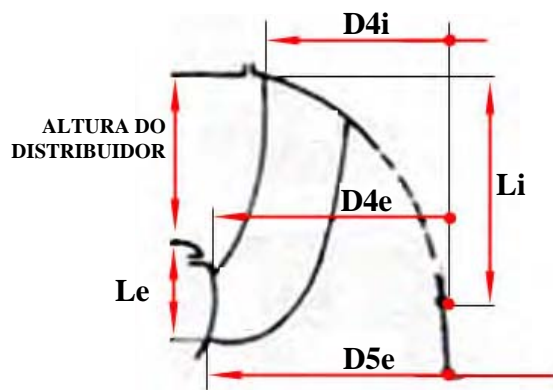


Figura 17 – Detalhe do rotor da turbina Francis

Para turbinas Kaplan, conforme mostrado na Figuras 18 e19:

- a) Calcula-se a velocidade meridional no rotor (cm):

$$cm = [(0,828 \cdot 10^{-3} \cdot n_{qAn} + 0,0688) \cdot Y]^{0,5} \quad (21)$$

b) Calcula-se a relação de cubo, obtendo-se ($D_i/D'e$):

$$D_i / D'e = (0,671 - 0,271 \cdot 10^{-3} \cdot n_{qA}) \quad (22)$$

onde:

D_i = diâmetro interno

$D'e$ = diâmetro externo

c) Calcula-se o diâmetro externo, utilizando o valor de ($D_i/D'e$):

$$D'e = \sqrt{(4 \cdot Q) / \pi \cdot [1 - (D_i/D'e)^2]} \cdot \text{cm} \quad (23)$$

d) Calcula-se o diâmetro interno D_i , usando a equação do item “b” anterior, com o valor obtido do diâmetro externo.

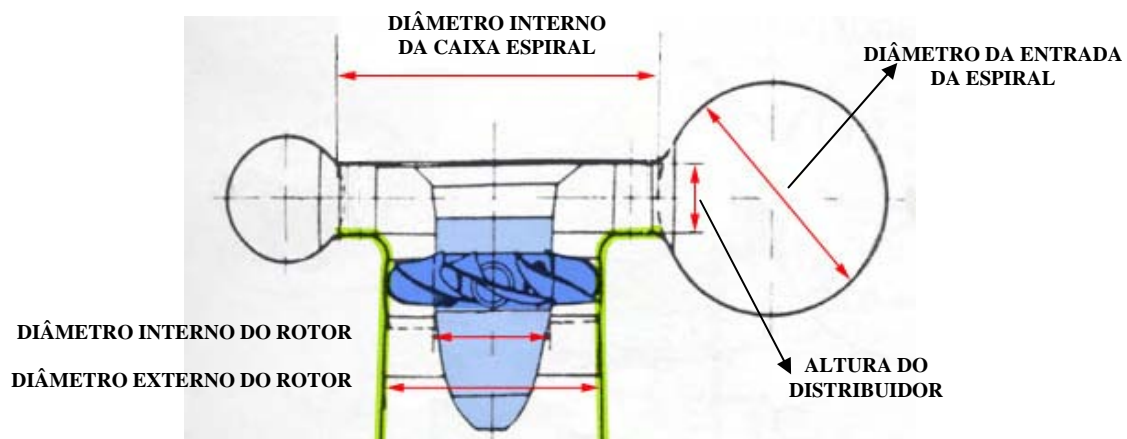


Figura 18 – Dimensões do rotor e caixa espiral da turbina Kaplan

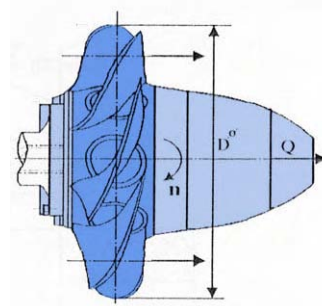


Figura 19 – Rotor da turbina Kaplan

Para Turbinas Pelton:

- a) Calcula-se a velocidade na seção mínima do jato (c_1):

$$c_1 = 1,372 \sqrt{Y} \quad (24)$$

- b) Calcula-se o diâmetro do jato em sua seção mínima (D_j)

$$D_j = 0,963 \cdot Q^{0,5} \cdot Y^{-0,25} \quad (25)$$

- c) As dimensões das conchas, em média, são calculadas conforme as expressões da Equação 26 e mostradas na Figura 20.

$$L = 2,5 \cdot D_j \quad (26.a)$$

$$B = 3,8 \cdot D_j \quad (26.b)$$

$$T = 0,95 \cdot D_j \quad (26.c)$$

$$E = 1,15 \cdot D_j \quad (26.d)$$

$$m = 0,494 \cdot D_j \quad (26.e)$$

$$e = 1,1 \cdot D_j \quad (26.f)$$

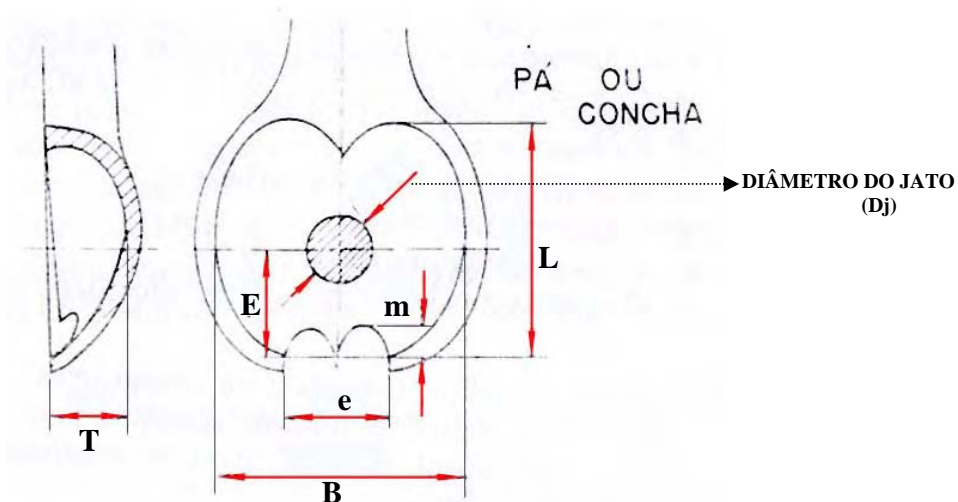


Figura 20 – Dimensões das pás ou conchas da turbina Pelton

d) Calcula-se a velocidade tangencial (u):

$$u = 0,44 \cdot c_1 \quad (27)$$

e) Calcula-se o diâmetro primitivo do rotor (D_m), com a rotação (n), como mostra a Figura 21:

$$D_m = u / (\pi \cdot n) \quad (28)$$

f) Calcula-se o número de pás para orientação (z), como mostra a Figura 21:

$$z = 2,7 \cdot (D_m/D_j) \quad (29)$$

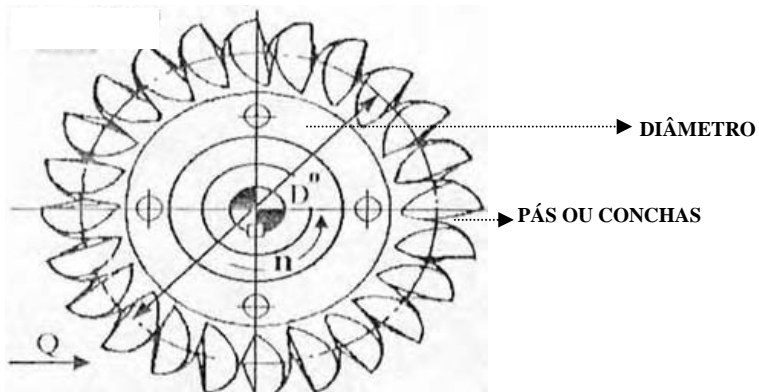


Figura 21 – Rotor da turbina Pelton

- g) Calcula-se o diâmetro do injetor (D_e), diâmetro máximo da agulha (D_{max}) e do cano (D_c), seguindo as Equações 30, 31 e 32 (Figura 22).

$$D_e = 1,15 \cdot D_j \quad (30)$$

$$D_{max} = 1,55 \cdot D_j \quad (31)$$

$$D_c = 3,75 \cdot D_j \quad (32)$$

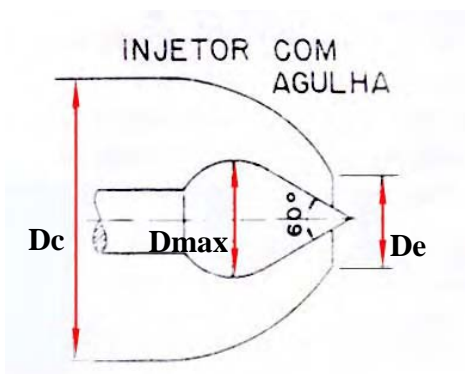


Figura 22 – Dimensões do injetor da turbina Pelton

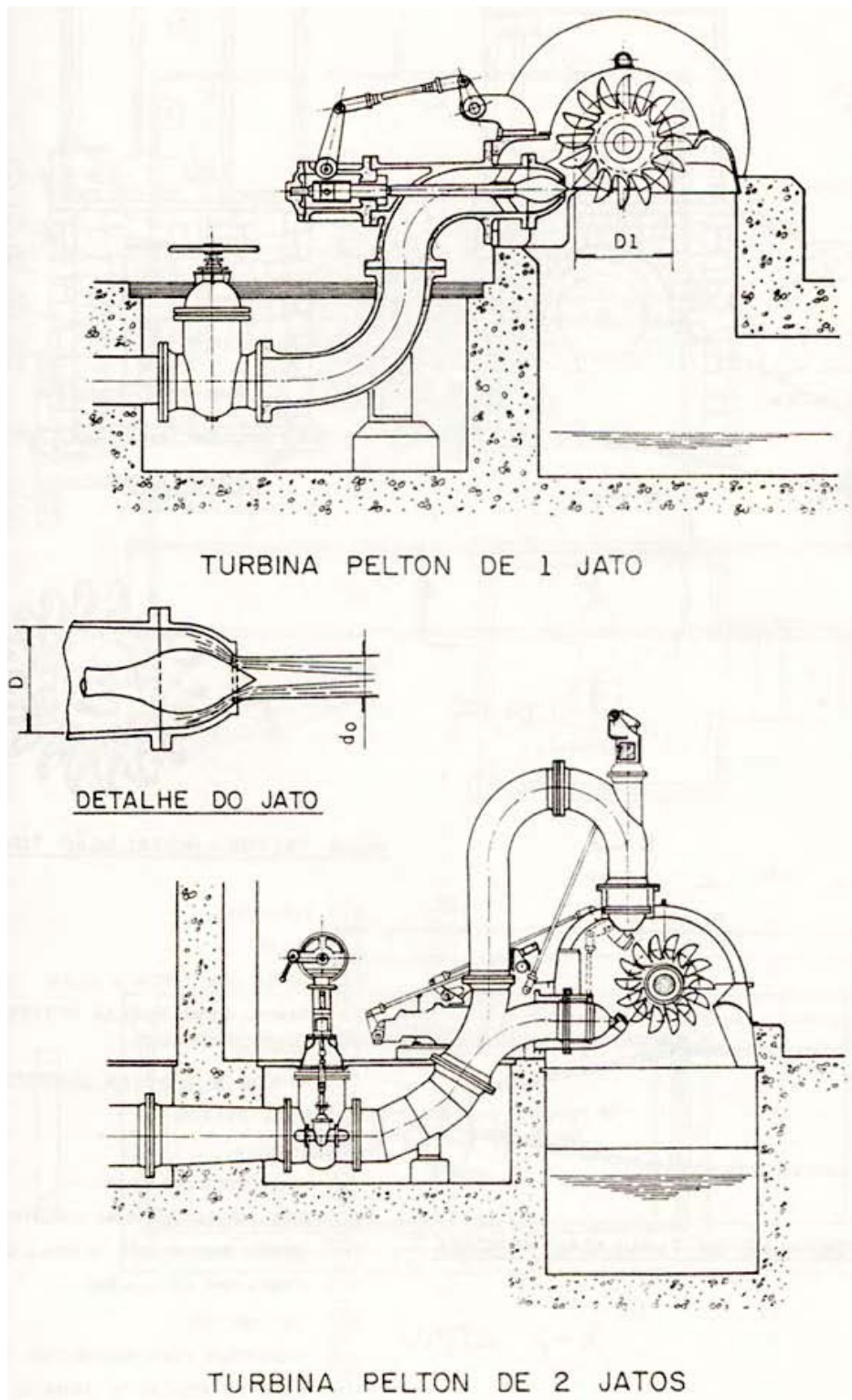


Figura 23 – Turbinas Pelton de 1 jato e 2 jatos

5.2.1.4 Passo 4 do roteiro: cálculo da caixa espiral

Cálculo da caixa espiral para turbinas Francis e Kaplan, como mostrado nas Figuras 24 e 25:

- a) Calcula-se o diâmetro interno da caixa espiral (D_e):

$$D_e = (0,16 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qA}^2 - 0,98 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA} + 2,9) \cdot D5e \quad (33)$$

- b) Calcula-se o diâmetro da entrada da espiral (DE):

Para Turbina Francis:

$$DE = (0,16 \cdot 0,708 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA} - 0,122 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qA}^2) \cdot D4e \quad (34)$$

Para Turbina Kaplan:

$$DE = 2,43 \cdot Q^{0,5} \cdot Y^{-0,25} \quad (35)$$

- c) Calcula-se a altura do distribuidor (bo)

Para Turbina Francis:

$$bo = (0,165 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA} - 0,018 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qA}^2) \cdot D5e \quad (36)$$

Para Turbina Kaplan:

$$bo = 0,34 \cdot D_e \quad (37)$$

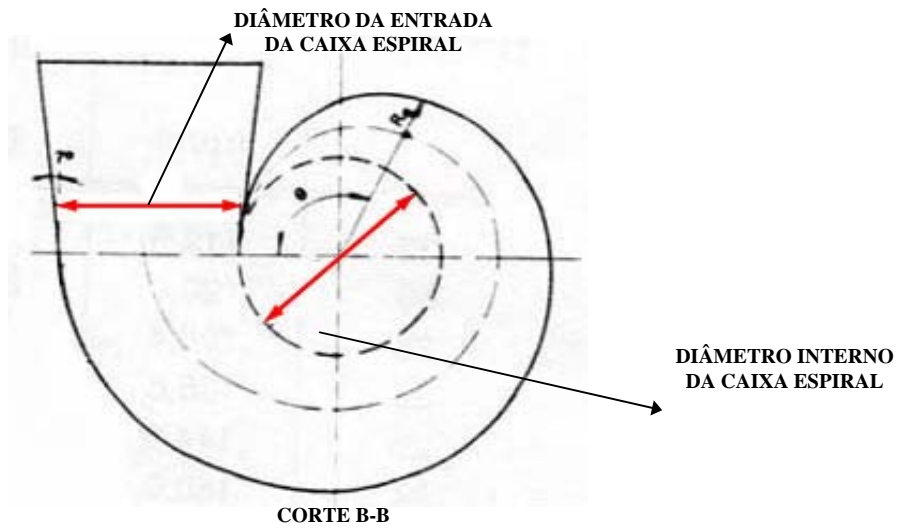


Figura 24 – Caixa Espiral da turbina hidráulica

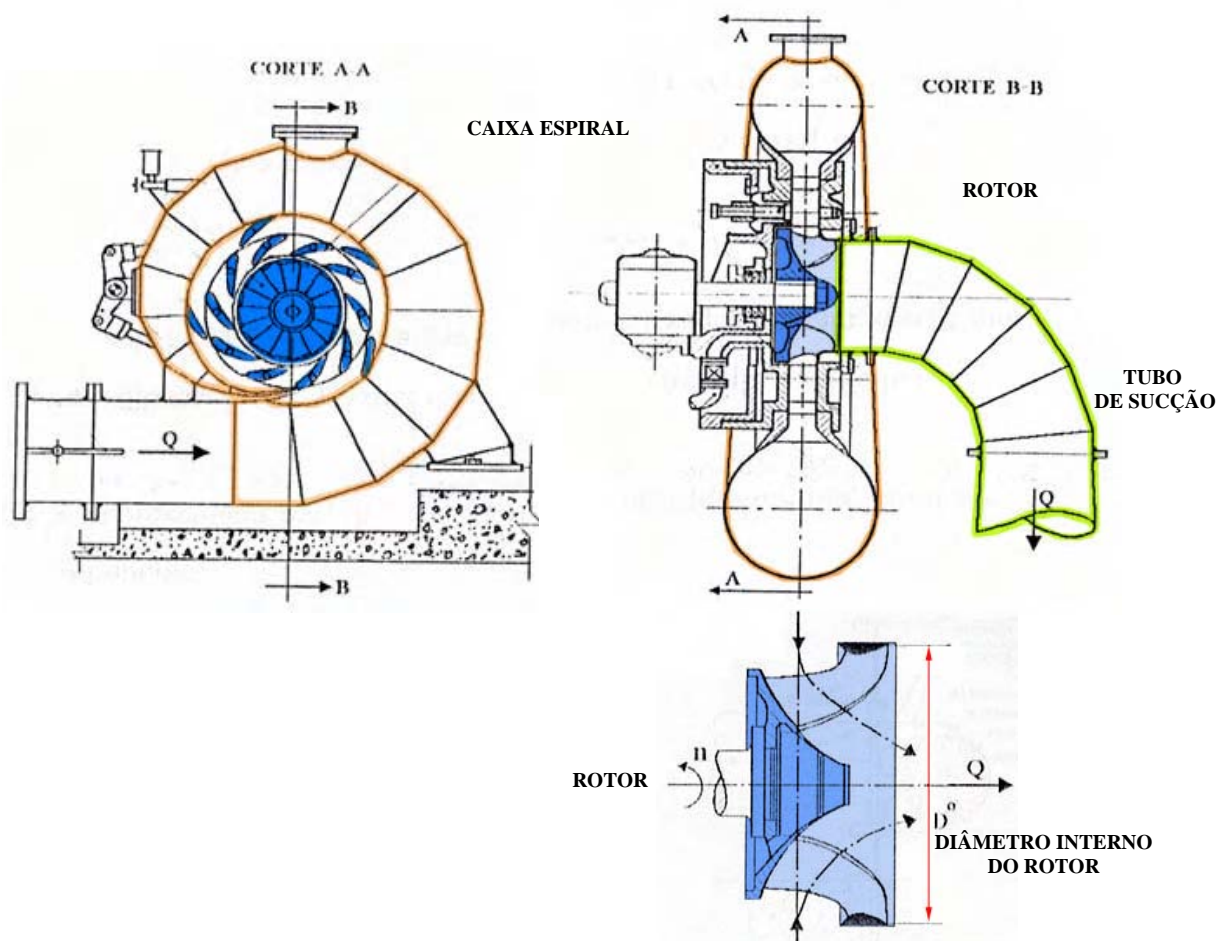


Figura 25 – Turbina Francis de eixo horizontal e caixa espiral de chapa soldada, com destaque do rotor

5.2.1.5 Passo 5 do roteiro: cálculo das dimensões do tubo de sucção

Chamaremos as dimensões principais do tubo de sucção de L_s , LL , L_h e L_b , mostradas nas Figuras 26 e 27:

Calculamos a dimensão L_s de acordo com as expressões mostradas na Equação 38.

Para ($n_{qA} \leq 115$):

$$L_s = (5,7 - 1,91 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA}) \cdot D5e \quad (38.a)$$

Para ($115 < n_{qA} \leq 200$):

$$L_s = (1,258 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qA}^2 - 4,76 \cdot 10^{-2} \cdot n_{qA} + 7,313) \cdot D5e \quad (38.b)$$

Para ($n_{qA} > 200$):

$$L_s = (2,95 - 6,67 \cdot 10^{-4} \cdot n_{qA}) \cdot D5e \quad (38.c)$$

Calculamos as dimensões LL , L_h e L_b através das expressões mostradas nas Equações 39, 40 e 41.

$$LL = 4,7 \cdot D5e \quad (39)$$

$$L_h = 1,15 \cdot D5e \quad (40)$$

$$L_b = 3,2 \cdot D5e \quad (41)$$

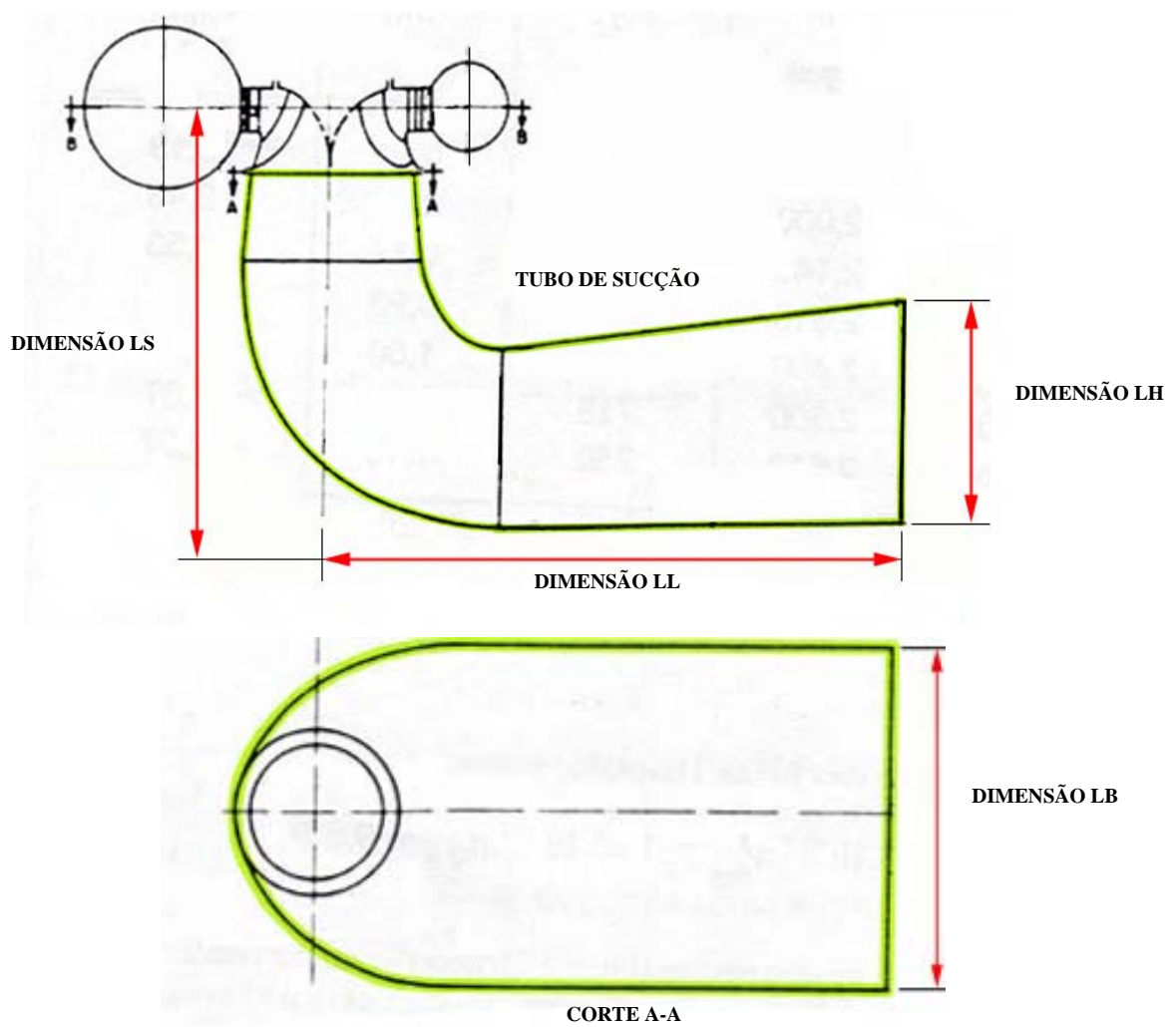


Figura 26 – Dimensões do Tubo de Sucção da Turbina Francis

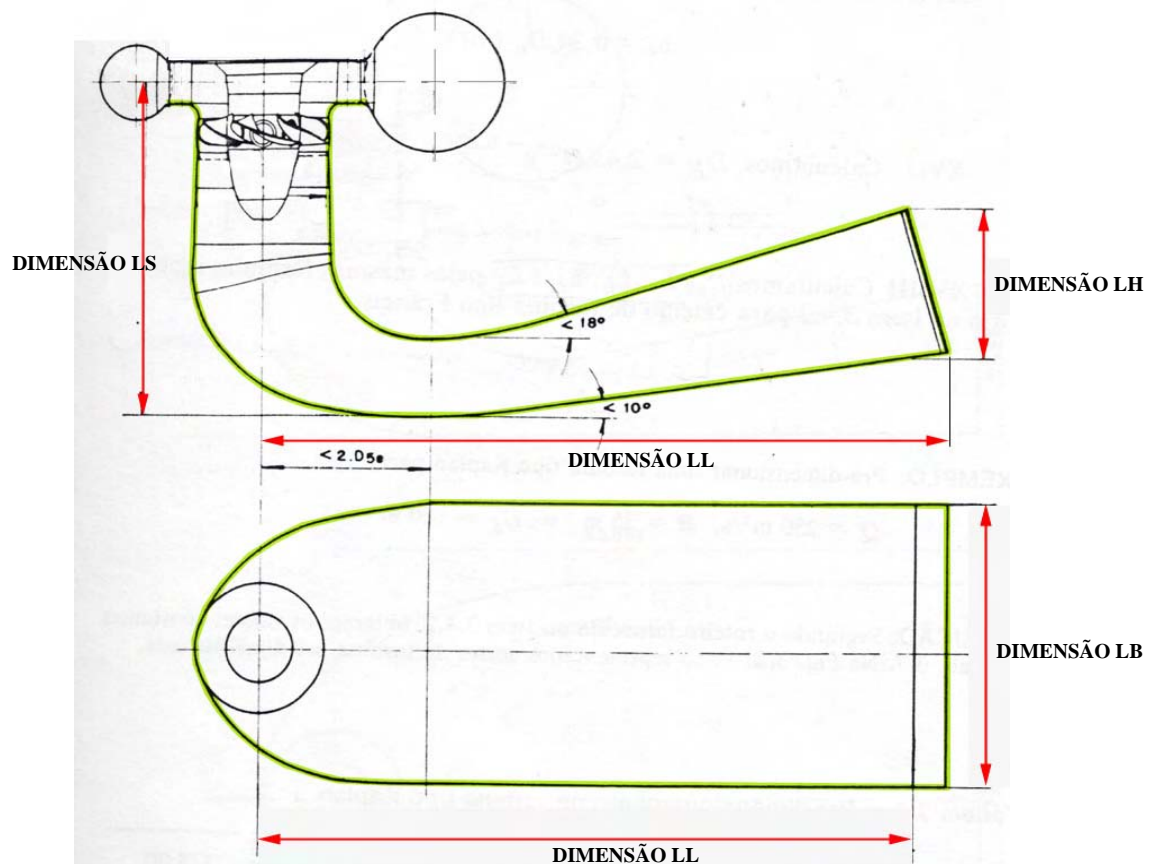


Figura 27 – Dimensões do Tubo de Sucção da Turbina Kaplan

5.2.1.6 Passo 6 do roteiro: cálculo da altura máxima de sucção

Para Turbinas Francis e Kaplan:

- a) calcula-se o coeficiente de cavitação (σ_{\min})

Para turbina Francis:

$$\sigma_{\min} = 25 \cdot 10^{-3} (1 + 10^{-4} \cdot n_{qA}^2) \quad (42)$$

Para turbina Kaplan:

$$\sigma_{\min} = 3,28 \cdot 10^{-6} \cdot n_{qA}^2 - 1,65 \cdot 10^{-3} \cdot n_{qA} + 0,549 \quad (43)$$

- b) calcula-se a altura máxima de sucção ($h_{s_{max}}$), em metros, utilizando-se o valor de entrada “Altitude” (H), conforme mostrado na Figura :15:

$$h_{s_{max}} = 10 - 0,00122 \cdot H_L - \sigma_{min} \cdot H \quad (44)$$

5.2.1.7 Passo 7 do roteiro: cálculo do rendimento e potência

- Calculamos o rendimento da turbina:

- a) Fixa-se um rendimento total (nt)
 b) Adota-se um rendimento mecânico (nm) no intervalo:

Para turbinas Francis

$$0,85 < nm < 0,97$$

Para turbinas Kaplan e Pelton

$$0,80 < nm \leq 0,97$$

- c) Calcula-se o rendimento hidráulico (nh):

$$nh = nt / nm \quad (45)$$

- Calculamos as potências hidráulica (Ph) e no eixo da turbina (Pe):

$$Ph = Q \cdot Y \quad (46)$$

$$Pe = Ph \cdot nt \quad (47)$$

5.3.2 Roteiro para dimensionar turbina hidráulica do tipo Michell-Banki

Com base nas informações BETTA HIDROTURBINAS INDÚSTRIA e COMÉRCIO LTDA e equações demonstradas por Martinez (1983), foi estabelecido, no presente estudo, um roteiro para dimensionamento da turbina hidráulica do tipo Michell-Banki.

5.3.2.1 Passo 1 do roteiro: cálculo da potência no eixo da turbina

Conforme Tabela 12, do fabricante Betta Turbinas, em anexo, calcula-se a potência no eixo da turbina (P_e), em kW:

$$P_e = 6,6975 \cdot Q \cdot H \quad (48)$$

A seguir, equações demonstradas por Martinez (1983).

5.3.2.2 Passo 2 do roteiro: cálculo da rotação da turbina (n), em rpm.

$$n = 4000 \cdot (\sqrt{H} / D) \quad (49)$$

onde: D = diâmetro do rotor Michell-Banki, igual a 30 cm.

5.3.2.3 Passo 3 do roteiro: cálculo do rotor

a) Largura do rotor (B), em cm:

$$B = B_i + e_d \quad (50)$$

Sendo:

Largura do injetor (B_i), em cm:

$$B_i = 18.100 \cdot (Q / (D(\sqrt{H}))) \quad (51)$$

Espessura do disco (e_d), em cm:

$$e_d = D / 23,6 \quad (52)$$

b) Diâmetro do eixo do rotor (d), em cm:

$$d = 12,7 \cdot \sqrt[4]{(Pe_l * 0,9)/n} \quad (53)$$

c) Diâmetro máximo (d_{max}):

$$d_{max} = 0,4 \cdot D \quad (54)$$

d) Diâmetro interno (D_i), em cm:

$$D_i = 0,66 \cdot D \quad (55)$$

e) Diâmetro primitivo (D_p), em cm:

$$D_p = 0,734 \cdot D \quad (56)$$

f) Raio da pá (r), em cm:

$$r = 0,16 \cdot D \quad (57)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Fluxogramas dos dimensionamentos realizados pelo sistema computacional

Para desenvolvimento desta pesquisa e obtenção dos resultados, foi necessário ter uma visão clara dos processos a serem efetuados pelo sistema computacional, e de que tipos de comportamento o fluxo de informações teria em cada processo. Os fluxogramas auxiliaram, em muito, neste aspecto, pois proporcionam um panorama do sistema a ser automatizado.

6.1.1 Turbinas Francis, Kaplan e Pelton: cálculo dos rendimentos da turbina e potências

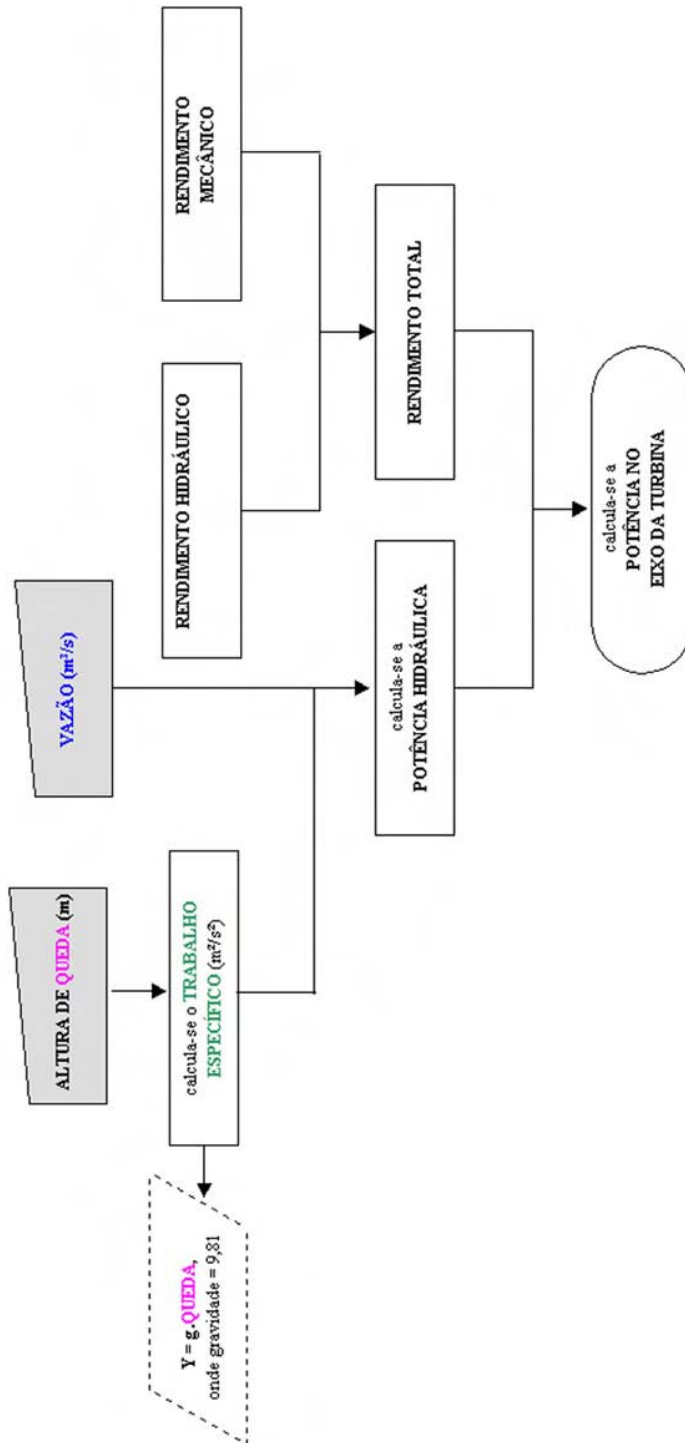


Figura 28 – Fluxograma: Turbinas Francis, Kaplan e Pelton - rendimentos da turbina e potências

6.1.2 Turbinas tipo Francis, Kaplan e Pelton: cálculo da rotação específica da turbina

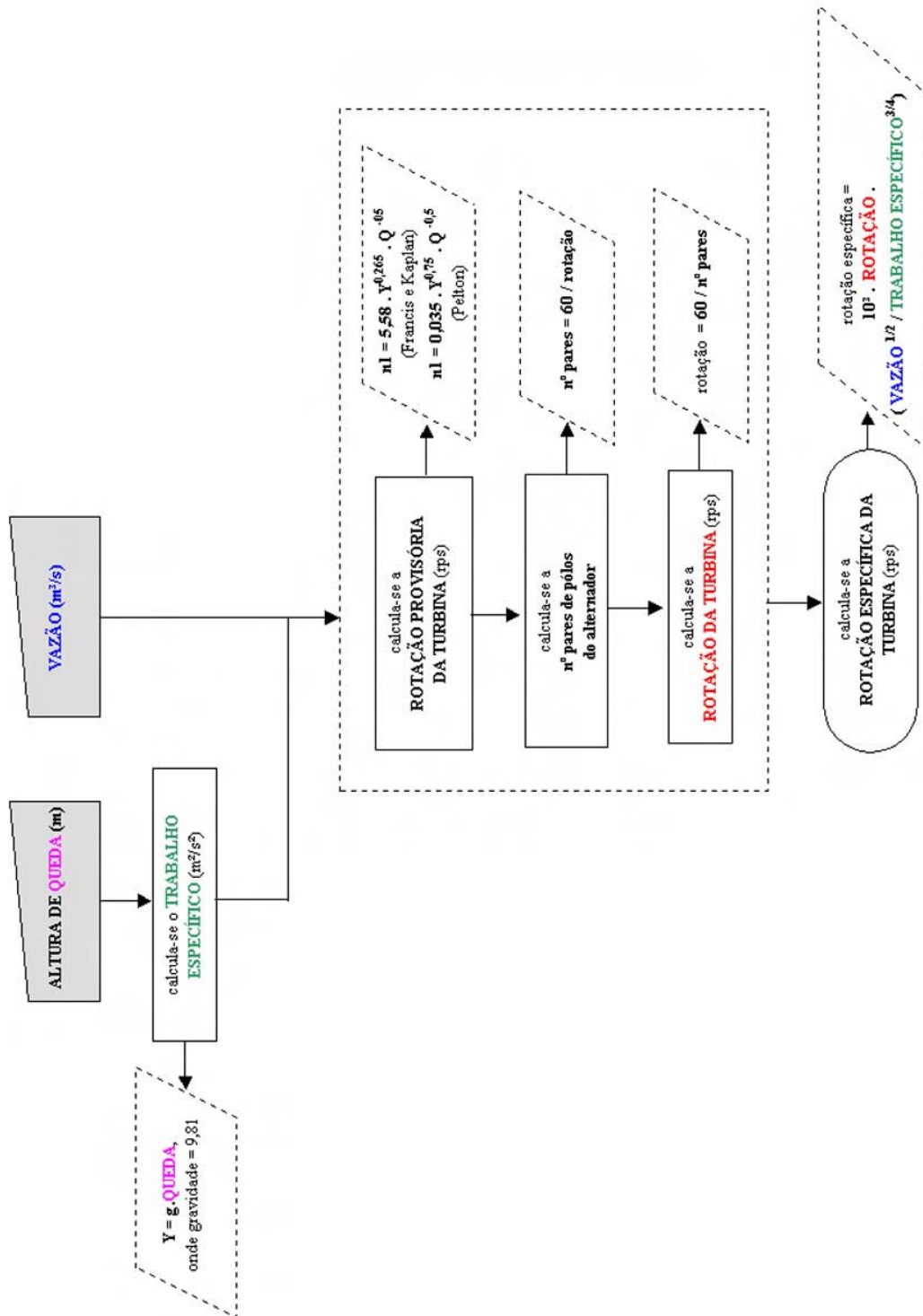


Figura 29 – Fluxograma: Turbinas Francis, Kaplan e Pelton - rotação específica da turbina

6.1.3 Turbinas tipo Francis e Kaplan: cálculo da rotação específica do rotor

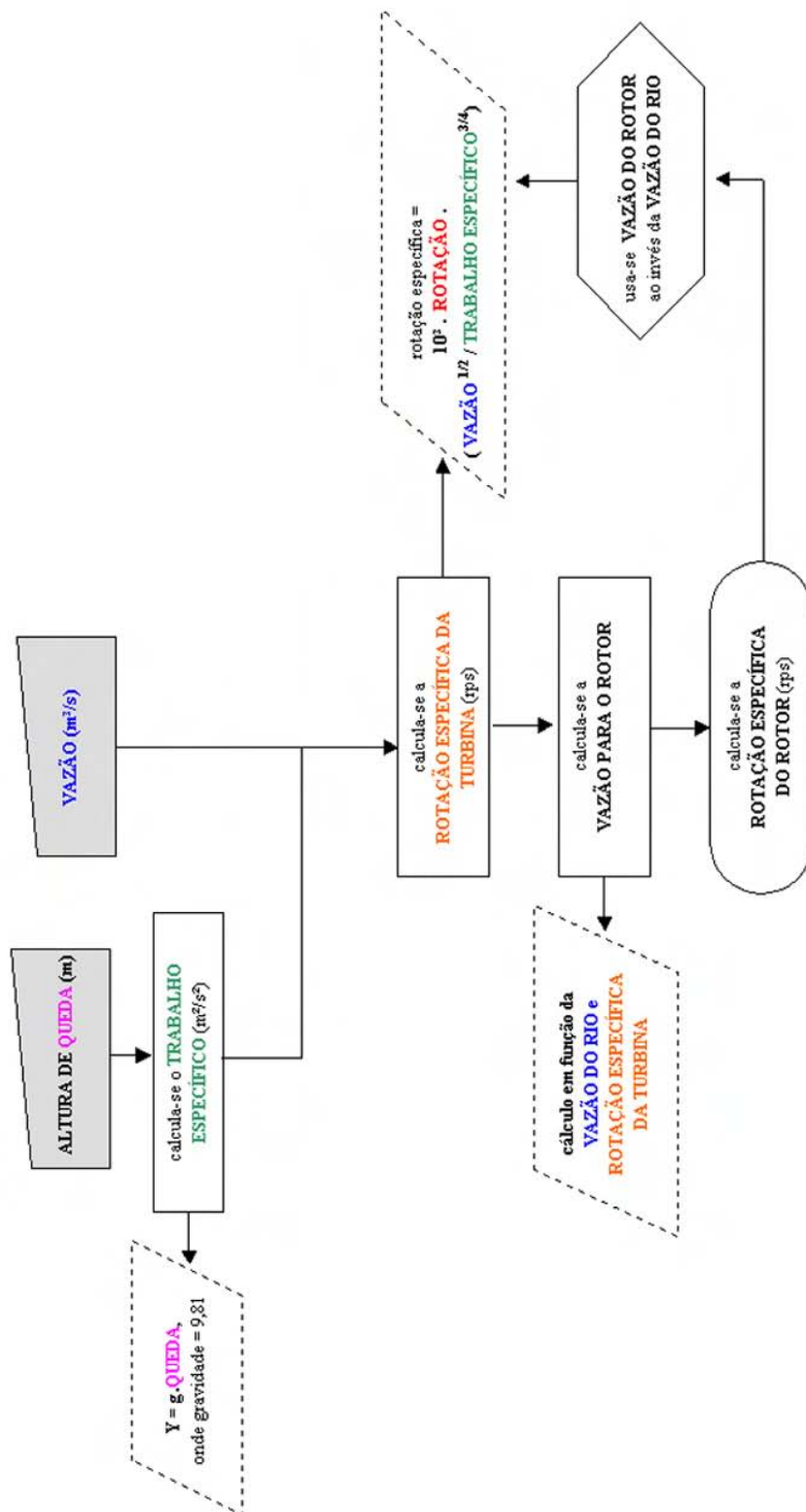


Figura 30 – Fluxograma: Turbinas Francis, e Kaplan - rotação específica do rotor

6.1.4 Turbinas tipo Francis: cálculo do rotor e tubo de sucção

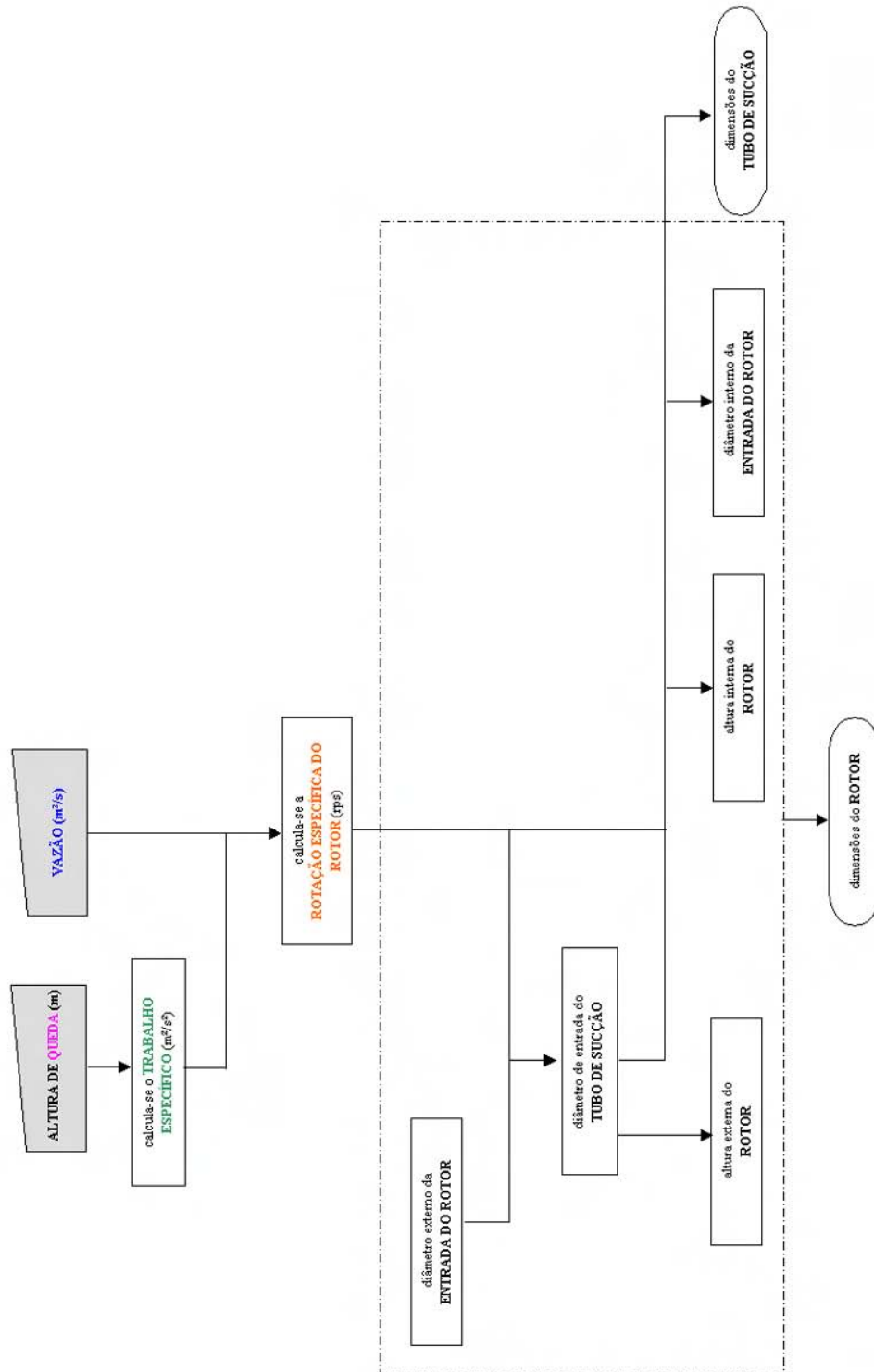


Figura 31 – Fluxograma: Turbinas Francis e Kaplan - cálculo do rotor e tubo de sucção

6.1.5 Turbinas tipo Kaplan: cálculo do rotor e tubo de sucção

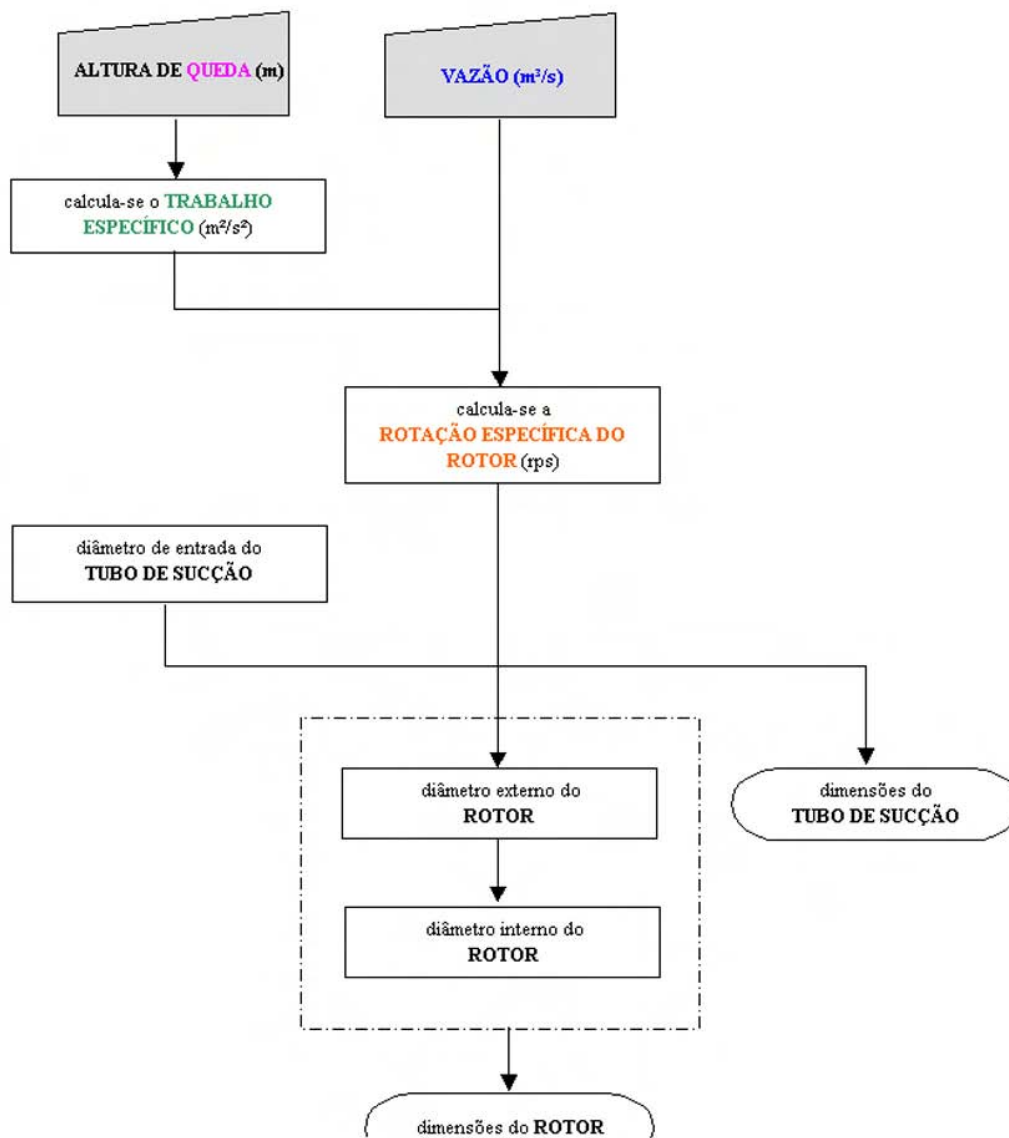


Figura 32– Fluxograma: Turbina Kaplan - cálculo do rotor e tubo de sucção

6.1.6 Turbinas tipo Francis: cálculo da caixa espiral

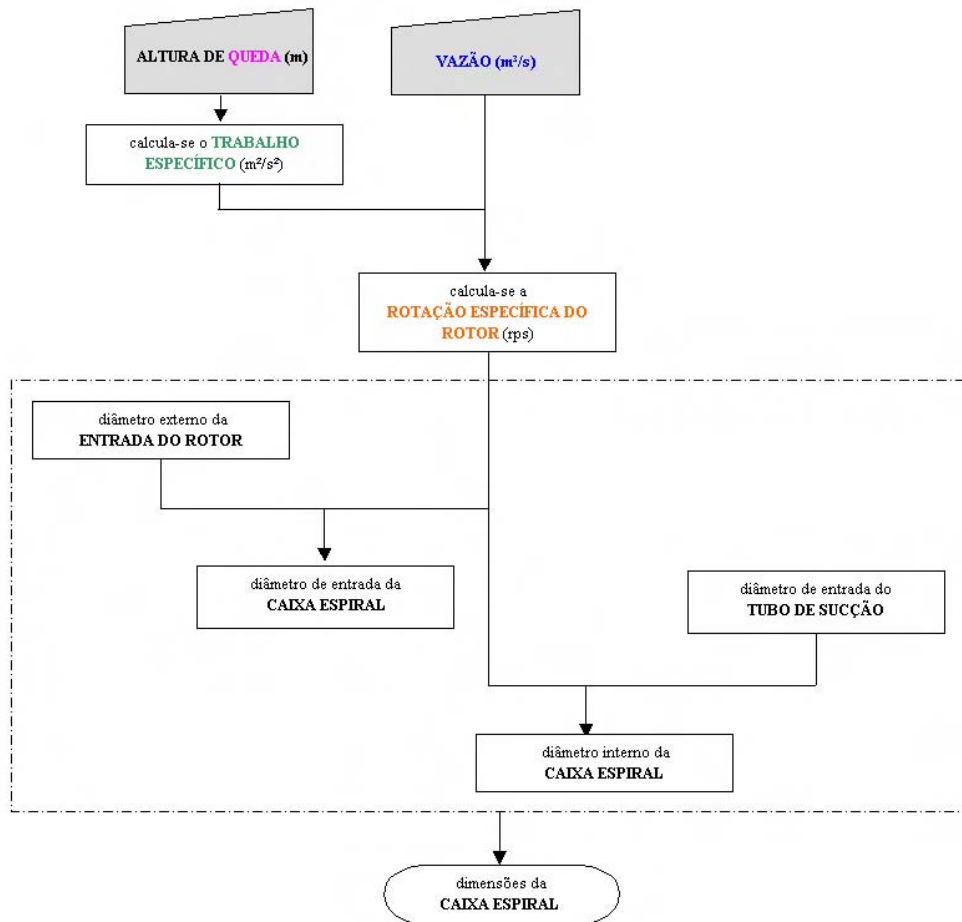


Figura 33– Fluxograma: Turbina Francis - cálculo da caixa espiral

6.1.7 Turbinas tipo Kaplan: cálculo da caixa espiral

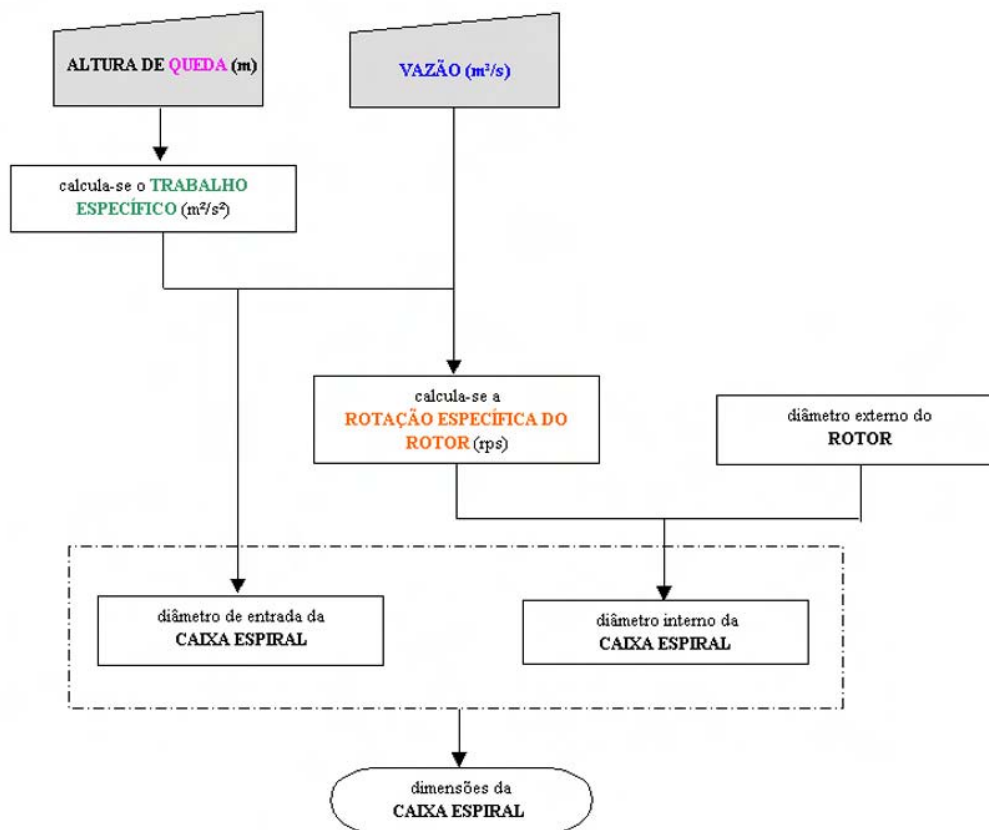


Figura 34 – Fluxograma: Turbina Kaplan - cálculo da caixa espiral

6.1.8 Turbinas tipo Francis e Kaplan: cálculo da altura máxima de sucção

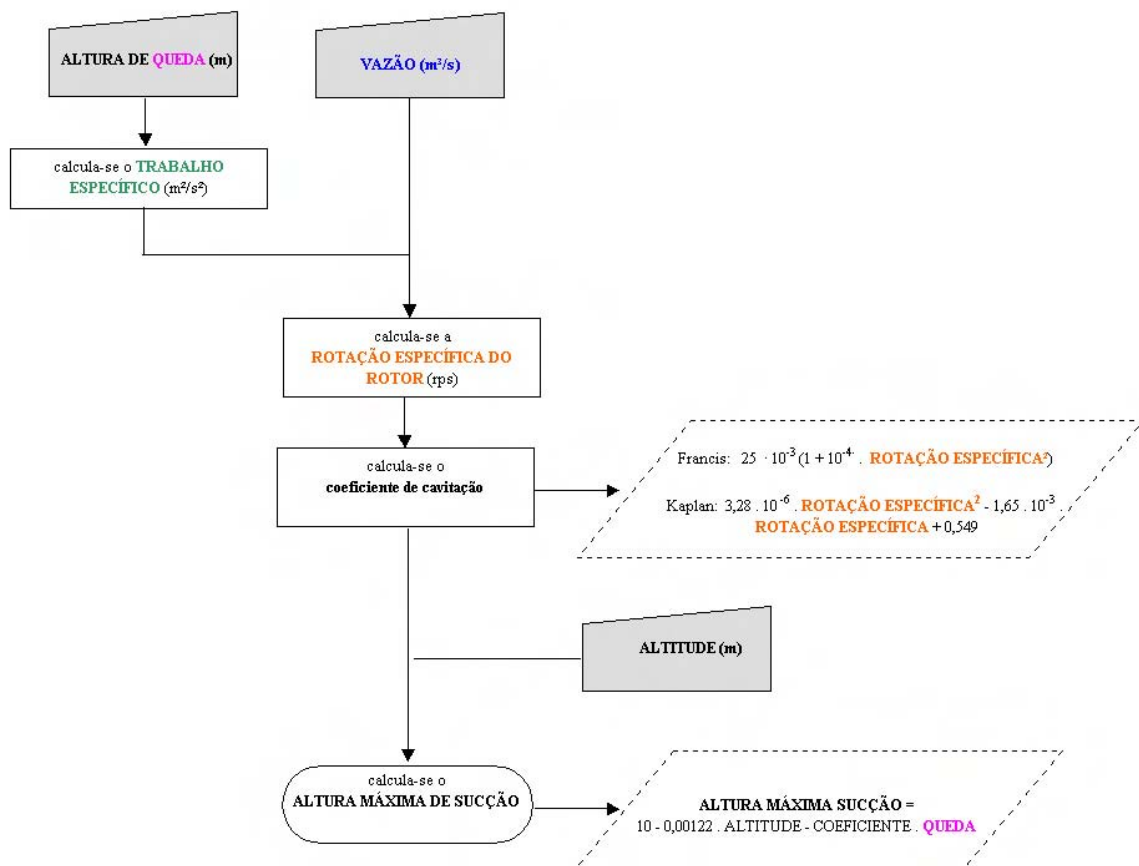


Figura 35 – Fluxograma: Turbinas Francis e Kaplan – altura máxima de sucção

6.1.9 Turbina tipo Michel-Banki: cálculo da potência

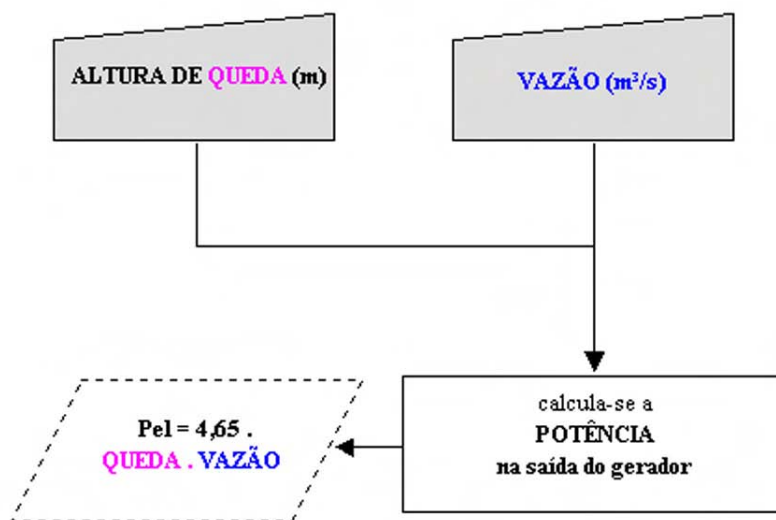


Figura 36 – Fluxograma: Turbina tipo Michel-Banki - potência

6.1.10 Turbina tipo Michel-Banki: cálculo da rotação

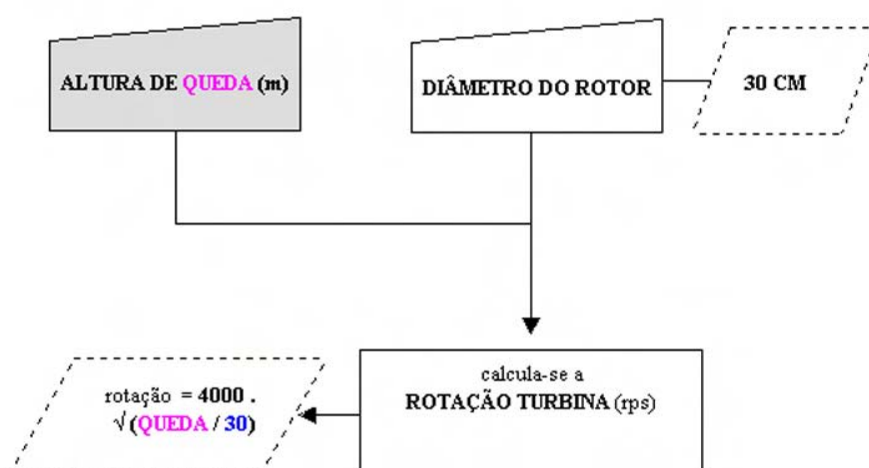


Figura 37 – Fluxograma: Turbina tipo Michel-Banki - rotação da turbina

6.1.11 Turbina tipo Michel-Banki: cálculo do rotor

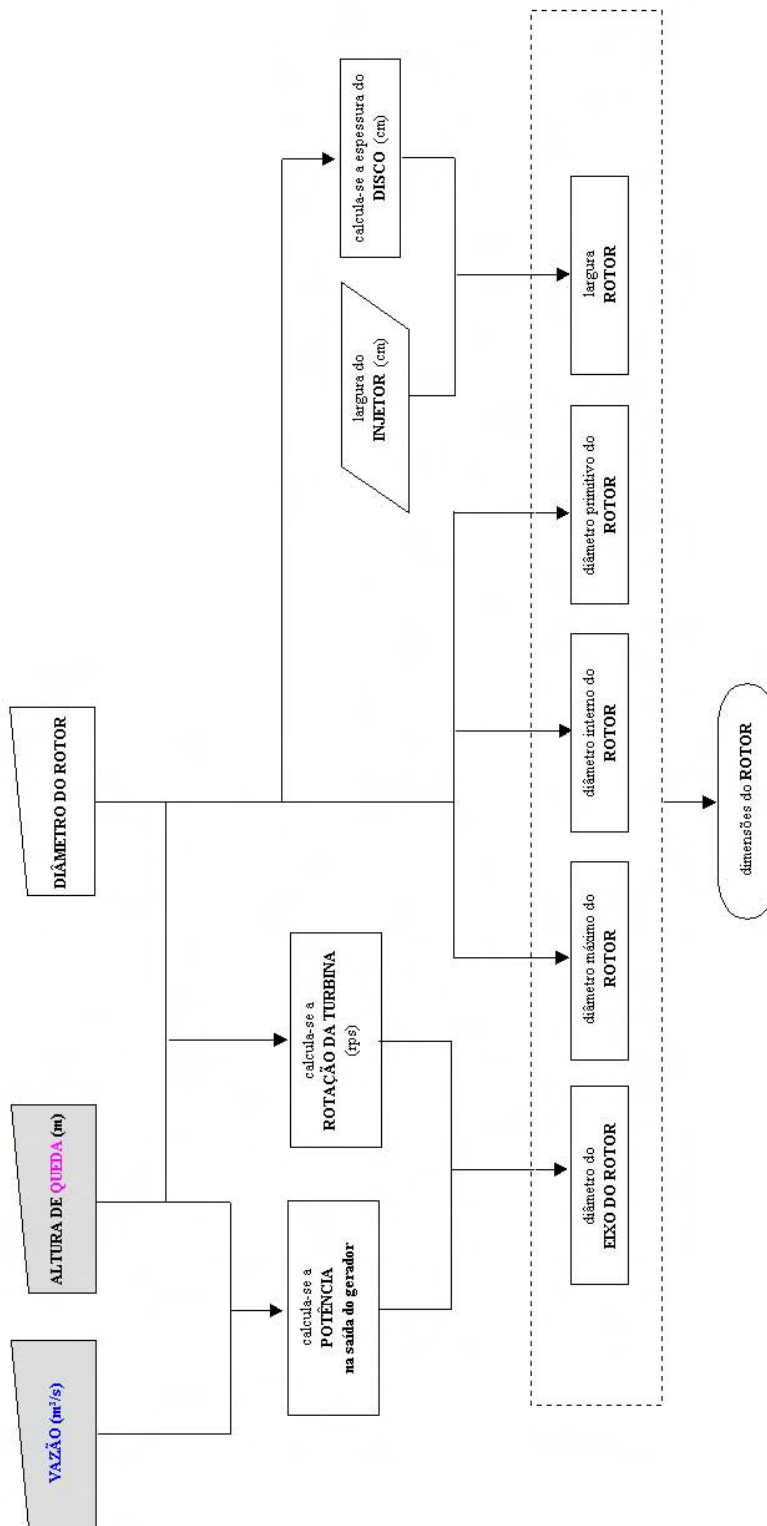


Figura 38 – Fluxograma: Turbina Michell-Banki - cálculo do rotor

6.2 Manual de Utilização do Sistema de Dimensionamento

6.2.1 Menu Principal

Por este controle no canto superior direito da tela, o usuário escolhe qual tipo de turbina deseja dimensionar, dentre os quatro tipos estudados no presente trabalho (Figura 39).

Dimensionamento de Turbinas Hidráulicas

Fontes de Dados:
 Vazão do rio: 0,00 m³/s Queda Bruta: 0,00 m Altura Local: 0,00 m

Dados Auxiliares Dimensões

Calcular Turbina do Tipo:
 Kaplan Francis Kaplan Pelton Michel-Buck

Trabalho Específico: J/kg **Rotação Específica:**

Potência:
 Hidráulica: kW **Rendimento:**
 Mecânico: %
 Hidráulico: %
 Total: %

Rotor:
 Vazão: m³/s **Altura de Sucção:**
 Rotação Específica:
 Velocidade Tangencial da Entrada do Rotor: m/s

Botões: CALCULAR Sair do Sistema




Figura 39 - Tela de entrada dos dados

6.2.2 Entrada de dados principais

A entrada dos valores de vazão do rio, queda bruta e altitude local é feita pelo usuário nos campos em branco, na tela (Figura 40). O sistema computacional não aceita valores em branco, exibindo a mensagem de alerta mostrada na Figura 41.

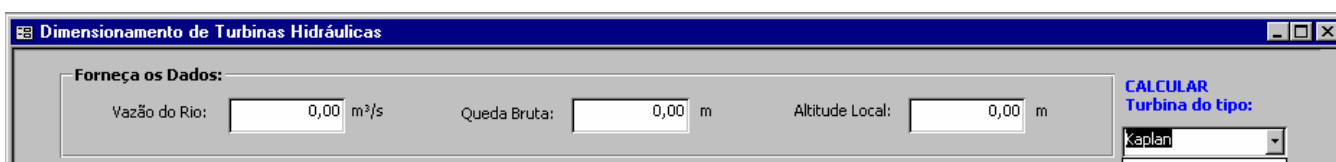


Figura 40 - Campos de entrada de dados

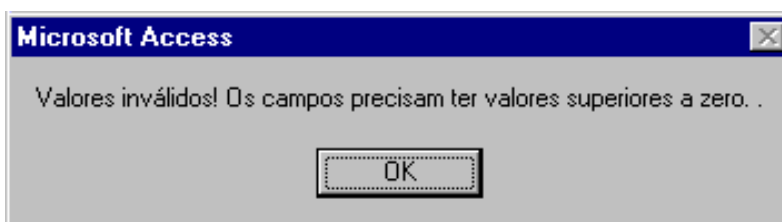


Figura 41 - Mensagem de alerta para campos de entrada de dados

6.2.3 Tela de resultados

Os valores resultantes das equações de dimensionamento são apresentados ao usuário em duas partes: dados auxiliares e dimensões, bastando clicar na guia para visualizá-los (Figuras 42 e 43).

Dimensionamento de Turbinas Hidráulicas

Formeça os Dados:

Vazão do Rio: m³/s
 Queda bruta: m
 Altura Local: m

CALCULAR
 Turbina do Tipo:

Dados Auxiliares Dimensões

Trabalho Específico: J/kg **Rotação Específica:**

Potências:

Hidráulica: kW
 Mecânica: rps
 No eixo da Turbina: kW
 Hidráulica: rps
 Total: rps

Rendimentos:

Mecânico: rps
 Hidráulica: rps
 Total: rps

Altura de Sucção:

Rotor:

Vazão: m³/s
 Potência Específica: kW
 Velocidade Tangencial da Entrada do Rotor: m/s

CALCULAR **Sair do Sistema**

Figura 42 - Tela dos dados auxiliares para cálculo das dimensões da turbina

Dimensionamento de Turbinas Hidráulicas

Forneça os Dados:

Vazão do Eixo: 392,00 m³/s Queda Bruta: 46,00 m Altitude Total: 700,00 m

Dados Auxiliares **Dimensiones**

Turbina do tipo: Francis

Entrada do Rotor:

Dímetro Externo: 6,58 m Altura Externa: 4,75 m

Dímetro Interno: 4,94 m Altura Interna: 5,09 m

Caixa Espiral:

Dímetro de Entrada: 7,81 m

Dímetro Interno: 9,81 m

Distribuidor:

Altura: 2,28 m

Rotor:

Altura Externa: 4,75 m

Altura Interna: 5,09 m

Tubo de Sucção:

Dímetro de Entrada: 6,98 m

Medida LS: 19,26 m

Medida LI: 30,82 m

Medida LH: 8,03 m

Medida LB: 22,35 m

CALCULAR **Sair do Sistema**

Figura 43 - Tela dos dados das dimensões das Turbinas

6.3. Validação do sistema computacional

6.3.1 Obtenção de dados de resultados

Através da execução do sistema computacional do presente trabalho, foram obtidos os seguintes dados de resultados:

6.3.1.1 Estudo de caso para a turbina Francis

Como dados de entrada, foram digitados os valores do exemplo apresentado no Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de entrada para simulação de dimensionamento de turbina Francis

Dados de entrada	valor	unid
Q (vazão do rio)	392,00	m ³ /s
H (altura ou queda)	46,00	m
H_L (altitude local)	700,00	m

Foram obtidos os dados de resultados mostrados no Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos na simulação de dimensionamento de Turbina Francis

Dados calculados	valor	unid
Y (trabalho específico)	451,3	J/kg
n₁ (rotação a partir de uma provisória)	1,42	rps
z_p (nº pares de pólos do alternador)	42	---
n (rotação da turbina)	1,4286	rps
n_{qA} (rotação específica da turbina)	288,87	---

nt	(rendimento total)	0,93	---
nm	(rendimento mecânico)	0,95	---
nh	(rendimento hidráulico)	0,98	---
Ph	(potência hidráulica)	176,91	MW
Pe	(potência no eixo da turbina)	164,53	MW
hsmax	(altura máxima de sucção)	-1,60	m
Qn	(vazão do rotor)	357,3	m ³ /s
n_{qAn}	(rotação específica do rotor)	275,77	---
u4e	(velocidade tangencial da entrada do rotor)	29,53	m/s
D4e	(diâmetro externo da entrada do rotor)	6,580	m
D5e	(diâmetro da entrada do tubo de sucção)	6,983	m
D4i	(diâmetro interno da entrada do rotor)	4,935	m
Le	(altura externa do rotor)	1,746	m
Li	(altura interna do rotor)	5,088	m
bo	(altura do distribuidor)	2,279	m
De	(diâmetro interno da caixa espiral)	9,806	m
DE	(diâmetro da entrada da espiral)	7,811	m
Ls	(dimensão do tubo de sucção)	19,254	m
LL	(dimensão do tubo de sucção)	32,820	m
Lh	(dimensão do tubo de sucção)	8,030	m
Lb	(dimensão do tubo de sucção)	22,246	m

6.3.1.2 Estudo de caso para a turbina Kaplan

Digitando-se os valores de exemplo, como dados de entrada:

Tabela 3 – Dados de entrada para simulação de dimensionamento de turbina Kaplan

Dados de entrada		valor	unid
Q	(vazão do rio)	250,00	m ³ /s
H	(altura ou queda)	25,00	m
H_L	(altitude local)	650,00	m

Foram obtidos os dados de resultados:

Tabela 4 – Resultados obtidos na simulação de dimensionamento de Turbina Kaplan

Dados calculados		valor	unid
Y	(trabalho específico)	242,25	J/kg
n1	(rotação a partir de uma provisória)	1,517	rps
Zp	(nº pares de pólos do alternador)	40	---
N	(rotação da turbina)	1,5	rps
n_{qA}	(rotação específica da turbina)	382,7	---
N_t	(rendimento total)	0,92	---
nm	(rendimento mecânico)	0,95	---
Nh	(rendimento hidráulico)	0,968	---
Ph	(potência hidráulica)	61,313	MW
h_{smax}	(altura máxima de sucção)	-0,743	m
Q_n	(vazão do rotor)	174,30	m ³ /s
n_{qAn}	(rotação específica do rotor)	319,55	---
D'e	(diâmetro interno do rotor)	7,204	m

Di	(diâmetro externo do rotor)	4,085	m
Bo	(altura do distribuidor)	2,449	m
DE	(diâmetro da entrada da espiral)	9,709	m
De	(diâmetro interno da caixa espiral)	10,755	m
Ls	(dimensão do tubo de sucção)	18,514	m
LL	(dimensão do tubo de sucção)	33,859	m
Lh	(dimensão do tubo de sucção)	8,285	m
Lb	(dimensão do tubo de sucção)	23,053	m

6.3.1.3 Estudo de caso para a turbina Pelton

Digitando-se os valores de exemplo, como dados de entrada:

Tabela 5 – Dados de entrada para simulação de dimensionamento de turbina Pelton

Dados de entrada		valor	unid
Q₂	(vazão do rio)	4,42	m ³ /s
H	(altura ou queda)	940	m
H_L	(altitude local)	200,00	m

Foram obtidos os dados de resultados:

Tabela 6 – Resultados obtidos na simulação de dimensionamento de Turbina Pelton

Dados calculados		valor	unid
Y	(trabalho específico)	9.221,4	J/Kg
n1	(rotação a partir de uma provisória)	10,76	rps
Zp	(nº pares de pólos do alternador)	6	

n	(rotação da turbina)	10	rps
n_{qA}	(rotação específica da turbina)	22,34	
nt	(rendimento total)	0,93	
nm	(rendimento mecânico)	0,95	
nh	(rendimento hidráulico)	0,98	
Ph	(potência hidráulica)	40.759	kW
Pe	(potência no eixo da turbina)	37.905	kW
c₁	(velocidade na seção mínima do jato)		m/s
D_j	(diâmetro do jato em sua seção mínima)		m
L	(diâmetro da concha)	365	mm
B	(diâmetro da concha)	409	mm
T	(diâmetro da concha)	139	mm
E	(diâmetro da concha)	168	mm
m	(diâmetro da concha)	53	mm
e	(diâmetro da concha)	161	mm
u	(velocidade tangencial)	60,61	m/s
D_m	(diâmetro primitivo do rotor)	1,929	m
z	(nº de pás)	25	
De	(diâmetro do injetor)	168	mm
D_{max}	(diâmetro da agulha)	226	mm
D_c	(diâmetro do cano)	550	mm

Os dados de resultados obtidos no presente trabalho, para as turbinas dos tipos Francis, Kaplan e Pelton, corroboram com aqueles obtidos por Zulcy (1983), no dimensionamento de turbinas.

6.3.2 Confronto entre a Turbina Michell-Banki e Francis através da potência versus vazão.

Para a validação do sistema computacional que pré-dimensiona as turbinas, foram utilizadas as equações descritas em métodos no capítulo anterior. Na Fazenda Lageado, pertencente à FCA/UNESP, existe uma Micro-Central Hidrelétrica (a qual está desativada) utilizando uma turbina Francis para gerar energia elétrica através de uma vazão de 340 L/s e uma queda de 20m. Ocorre também que a SABESP está construindo uma Estação de Tratamento de Esgoto e utilizará para uma mesma vazão, com uma queda de 50m, uma turbina Michell-Banki.

Para confrontar os resultados da potência versus vazão, das Turbinas Michell-Banki e Francis, para uma mesma queda, foram utilizados os dados de saída do sistema computacional.

Os referidos dados permitiram elaborar as Tabelas 7 e 8, e as respectivas Figuras 44 e 45.

Tabela 7 – Potência versus vazão, em função da queda, para a turbina Michell-Banki.

vazão queda	20m	30m	40m	50m
200	26,8	39,3	52,4	67,0
250	33,5	50,2	67,0	83,7
300	40,1	60,8	80,4	100,5
350	47,4	70,4	93,8	117,0
400	54,2	80,4	107,1	134,0
450	60,9	90,5	120,6	150,6
500	67,7	101,6	135,4	167,4

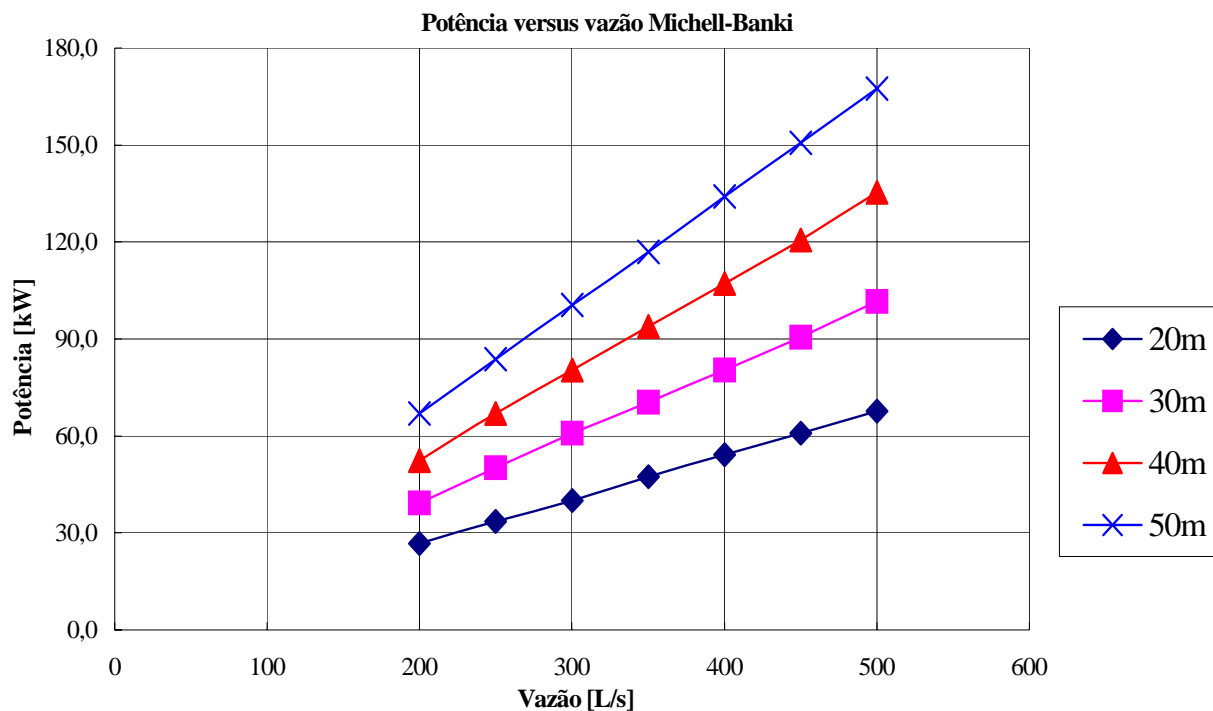


Figura 44 – Gráfico da potência versus vazão, para a turbina Michell-Banki

As equações que representam a linha de tendências das curvas da Figura 44 e seus respectivos R^2 , que é o coeficiente de determinação de cada curva, estão descritas na Tabela 8. É equação da potência de uma determinada queda em função da vazão.

Tabela 8 – Equações da linha de tendência das curvas do gráfico da Figura 44

Equação	Coeficiente de determinação da Curva (R^2)
$P_{20}=0,1369Q - 0,6714$	$R^2=0,9999$
$P_{30}=0,2051Q - 1,3179$	$R^2=0,9996$
$P_{40}=0,2735Q - 1,9107$	$R^2=0,9998$
$P_{50}=0,3346Q + 0,0464$	$R^2=1$

Tabela 9 – Potência versus vazão, em função da queda, para a turbina Francis.

vazão queda	20m	30m	40m	50m
200	31,8	47,7	63,6	79,5
250	39,7	59,6	79,5	99,3
300	47,7	71,5	95,4	119,2
350	55,6	83,4	111,2	139,1
400	63,6	95,4	127,1	158,9
450	71,5	107,3	143,0	178,8
500	79,5	119,2	158,9	198,7

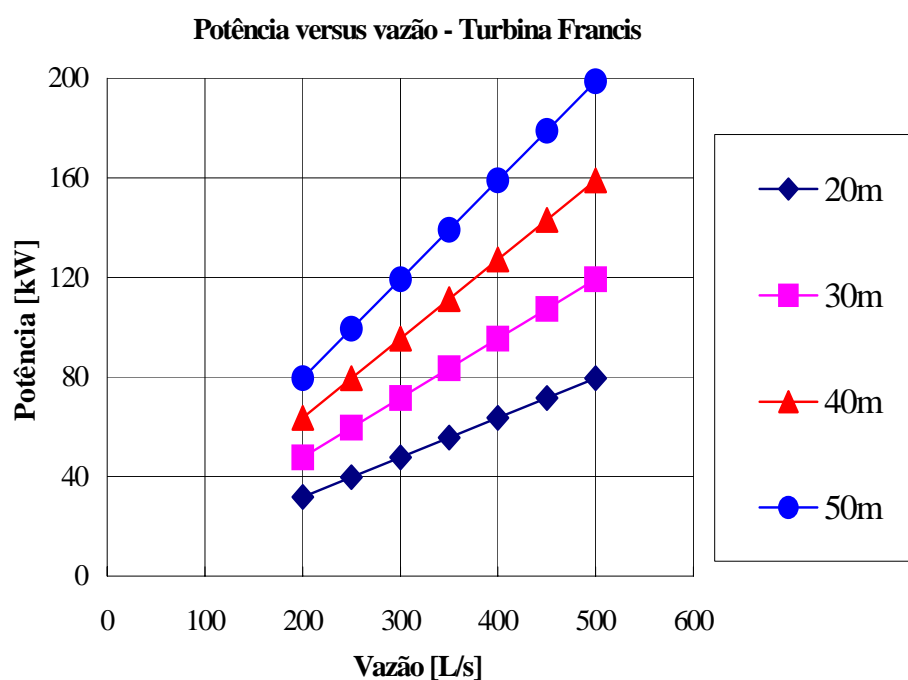


Figura 45 – Gráfico de Potência versus vazão – turbina Francis

As equações que representam a linha de tendências das curvas da Figura 45 e seus respectivos R^2 , que é o coeficiente de determinação de cada curva, estão descritas na Tabela 10. É equação da potência de uma determinada queda em função da vazão.

Tabela 10 – Equações da linha de tendência das curvas do gráfico da Figura 45

Equação	Coefficiente de determinação da Curva (R²)
P20=0,1589Q	R ² =1
P30=0,2384Q + 0,00002	R ² =1
P40=0,3178Q	R ² =1
P50=0,3973Q + 0,00002	R ² =1

As Figuras 44 e 45 identificam que, para uma mesma vazão, quanto maior a queda, maior será a inclinação da reta, cuja ordenada é a potência no eixo da turbina, entretanto mais intensidade na turbina Francis.

A Figura 44 mostra que com o aumento da vazão, para uma mesma queda, aumenta-se a potência no eixo da turbina. A Figura 45 indica a mesma tendência, porém de maneira mais acentuada, para uma mesma queda, devido o rendimento da turbina Francis ser maior que a o da turbina Michell-Banki. O rendimento da turbina Francis para esta faixa de potência é da ordem de 0,81 e o da turbina Michell-Banki, extraído da Tabela 11 da Beta Turbinas, em anexo, é 0,718. O rendimento da turbina Francis é em torno de 12,81% maior que o da turbina Michell-Banki para esta faixa de vazão e queda estudada.

Os valores das Tabelas 7 e 9 mostram que a potência da turbina Michell-Banki, é 0,8 dos valores da turbina Francis, exceto para a maior queda

Elaborou-se a Tabela 11, que indica, para cada vazão e queda, a razão entre as potências da turbina Michell-Banki e a da turbina Francis.

Tabela 11 – Razão entre potências das turbinas Michell-Banki e Francis

vazão queda	20m	30m	40m	50m
200	0,84	0,82	0,82	0,84
250	0,84	0,84	0,84	0,84
300	0,84	0,85	0,84	0,84
350	0,85	0,84	0,84	0,84
400	0,85	0,84	0,84	0,84
450	0,85	0,84	0,84	0,84
500	0,85	0,85	0,85	0,84

A menor razão, igual a 0,82, entre a potência da turbina Michell-Banki e a potência Francis, foi para a vazão de 200 L/s, para as quedas de 20m e 30m. Os outros valores ficaram entre 0,84 e 0,85.

7 CONCLUSÃO

Em função dos resultados alcançados, foram obtidas as conclusões a seguir:

Quanto ao confronto entre a turbina Michell-Banki e Francis, através da potência versus vazão:

- Para as duas turbinas, para uma mesma vazão, quanto maior a queda, maior será a inclinação da reta, cuja ordenada é a potência no eixo da turbina; entretanto, mais acentuada para a turbina Francis, porque o rendimento é melhor;

- Para uma mesma queda, com o aumento da vazão, aumenta-se a potência no eixo da turbina, porém de maneira mais acentuada para a turbina Francis, devido a seu rendimento ser maior que a da Michell-Banki;

- O rendimento da turbina Francis, para esta faixa de potência, é da ordem de 0,81, e o da Michell-Banki, extraído da Tabela 12, da Betta Turbina, em anexo, é o 0,718. O rendimento da Francis é em torno de 12,81% maior que o da turbina Michell-Banki, para esta faixa de vazão e queda estudadas;

- A escolha pode ser facilmente conduzida para a turbina Michell-Banki, principalmente para as Micro Centrais Hidrelétricas, devido a seu baixo custo, pouca manutenção e facilidade na instalação.

Quanto aos aspectos gerais

- As PCHs são alternativas viáveis, devido ao custo acessível, ao menor prazo de implementação e maturação do investimento, às facilidades oferecidas pela legislação e a disposição das concessionárias de energia elétrica de comprarem o excedente de energia gerada por autoprodutores.

- A energia de um recurso hidráulico é renovável, não poluente, sem resíduos e que permite a sua reutilização à jusante, para o mesmo fim.

- São inúmeros os benefícios sociais que a energia extraída dos pequenos recursos hídricos traz às comunidades isoladas, tais como: processamento da ração no próprio local; irrigação; com a iluminação pode-se ter aulas noturnas; conforto no lar com os eletrodomésticos; acesso a meios de informação, como o rádio e a televisão, possibilitando ampliar a educação e a cultura; melhoria na preservação da saúde humana e também do gado, conservando-se vacinas e medicamentos, principalmente; e utilização de sistemas de comunicação, aproximando assim o campo da cidade.

Quanto ao sistema computacional

- Elaborado no software Microsoft Access, o sistema computacional final possui uma interface conversacional, de fácil utilização, mesmo por pessoas que não possuem conhecimento técnico específico sobre PCHs. Isto o torna acessível a todos aqueles que necessitem de um pré-dimensionamento rápido e eficiente de turbinas.

- Com a validação dos resultados das duas usinas (a do Rio Lavapés, da Fazenda Lageado, desativada; e a da Sabesp, em construção), pelo sistema computacional, mostrou-se que, em uma propriedade com recurso hídrico, havendo a necessidade imediata da viabilização operacional de seu potencial identificado, tal sistema computacional disponibilizará os resultados do pré-dimensionamento da turbina adequada à geração de energia local, confiável e de excelente qualidade.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAJAY, S.V., WALTER, A. C. S. Geração descentralizada de energia elétrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COGERAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA, 1989, Campinas. *Anais...*

DIAS, D. S. *O sistema de informação e a empresa. s.l.: LTC, 1985.*

FEDRIZZI, M.C. *Fornecimento de Água com Sistemas de Bombeamento Fotovoltaico.* São Paulo, 1997. 161p. Dissertação (mestrado em Energia) Universidade de São Paulo.

GANE, C., SARSON, T. *Análise estruturada de sistemas.* Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1983.

KHODHSGISN, S. *Object-oriented databases. s.l.: Wiley, 1993.*

LAFUENTE, R.J.O., UDAETA, M.E.M., RIBEIRO, F.S. A gestão de projetos auto-sustentáveis de suprimentos de energia renovável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. Trabalhos apresentados... Publicado em CD-ROM. Seção Energia na Agricultura. Bauru: UNESP, 1996. 7p.

HASEGAWA, M. M. *Potencial hidrenergético do rio lavapés no campus da FCA-UNESP, em Botucatu-SP*. Botucatu, 1999. 96p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

MAUAD, F.F. Microcentrais hidrelétricas, procedimentos práticos para implantação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. *Trabalhos apresentados...* Publicado em CD-ROM. Seção Energia na Agricultura. Bauru: UNESP, 1996.

MARTINELLI, auditores. *Noções de Fluxogramas*. UNICAMP, 2002.

OLIVEIRA, C.E.L., SULZBACHER, A.L., STOEF, G. Sistema de auxílio à decisão para energização rural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. *Trabalhos apresentados...* Publicado em CD-ROM. Seção Energia na Agricultura. Bauru: UNESP, 1996.

PELLIZZI, G.; CASTELLI, G. Integrated farm energy systems: theory and first applications in the Italian agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRICULTURAL SYSTEMS ENGINEERING, 1st. Changchun, China. *Proceedings*. Beijing, China. China Machine Press, 1987. p.44-30.

ROSSI, L.A., REIS, L.B. Metodologia para análise e planejamento de sistemas energéticos integrados que usam recursos renováveis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru. *Trabalhos apresentados...* Publicado em CD-ROM. Seção Energia na Agricultura. Bauru: UNESP, 1996. 7p.

SILVA, C. D. *Avaliação do potencial das energias solar e eólica para acionamento de pequenos sistemas de bombeamento na fazenda experimental Lageado*. Botucatu, 2000. 95p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

SIMONE, G. A. *Centrais e aproveitamentos hidrelétricos: teoria e exercícios*.. Editora Érica, São Paulo, 2000.

SOUZA, Z. , FUCHS, R. D., SANTOS, A. H. M. *Centrais hidro e termelétricas*. São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá, MG: Escola Federal de Engenharia, 1983.

WOLFSDORF, Pablo J. apud. *Automação de escritórios: Componentes Estratégicos*. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.

YOURDON, E. *Análise estruturada moderna*. s.l.: Campus, 1991.

APÊNDICE

Anexo 1 - Uso de Fluxogramas

Segundo Martinelli, uma das técnicas tradicionais de organização e métodos, amplamente utilizada em auditoria, é a técnica de representação gráfica de rotinas através de fluxogramas.

Rotina é o termo utilizado para descrever passo a passo como os elementos estudados interagem entre si.

Esses gráficos podem ser úteis no entendimento dos ciclos operacionais a fim de tomada de decisões, como por exemplo, a implantação de novos sistemas informatizados.

É importante haver um método de registro de informação, de maneira clara e facilmente compreensível. A descrição sob a forma de narrativa escrita, em alguns momentos, pode se tornar muito extensa, dificultando sua absorção e a integração mental de pontos relacionados entre si. Um método padronizado de fluxograma é a resposta lógica para esse problema. Em primeiro lugar, é a maneira mais concisa de registrarmos a nossa revisão do sistema. Não só permite uma visão geral, como também uma documentação eficiente e detalhada do exame desse sistema.





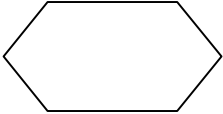
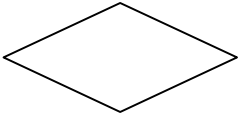

Em segundo lugar, o fluxograma é o instrumento mais eficiente para fazer a própria análise. Os fluxogramas mostram claramente o que está acontecendo e oferecem um método fácil de localização de fraquezas no sistema ou áreas onde poderiam ser introduzidas melhorias.

Dentre os diferentes tipos de fluxogramas, o fluxograma horizontal tem a vantagem de nos permitir visualizar a relação entre as diferentes partes de um sistema integrado.

1.1 Simbologia utilizada

O fluxograma horizontal vem sendo usado por analistas há longos anos, dentre os quais alguns símbolos são virtualmente universais. No presente estudo, utilizaremos os símbolos descritos no Quadro 9:

Quadro 9 – Simbologia usada nos fluxogramas do sistema

Objeto símbolo	Descrição
	Fluxo de Informações
	Entrada manual (no presente trabalho, este símbolo, preenchido pela cor cinza, indica entrada de dado principal)
	Processo
	Dado
	Preparação
	Decisão
	Finalização

Anexo 2 - Tabela do cálculo da potência no eixo da turbina Michell-Banki

Tabela 12 – Cálculo da potência no eixo da turbina Michell-Banki

Queda Metros	Potência em C.V.																				
	Vazões em Litros por Segundo																				
	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	200	240	280	320	360	400	500	600	800	1000
2	Modelo Potência	1515 0,3	2020 0,5	2020 0,7	2020 0,9	2020 1,1	2040 1,5	2040 1,8	2040 2,6	2040 2,9	3040 3,3	3040 3,7	4045 4,5	4045 5,2	4065 6	4085 6,8	4085 7,5	4085 9,5	4085 11,4	40120 15,2	50140 20
3	Modelo Potência	1515 0,5	1515 0,8	2020 1,1	2020 1,3	2020 1,6	2030 2,2	2030 2,7	2040 3,3	2040 3,9	3040 4,4	3040 5	4045 6,7	4045 7,8	4065 8,9	4085 10	4085 11,2	4085 14,1	4085 17,1	40120 22,8	40140 28,5
4	Modelo Potência	1515 0,7	1515 1	2020 1,4	2020 1,8	2020 2,1	2030 2,9	2030 3,6	2040 4,4	2040 5,1	3040 6,6	3040 7,4	4045 8,9	4045 10,4	4065 11,9	4085 13,4	4085 14,9	4085 18,8	4085 22,6	40120 30,4	40140 38
5	Modelo Potência	1515 0,9	1515 1,3	2020 1,7	2020 2,2	2020 2,7	2030 3,6	2030 4,6	2040 5,6	2040 6,4	3040 8,3	3040 9,2	4045 11	4045 13	4065 14,9	4085 16,7	4085 18,6	4085 23,3	4085 28,2	40120 38	40140 47,5
6	Modelo Potência	1515 1	1515 1,6	2020 2,1	2020 2,6	2020 3,2	2030 4,3	2030 5,5	2040 6,6	2040 7,6	3040 9,9	3040 11	4045 13,2	4045 15,6	4065 17,9	4085 20,1	4085 22,3	4085 27,9	4085 33,5	4090 45,1	40120 57
7	Modelo Potência	1515 1,2	1515 1,8	2020 2,4	2020 3	2020 3,7	2030 5	2030 6,4	2040 7,6	2040 8,9	3040 10,2	3040 11,5	4045 15,5	4045 18	4065 20,8	4085 23,4	4085 26	4085 32,6	4085 39,1	4090 52,6	40120 66,5
8	Modelo Potência	1515 1,4	1515 2,1	2020 2,8	2020 3,5	2020 4,3	2030 5,7	2030 7,1	2040 8,7	2040 10,2	3040 11,6	3040 13,1	4045 17,7	4045 20,6	4065 23,8	4085 26,8	4085 29,8	4085 37,2	4085 44,6	4085 60,2	40120 76
10	Modelo Potência	1515 1,7	1515 2,6	2020 3,5	2020 4,4	2020 5,2	2030 7,1	2030 8,9	2040 10,9	2040 12,7	3040 14,6	3040 16,4	4045 22,1	4045 25,8	4065 29,4	4085 33,5	4085 37,2	4085 46,5	4085 55,8	4085 75,2	40120 94
12	Modelo Potência	1515 2,1	1515 3,1	2020 4,2	2020 5,2	2020 6,3	2030 8,5	2030 10,7	2040 12,8	2040 15,3	3040 17,5	3040 19,7	4045 26,2	4045 30,9	4065 35,3	4085 39,7	4085 44,6	4085 55,8	4085 67	4085 89,3	40120 112,8
14	Modelo Potência	1515 2,4	1515 3,7	2020 4,9	2020 6,1	2020 7,3	2030 10	2030 12,5	2040 15,2	2040 17,8	3040 20,4	3040 22,9	4045 32,8	4045 39,3	4065 45,9	4085 53	4085 59,6	4085 73,7	4085 83,7	4085 104,2	40120 131,6
16	Modelo Potência	1515 2,8	1515 4,2	2020 5,6	2020 7	2020 8,4	2030 11,4	2030 14,2	2040 17,1	2040 19,9	3040 23,3	3040 26,2	4045 34,9	4045 40,8	4065 47,1	4085 53	4085 58,9	4085 74,4	4085 89,3	4085 119	40120 150,4
18	Modelo Potência	1515 3,6	1515 4,7	2020 6,3	2020 7,8	2020 9,4	2030 12,5	2030 16	2040 19,2	2040 22,4	3040 26,2	3040 29,5	4045 38,3	4045 45,9	4065 53	4085 59,6	4085 66,2	4085 83,7	4085 100,4	4085 133,9	40120 167,4
20	Modelo Potência	1515 4	1515 5,2	2020 7	2020 8,7	2020 10,4	2030 13,9	2030 17,8	2040 21,4	2040 24,9	3040 28,5	3040 32,8	4045 43,7	4045 51	4065 58,2	4085 66,2	4085 73,6	4085 92	4085 111,6	4085 148,8	40120 186
22	Modelo Potência	1515 4,4	1515 6,6	2020 8,8	2020 11	2020 13,2	2030 17,6	2030 23,5	2040 27,4	2040 31,3	3040 36	3040 40	4045 48	4045 56,1	4065 64,1	4085 72,9	4085 81	4085 101,2	4085 122,8	4085 163,7	40120 204,6
24	Modelo Potência	1515 4,8	1515 7,2	2020 9,6	2020 12	2020 14,4	2030 19,2	2030 25,6	2040 29,9	2040 34,2	3040 38,4	3040 43,7	4045 52,4	4045 61,2	4065 69,9	4085 79,5	4085 88,3	4085 110,4	4085 135,9	4085 178,6	40120 223,2
26	Modelo Potência	1515 5,2	1515 7,8	2020 10,4	2020 13	2020 15,6	2030 20,8	2030 23,1	2040 27,8	2040 32,4	3040 37	3040 41,7	4045 56,8	4045 66,2	4065 75,7	4085 85,2	4085 95,7	4085 119,6	4085 145,1	4085 193,4	40120 241,8
28	Modelo Potência	1515 5,6	1515 8,4	2020 11,2	2020 14	2020 16,8	2030 22,4	2030 28	2040 34,9	2040 38,9	3040 44,9	3040 51	4045 61,2	4045 71,3	4065 81,5	4085 91,7	4085 103	4085 128,8	4085 156,2	4085 208,3	40120 260,4
30	Modelo Potência	1515 6	1515 9	2020 12	2020 15	2020 18	2030 24	2030 30	2040 37,4	2040 42,7	3040 48,1	3040 53,4	4045 65,5	4045 76,4	4065 87,4	4085 98,3	4085 109,2	4085 138	4085 185,6	4085 223,2	40120 279
35	Modelo Potência	1515 7	1515 10,5	2020 14	2020 17,5	2020 21	2030 28	2030 35	2040 43,6	2040 49,8	3040 56,1	3040 62,3	4045 76,4	4045 89,2	4065 101,9	4085 114,7	4085 127,4	4085 161	4085 193,2	4085 260,4	40120 325,5
40	Modelo Potência	1515 8	1515 12	2020 16	2020 20	2020 24	2030 32	2030 40	2040 48	2040 57	3040 64,1	3040 71,2	4045 87,4	4045 101,9	4065 116,5	4085 131	4085 145,6	4085 184	4085 220,8	4085 297,6	40120 372

Fonte: Turbinas Betta