

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FÁBIO VINÍCIUS VIEIRA BEZERRA

**IMPLANTAÇÃO DE CGH's NA AMAZÔNIA -
UMA VISÃO GLOBAL COM ÊNFASE
NOS ASPECTOS HIDROLÓGICOS, TECNOLÓGICOS,
AMBIENTAIS E FINANCEIROS**

BELÉM

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**IMPLANTAÇÃO DE CGH's NA AMAZÔNIA -
UMA VISÃO GLOBAL COM ÊNFASE
NOS ASPECTOS HIDROLÓGICOS, TECNOLÓGICOS,
AMBIENTAIS E FINANCEIROS**

FÁBIO VINÍCIUS VIEIRA BEZERRA

Dissertação apresentação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Energia. Orientador: Claudio José Cavalcante Blanco. Co-orientador: André Luiz Amarante Mesquita

Belém

2007

Bezerra, Fábio Vinícius Vieira.

Implantação de CGH's na amazônia: uma visão global com ênfase nos aspectos hidrológicos, tecnológicos, ambientais e financeiros / Fábio Vinícius Vieira Bezerra; orientador Cláudio José Cavalcante Blanco. – 2007.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belém, 2005.

1. USINAS HIDRELÉTRICAS – aspectos hidrológicos
2. USINAS HIDRELÉTRICAS – aspectos tecnológicos.
3. USINAS HIDRELÉTRICAS – aspectos ambientais.

I. Blanco, Cláudio José Cavalcante, orientador.

II. Título

CDD 19. ed. 621.31213409811

**IMPLANTAÇÃO DE CGH's NA AMAZÔNIA -
UMA VISÃO GLOBAL COM ÊNFASE
NOS ASPECTOS HIDROLÓGICOS, TECNOLÓGICOS,
AMBIENTAIS E FINANCEIROS**

FÁBIO VINÍCIUS VIEIRA BEZERRA

Dissertação apresentação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Energia.

Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

(UFPA)

Orientador

Prof. Dr. Ing. André Luiz Amarante Mesquita (UFPA)

Co-Orientador

Prof. D.Sc. Nelson Manzanares Filho (UNIFEI)

Membro Externo

Profª. D. Sc. Aline Maria Meiguins de Lima (SEMA)

Membro Convidado

Prof. D.Sc. Daniel Onofre de Almeida Cruz (UFPA)

Membro Interno

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas muitas bênçãos que tem me dado, pelas dificuldades.

A irmã Dorothy que literalmente doou-se pelos projetos de desenvolvimento sustentável da região de Anapú-PA.

Ao professor Claudio José Cavalcante Blanco, pela orientação, fundamental para o término dos trabalhos e pela amizade.

Ao professor André Luiz Amarante Mesquita, em particular, pela orientação, amizade e confiança dado à minha pessoa.

A minha esposa Suelen, pela motivação dado à minha pessoa em todos os momentos desta jornada.

A meus pais e minha irmã, Ubiratan, Evanilce e Carolina pela grande força que sempre proporcionaram em minha vida.

Aos meus amigos da Universidade.

Muito grato.

RESUMO

Um problema de grande relevância social na Amazônia é o fato das pequenas comunidades isoladas não serem contempladas pelos benefícios dos grandes empreendimentos hidrelétricos instalados na região. Uma solução alternativa a para este problema, é o aproveitamento da grande malha de pequenos rios e igarapés da região a partir da implantação de Centrais Geradoras Hidrelétricas – CGH's (antigas mini e microcentrais).. Dentro deste contexto, o presente trabalho analisa e discute certos aspectos gerais inerentes à implantação das CGH's, e principalmente, trazendo-os à realidade das pequenas bacias Amazônicas. Os aspectos a serem abordados neste trabalho dizem respeito às avaliações preliminares de terreno, aspectos hidrológicos, tecnológicos, ambientais e financeiros.

Os aspectos são analisados de forma global para implantação de CGH's e suas etapas, também analisados e aplicados a um estudo de caso – implantação da CGH irmã Dorothy na pequena bacia hidrográfica do Igarapé são João em Anapú-pa, onde foi possível a utilização de metodologia existente para um estudo aprimorado de implantação de CGH's na Amazônia. No âmbito hidrológico, utilizou-se um modelo chuva-vazão desenvolvido por Blanco 2005 e aplicou a pequenas bacias da Amazônia que não possuem registros de vazão. Nos aspectos tecnológicos utilizou ferramentas computacionais para predição de desempenho de turbinas axiais de baixa queda adaptas ao relevo da região, e simulados para a turbina axial a ser implantada na CGH irmã Dorothy. No contexto ambiental atualmente há forte cobrança pelas autoridades competentes locais para realização do estudo ambiental inerente ao aproveitamento, e se tratando da região Amazônica, ambientalmente muito agredida pela ação do homem, os estudos devem ser bem definidos, apontando os possíveis impactos que podem ser causados pela CGH, descritos no RAS (Relatório Ambiental Simplificado) anexo deste trabalho. Desta forma foi desenvolvido um método para cálculo e simulação da área inundada para implantação de CGH's na Amazônia, aplicado à CGH irmã Dorothy. No âmbito financeiro, são raras as informações referentes aos custos de implantação de CGH's na Amazônia. Assim, foram levantados os custos referentes à implantação da CGH irmã Dorothy e comparados a custos de CGH's e de geradores a diesel disponíveis na literatura.

Palavras-chave: Pequena bacia hidrográfica, modelo chuva-vazão, potencial hidrelétrico, aspecto hidrológico.

ABSTRACT

A problem of great social relevance in the Amazon Region is the fact that small isolated communities are not contemplated by the benefits of the big hydroelectric plants installed in the region. An alternative solution to this problem is the use of the big mesh of small rivers and creeks of the area to the implantation of small hydroelectric power plants known in Brazil as CGH's. Within this context, the present work analyzes and discusses certain general aspects concerning the implantation of CGH's, and mainly, bringing them to the reality of the small Amazon basins. The aspects to be approached in this work are concerned with the technological, hydrological, environmental, and financial contexts.

These aspects are analysed in a global form and also in a specific way through a case study - the implantation of sister's Dorothy CGH, in which was possible the use of existent methodologies for the studies of implanting CGH's in the Amazon Region. Within the hydrological aspects it was possible the use of existent rain-flow model developed by Blanco 2005, and applied to small basins in the Amazon Region which do not possess flow registrations. In the environmental context nowadays there is a strong requirement of the local authorities for the accomplishment of environmental studies relative to the energy enterprise. Taking into consideration that the Amazon region is environmentally very affected by man's action, these studies should be very well defined, in order to point out the possible impacts that can be caused by CGH, which must be described in the RAS (Simplified Environmental Report), requested by the competent organ responsible for regulating small energy uses. In view of that, it was developed in this work a methodology to simulate and calculate the flooded area by the CGH's implantation in the Amazon Region, and a case study concerning the implantation of sister Dorothy's CGH is presented. In the technological context, due to the main characteristics of low falls of the Amazonian rivers and creeks, the focus of the technological analysis will be on the behavior of axial turbine adapted to low falls. The technological analysis contemplates the use of tools for predicting the performance of axial turbines. In the financial context, there is rare information regarding the costs of implantation of CGH's in the Amazon. The costs regarding the sister's Dorothy CGH were obtained and compared with other equivalent CGH's and diesel generators available in the literature.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Amazônia e Calha Norte..... | 4 |
| Figura 2 - Sistema de apoio à decisão (adaptado de Blanco, 2005)..... | 10 |
| Figura 3 – Teodolito em utilização. | 11 |
| Figura 4– Molinete..... | 11 |
| Figura 5 – Seção de medida do método velocidade-área..... | 12 |
| Figura 6 – Hidrograma do Igarapé da Prata – Capitão Poço/PA. | 14 |
| Figura 7 – Curva de Permanência do Igarapé da Prata – Capitão Poço/PA..... | 15 |
| Figura 8 – Curva do Igarapé São João – Anapú/PA | 17 |
| Figura 9 - Sistema de apoio à decisão - aspectos hidrológicos (adaptado de Blanco, 2005)... | 18 |
| Figura 10 – Central a Fio d’água..... | 19 |
| Figura 11 – Tipos de centrais adaptados a relevo acidentado..... | 20 |
| Figura 12 – Turbina Hidráulica tipo hélice – Laboratório de Turbomáquinas da UFPA. | 21 |
| Figura 13 - Turbina Kaplan de eixo vertical. | 21 |
| Figura 14 - Turbinas Tubulares com eixo horizontal e com Eixo inclinado..... | 22 |
| Figura 15 - Turbina Bulbo..... | 23 |
| Figura 16 - Turbina Straflo..... | 24 |
| Figura 17 – Tipos de turbina em função da queda e da rotação específica, (Hydro Power Mechanical Design, ASME, 1996). | 25 |
| Figura 18 – Tela inicial do TURBNPRO..... | 27 |
| Figura 19 – Localização de Anapú e bacia do igarapé São João. | 53 |
| Figura 20 – Placa na Transamazônica indicando a Vila sucupira..... | 54 |
| Figura 21 – Pequena indústria de beneficiamento de frutas – Vila sucupira – Anapú/PA. | 54 |
| Figura 22 – Farinha de banana produzida pela unidade de processamento de frutas. | 55 |
| Figura 23 – Imagem de satélite mostrando o local da barragem (adaptado de Google, 2006).56 | |
| Figura 24 – Foto do local da barragem com pedras e areia..... | 56 |
| Figura 25 – Planta de localização da CGH irmã Dorothy destacando a área de drenagem. | 58 |
| Figura 26 – Totais pluviométricos mensais e médio registrados na granja Gazela. | 60 |
| Figura 27 – Coeficiente de distribuição de chuva, k..... | 62 |
| Figura 28 – Hidrograma simulado do igarapé São João. | 65 |
| Figura 29 – Seções topo-batimétricas - Igarapé São João..... | 67 |
| Figura 30 – Curva-Chave do Igarapé São João..... | 69 |
| Figura 31 – Curva de Permanência do Igarapé São João..... | 69 |

| | |
|--|----|
| Figura 32 – Dados Iniciais TURBNPRO. | 70 |
| Figura 33 – Soluções Possíveis do TURBNPRO. | 70 |
| Figura 34 – Caixa de diálogo para definição tipo de turbina. | 71 |
| Figura 35 – Arranjo da Turbina. | 71 |
| Figura 36 – Curva de eficiência da Turbina. | 72 |
| Figura 37 – Características de operação da Turbina. | 73 |
| Figura 38 – Turbina axial gerada pelo autolisp. | 74 |
| Figura 39 – Turbina axial modelo. | 74 |
| Figura 40 – Triângulo de Velocidade nas Pás do Rotor. | 75 |
| Figura 41 - Diagrama de colina Vazão x Rotação com curvas de altura e rendimento constantes. | 76 |
| Figura 42 - Diagrama de colina Altura x Rotação com curvas de rendimento constante. | 76 |
| Figura 43 -Diagrama Potência x Vazão com curvas de altura constante. | 77 |
| Figura 44 – Planilha do Software DATAGEOSIS 2.3 com dados topográficos. | 80 |
| Figura 45 - Modelo Numérico do Terreno do igarapé São João. | 81 |
| Figura 46 - Curva de permanência com vazões para cálculo das áreas de inundação. | 81 |
| Figura 47 - Curva chave relacionando as vazões para cálculo de inundação. | 82 |
| Figura 48 – Cotas na seção transversal na posição do eixo principal da barragem. | 83 |
| Figura 49 - Caixa de diálogo para cálculo da área inundada. | 83 |
| Figura 50 – Áreas inundadas do igarapé São João – sem barragem. | 84 |
| Figura 51 - Cotas na seção transversal a montante do eixo central da barragem. | 85 |
| Figura 52 - Cotas na seção transversal a jusante do eixo central da barragem. | 85 |
| Figura 53 – Áreas inundadas do igarapé São João – com barragem. | 86 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Classificação das CGH's quanto à queda de projeto..... | 15 |
| Tabela 2 – Dados de entrada solicitados pelo CARTHA..... | 26 |
| Tabela 3 - Totais Pluviométricos Mensais. | 55 |
| Tabela 4 - Valores do coeficiente de Manning. | 64 |
| Tabela 5 – Pares de Q e N.A. para o igarapé São João..... | 64 |
| Tabela 6 – Dados de entrada da turbina hidráulica axial modelo..... | 70 |
| Tabela 7 – Comparativo das simulações – TURBNPRO E CARTHA..... | 73 |
| Tabela 8 – Tabela resumo com as áreas inundadas da CGH irmã Dorothy..... | 83 |
| Tabela 9 – Composição dos custos da CGH irmã Dorothy..... | 84 |
| Tabela 10 – Custos da CGH irmã Dorothy..... | 85 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| Capítulo 1 | 4 |
| Introdução..... | 4 |
| 1.1. RELEVANCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA..... | 4 |
| 1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA | 5 |
| 1.3. ORGANIZAÇÃO DA OBRA | 7 |
| Capítulo 2 | 9 |
| Metodologia para Implantação de CGH's..... | 9 |
| 2.1. INTRODUÇÃO..... | 9 |
| 2.2. AVALIAÇÕES PRELIMINARES, LEVANTAMENTO DE CAMPO E TOPOGRAFIA | 11 |
| 2.3. ASPECTOS HIDROLOGICOS | 13 |
| 2.3.1. Introdução..... | 13 |
| 2.3.2. Hidrograma..... | 13 |
| 2.3.3. Curva de Permanência..... | 14 |
| 2.3.4. Curva chave..... | 15 |
| 2.4. ASPECTOS ENERGETICOS E TECNOLOGICOS | 18 |
| 2.4.1. Central Geradora Hidrelétrica (CGH)..... | 18 |
| 2.4.2. Turbinas Axiais para Centrais a Fio d'Água | 20 |
| 2.4.3. Softwares de Turbinas Hidráulicas | 26 |
| 2.5. ASPECTOS AMBIENTAIS..... | 30 |
| 2.5.1. Tipos de Impactos Ambientais | 31 |
| 2.5.2. Medidas Mitigadoras e Compensatórias | 32 |
| 2.6. ASPECTOS LEGAIS..... | 32 |
| 2.7. ASPECTOS FINANCEIROS | 36 |
| Capítulo 3 | 39 |
| Modelo Chuva-Vazão para Simulação de Vazões de Pequenas Bacias Hidrográficas Visando à Estimação de Potencial Hidrelétrico | 39 |
| Capítulo 4..... | 53 |
| Estudo de Caso - Implantação da CGH Irmã Dorothy em Anapú-PA..... | 53 |
| 4.1. INTRODUÇÃO..... | 53 |
| 4.2. AVALIAÇÕES PRELIMINARES, LEVANTAMENTO DE CAMPO E TOPOGRAFIA | 55 |
| 4.3. ASPECTOS HIDROLOGICOS DO IGARAPE SÃO JOÃO | 59 |

| | | |
|---|---|-----|
| 4.3.1. | Introdução..... | 59 |
| 4.3.2. | Modelo I-PAI-WU | 60 |
| 4.3.3. | Modelo Hidrodinâmico | 65 |
| 4.3.4. | Determinação da Curva de Permanência | 69 |
| 4.4. | ASPECTOS TECNOLÓGICOS E ENERGÉTICOS | 70 |
| 4.4.1. | Software TURBNPRO aplicado à CGH Irmã Dorothy | 70 |
| 4.4.2. | Programa CARTHA aplicado à CGH Irmã Dorothy | 73 |
| 4.5. | ASPECTOS AMBIENTAIS..... | 794 |
| 4.5.1. | Introdução..... | 79 |
| 4.5.2. | Método para determinação da Área Inundada..... | 79 |
| 4.6. | ASPECTOS FINANCEIROS..... | 87 |
| Capítulo 5 | | 91 |
| Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros..... | | 91 |
| 5.1. | CONCLUSÕES..... | 91 |
| 5.2. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 92 |
| Capítulo 6 | | 93 |
| Bibliografia..... | | 93 |
| Anexos | | 90 |
| Anexo I - RAS - Relatório Ambiental Simplificado..... | | 93 |
| Anexo II - Teste realizado com gerador 50Kw..... | | 118 |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Relevância e Justificativa do Tema

Dentre os problemas inerentes ao desenvolvimento da região Amazônica (Figura 1), a questão energética assume uma posição estratégica para a qual devem ser direcionados esforços importantes; tanto na formação e qualificação de recursos humanos especializados em problemas específicos à geração de energia, quanto à inovação científica e tecnológica das ferramentas de análise empregadas no setor.



Figura 1 – Amazônia e Calha Norte.

Neste contexto, a geração de energia elétrica utilizando o enorme potencial hídrico da região, assume um papel de grande importância. E, considerando os efeitos ecológicos nega-

tivos provocados pelas grandes hidrelétricas e os problemas da instalação de linhas transmissão de grande porte (Fearnside, 1999), o emprego de centrais geradoras hidrelétricas (CGH's), com potência de até 1MW, pode ser uma via de solução ao desabastecimento de energia elétrica de certa parte da região.

No caso do Estado do Pará, um dos grandes problemas para o desenvolvimento sócio-econômico é a dificuldade no fornecimento de energia às comunidades isoladas, que representam uma parcela não desprezível da população e do território paraense, em especial os municípios da Calha Norte (Figura 1) e da região oeste do Estado. Esta dificuldade tem sido um grande entrave para o desenvolvimento da atividade agrícola do interior, não agregando valor ao produto natural do Estado, e contribuindo de maneira decisiva para o êxodo rural, gerando problemas sociais importantes nas sedes dos municípios.

Uma alternativa para contribuir à solução deste problema, é a utilização da gigantesca malha de pequenos rios e igarapés do Estado, através da implantação de CGH's. Neste sentido, é de vital importância o domínio de técnicas que permitam o projeto de centrais adequadas às condições de baixa queda, visando à obtenção de resultados que venham contribuir de maneira concreta para o desenvolvimento sustentável da região.

1.2 Objetivos e Contribuições da Pesquisa

Atualmente, o Grupo de Turbomáquinas da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará executa um projeto de implantação de uma CGH para geração de 50 kW na região da transamazônica, utilizando uma turbina hidráulica axial de pás e distribuidor fixos. A implantação de CGH's, como a que está sendo implantada em Anapú, demanda avaliações preliminares do terreno e topografia, e a análise de aspectos sócio-econômicos, hidrológicos, tecnológicos e energéticos, ambientais, legais e financeiros, entre outros, os quais reunidos dão origem a metodologias de implantação de CGH's. O presente trabalho tem como objetivo principal explorar as avaliações preliminares do terreno e os aspectos supracitados, com exceção dos sócio-econômicos, via metodologia proposta por Blanco (2005), a qual se baseia em um sistema de apoio à decisão. Sendo que o presente trabalho explora, mais que a metodologia de Blanco, os aspectos tecnológicos.

As avaliações preliminares do terreno servem para balizar se o sítio hidrológico possui, em primeira análise, os pré-requisitos necessários para a implantação de uma GGH, tais como: topografia apropriada com queda mínima admissível, e vazão mínima admissível, pois com a queda e a vazão estimada pode-se determinar, em um primeiro momento, a potência

instalada do sítio hidrológico. Se esta potência for considerável, continua-se com a análise do sítio, em caso contrário, o mesmo é descartado.

Os aspectos hidrológicos objetivam analisar as ferramentas hidrológicas (curva de permanência, hidrograma e curva chave) necessárias ao dimensionamento da produção de energia hidrelétrica. A aplicação de tais ferramentas passa obrigatoriamente pela obtenção de dados de vazão, entretanto, as pequenas bacias amazônicas, na maioria dos casos, são desprovidas de dados. Neste caso, lança-se mão da aplicação de um modelo chuva-vazão para simulação de vazões em possíveis sítios hidrelétricos sem medidas de vazão.

O desenvolvimento dos aspectos energéticos é dado através do dimensionamento da produção hidrelétrica por CHG's, mais especificamente o software TURBNPRO é utilizado neste dimensionamento via curva de permanência. No âmbito tecnológico, o trabalho objetiva a utilização do software CARTHA – desenvolvido em um convênio entre a UNIFEI e a UFPA, o qual permite prever as características de desempenho de turbinas axiais de baixa queda para conhecimento e domínio de tecnologia, justificáveis por dois pontos; são máquinas que não possuem linhas consolidadas de fabricação no Brasil e são ideais para utilização na região Amazônica, devido às características do relevo, o qual é pouco acidentado.

No contexto ambiental, atualmente, não se têm informações sobre metodologias que caracterizem a definição da área de inundação de CGH's, sendo este o “calcanhar de Aquiles” de empreendimentos hidrelétricos com barragens em qualquer escala. Assim, a análise dos aspectos ambientais tem objetivo o desenvolvimento de um método para avaliação da área de inundação de pequenos aproveitamentos hidrelétricos na Amazônia, analisando os impactos ambientais decorrentes do área inundada, bem como as possíveis medidas mitigadoras.

No âmbito legal, analisam-se as resoluções da ANEEL, do CONAMA e A Lei 9433/97 que "Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos", trazendo em seu Art. 5º, inciso III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos. Indica-se, que em caso de pequena bacia hidrográfica não transfronteiriça, deve-se contactar o órgão ambiental estadual competente para a demanda da outorga de uso dos recursos hídricos.

O estudo dos aspectos financeiros tem o objetivo de estabelecer o custo do financiamento e de instalação da CGH. Além destes custos, pode-se determinar o custo unitário anual de energia gerada pela CGH. A principal contribuição destes aspectos, é estabelecer os parâmetros financeiros supracitados para uma região de acesso difícil, característico das pequenas

comunidades isoladas amazônicas, ocasionando custos extras de transporte, logística e mobilização de pessoal.

1.3 Organização da obra

A presente dissertação está distribuída em seis capítulos.

- O capítulo 1 apresenta a parte introdutória da pesquisa, como foi visto nas seções precedentes.
- O capítulo 2 apresenta a metodologia a ser seguida na pesquisa abordando de forma geral as avaliações preliminares do terreno, os aspectos energéticos e tecnológicos, hidrológicos, ambientais, legais e financeiros inerentes às CGH's.
- O capítulo 3, sob forma de artigo, apresenta a aplicação de um modelo chuva-vazão para simulação de vazões em possíveis sítios hidrelétricos sem medidas de vazão. O artigo aborda os aspectos hidrológicos das pequenas bacias amazônicas que, na maioria dos casos, são desprovidas de dados.
- O capítulo 4 estuda o caso de implantação da CGH Irmã Dorothy em Anapú-PA, aplicando de forma específica os aspectos abordados no capítulo 2.
- O capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.
- O capítulo 6 apresenta a bibliografia da obra.
- Os anexos contemplam; Anexo I - RAS – Relatório Ambiental Simplificado submetido a SEMA (Secretaria de Meio Ambiente) para obtenção de licença para implantação da CGH irmã Dorothy, Anapú –Pa. Anexo II - Testes de levantamento desempenho realizado no gerador elétrico a ser instalado na CGH irmã Dorothy.

Capítulo 2

Metodologia para Implantação de CGH's

2.1 Introdução

Este trabalho segue a metodologia proposta por Blanco (2005) a qual é baseada em um Sistema de Apoio à decisão (Figura 2) para implantação de Centrais Geradoras Hidrelétricas na Amazônia, tendo como perspectiva o desenvolvimento sustentável.

Blanco deteve-se à proposição da própria metodologia, ao desenvolvimento dos aspectos hidrológicos, com a concepção de um modelo chuva-vazão e de sua transposição adaptados às pequenas bacias da região; e à análise dos aspectos energéticos e financeiros de CGH's na Amazônia.

A presente dissertação aprofunda-se nos aspectos ambientais e tecnológicos. No caso dos aspectos ambientais, a pesquisa apresenta um método de cálculo da área inundada pela pequena barragem da CGH. Os aspectos tecnológicos apresentam a utilização de metodologias de projeto de pequenas turbinas, simulando características de desempenho da turbina axial de pás, visando ao levantamento de parâmetros para projetos de CGH's adaptados à região Amazônica.

Um ponto em comum entre o trabalho de Blanco e o presente trabalho, é a análise dos aspectos financeiros, sendo que o presente trabalho analisa dados reais de custo de construção da CGH Irmã Dorothy. Enquanto, o primeiro não possuía tais dados, tendo que estimá-los.

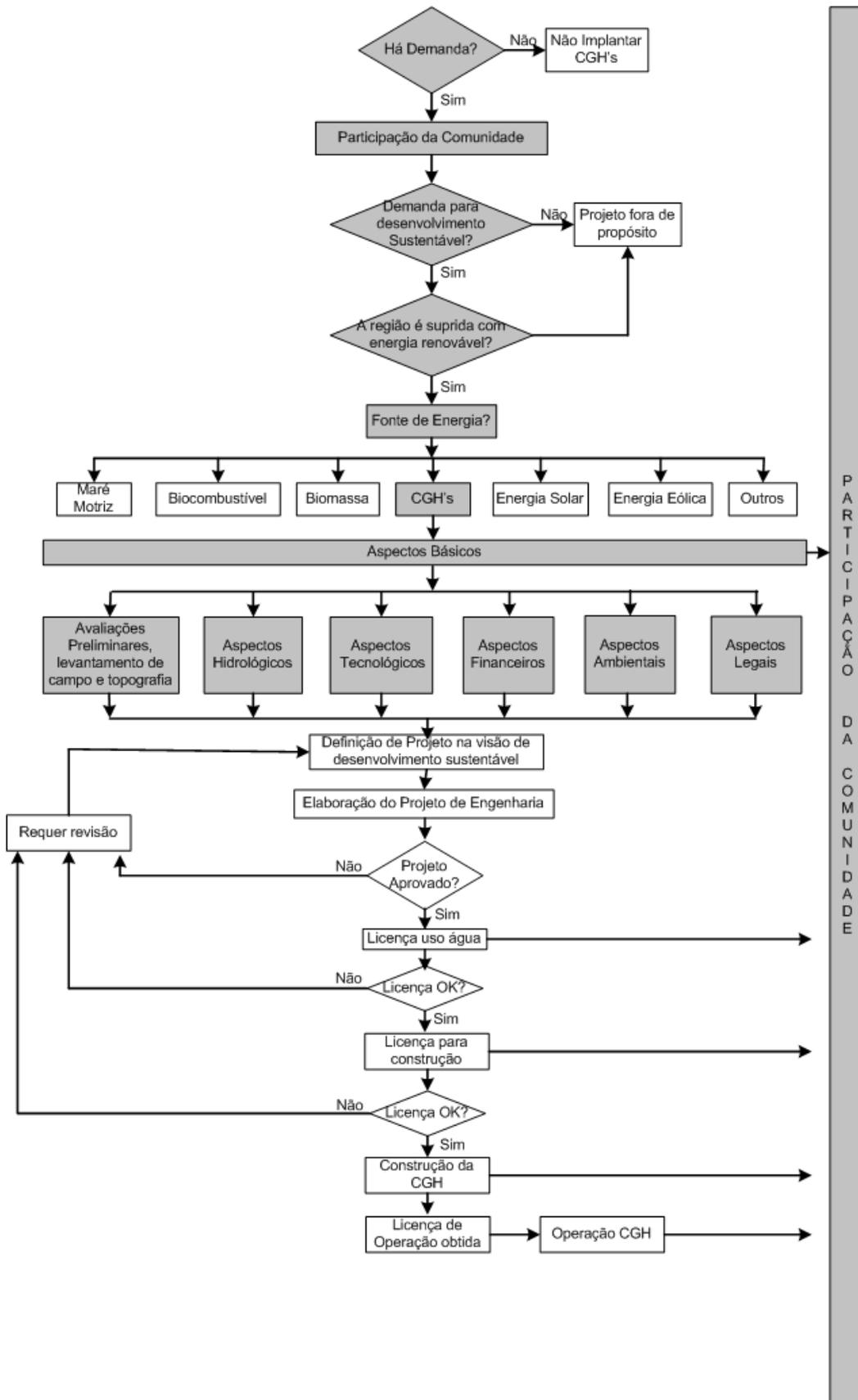


Figura 2 - Sistema de apoio à decisão (adaptado de Blanco, 2005).

2.2 Avaliações Preliminares, levantamento de campo e topografia

O primeiro passo para analisar um sítio hidrológico visando à implantação de uma CGH é o levantamento de campo com as avaliações preliminares sobre as características do local, como distância do sítio até a pequena comunidade (linhas de transmissão mais ou menos curtas), existência em torno deste, de materiais para aproveitamento na construção da obra, tais como: pedra, areia, seixo e barro.



Figura 3 – Teodolito em utilização.

Em paralelo a estas análises, deve-se medir a queda bruta do local via teodolito (Figura 3) e estimar a vazão do pequeno rio ou igarapé via método velocidade-área ou através do método do flutuador (DNAEE/Eletróbrás, 1985). Aqui se descreve o primeiro método, onde a velocidade pode ser medida através de um molinete (Figura 4).



Figura 4– Molinete.

A área é determinada conforme determinação da calha do curso d'água através de batimetria realizada com o auxílio de uma trena ou régua. A calha determinada é subdividida em subseções (Figura 5) e a vazão é calculada através da Eq. 1.

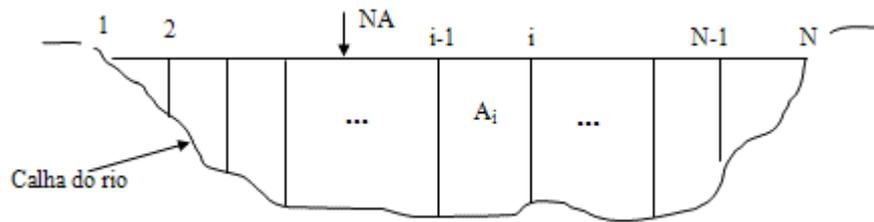


Figura 5 – Seção de medição do método velocidade-área.

$$Q = f \sum_{i=1}^N v_i A_i \quad (1)$$

onde:

Q é o valor da vazão total do rio;

v_i é a velocidade medida pelo molinete em cada seção;

A_i é a área de cada subseção da calha do rio;

f é um fator que leva em consideração o tipo de solo da calha do rio (Iversin, 1986).

Com a determinação da queda bruta e da vazão, pode-se estimar a potência do sítio, através da Eq. 2.

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (2)$$

onde:

η é a eficiência estimada (-);

ρ é a massa específica da água (kg/m^3);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

Q é a vazão (m^3/s);

H é a queda bruta (m).

Aconselha-se a estimação da potência para um período hidrológico desfavorável, que gera uma potência menor, mas que garanta a cobertura de uma certa demanda da comunidade. Assim, no período cheio, a CGH poderá garantir uma potência ainda maior.

No que tange ao trabalho de escritório, devem ser pesquisados mapas (rodoviários, topográficos, hidrológicos, etc.) que permitam definições preliminares a respeito da localização e do potencial do sítio hidrológico. Além disso, deve-se procurar no portal Hidroweb

(<http://hidroweb.ana.gov.br/>) da ANA – Agência Nacional de Águas, as estações fluviométricas e pluviométricas mais próximas ao sítio para tomada de dados e eventual análise e utilização dos mesmos no estudo da CGH.

2.3. Aspectos Hidrológicos

2.3.1. Introdução

Nesta seção são fornecidas definições de ferramentas hidrológicas em forma de curvas, hidrograma, curva de permanência e curva chave. Os hidrogramas e as curvas de permanência são utilizados como suporte ao dimensionamento da produção de energia hidrelétrica; a partir deles, por exemplo, pode-se estimar quando a central produzirá mais ou menos energia. Já a curva chave, é utilizada em modelos para a estimação de vazões em sítios desprovidos de medidas de vazão. Sem os dados ou a estimação deles, a construção do hidrograma e da curva de permanência é inviabilizada.

2.3.2. Hidrograma

É o gráfico que relaciona a vazão com o tempo (Figura 6). As vazões podem ser médias horárias, diárias, mensais, anuais, etc; ou mesmo instantâneas. A distribuição da vazão no tempo é o resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico (Intercepção, Evapotranspiração, Escoamento superficial, Infiltração, Percolação e Escoamento subterrâneo) entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica.

O hidrograma é uma importante ferramenta na análise de regimes de bacias, pois com ele pode-se: identificar as épocas de cheia e estiagem, as sazonalidades existentes em uma região e as ocorrências de eventos extremos; quantificar os volumes de água de uma bacia; fazer comparações intrabacia ou interbacia; dimensionar a produção hidrelétrica de possíveis sítios; etc.

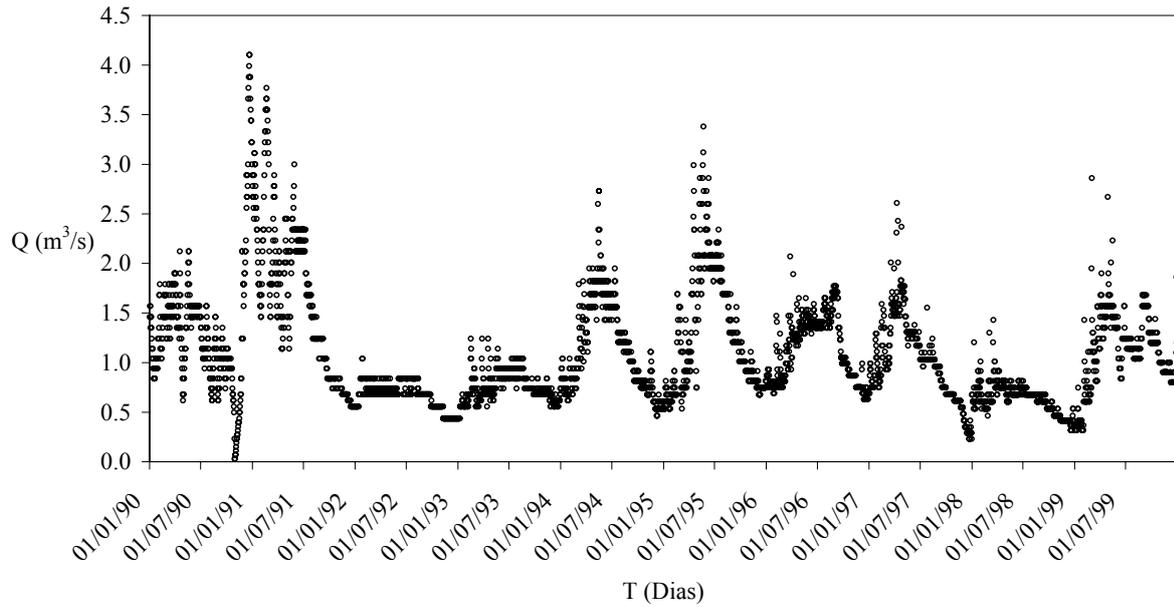


Figura 6 – Hidrograma do Igarapé da Prata – Capitão Poço/PA.

2.3.3. Curva de Permanência

A curva de permanência estabelece a probabilidade de ocorrência de uma determinada vazão para o local em análise. Esta curva pode ser construída com dados de vazões médias diárias, semanais e até mensais.

Conforme procedimento descrito pela Eletrobrás, 2000 estabelecem-se classes de vazões dispendo em ordem decrescente em uma tabela e, então, conta-se o número de ocorrência das vazões dentro de cada classe para a determinação da frequência f_i . Acumulando-se os valores de f_i no sentido da maior para a menor vazão, obtém-se os valores d_i de permanência (Eq. 4). Com os valores de d_i , pode-se então calcular a probabilidade P_i , em porcentagem de ocorrência de uma determinada vazão Q , expressa pela equação (5).

$$d = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{3,3 \ln(n)} \quad (4)$$

$$P_i = \frac{d_i}{N_v} \cdot 100 \quad (5)$$

onde d é a amplitude de cada intervalo (m³/s); Q_{\max} e Q_{\min} representam a vazão máxima e mínima da série (m³/s), respectivamente; n o número de dados da amostra; P_i e d_i como já definidos anteriormente; e N_v o número total de valores coletados, ou $\sum f_i$.

Aplicando-se o método descrito acima, pode-se gerar valores característicos de vazões associados a diferentes probabilidades de permanência no tempo ($Q_{5\%}$, $Q_{50\%}$ e $Q_{95\%}$). Tais valores são utilizados para estudos de enchimento de reservatórios, operação da usina e estudos energéticos para avaliação do nível de motorização, dentre outros. A Figura 7 apresenta a curva de permanência do Igarapé da Prata no município de Capitão Poço/PA.

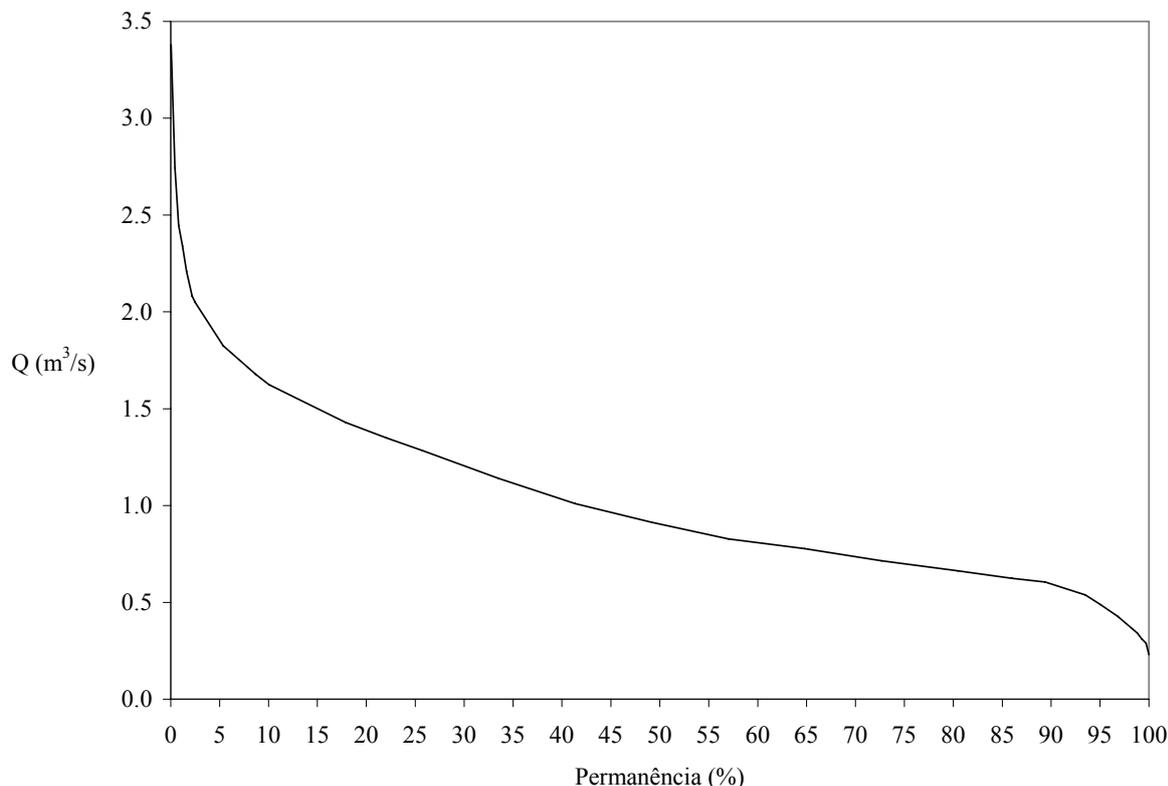


Figura 7 – Curva de Permanência do Igarapé da Prata – Capitão Poço/PA.

2.3.4. Curva chave

Curva-chave é a relação entre os níveis d'água com as respectivas vazões de um sítio hidrológico. Para o traçado da curva-chave, é necessário que se disponha de uma série de medidas de vazão no local, ou seja, a leitura da régua e a correspondente vazão (dados de h e Q). Partindo-se desta série de valores (h e Q) a determinação da curva-chave pode ser feita de duas formas: gráfica ou analiticamente. A experiência tem mostrado que o nível d'água (h) e a vazão (Q) ajustam-se bem à curva do tipo exponencial, que é dada por:

$$Q = a (h-h_0)^b \quad (6)$$

onde:

Q é vazão em m^3/s ;

h é o nível d'água em m (leitura na régua);

a , b e h_0 são constantes para o sítio hidrológico, a serem determinadas;

h_0 corresponde ao valor de h para vazão $Q = 0$.

A equação acima pode ser linearizada aplicando-se o logaritmo em ambos os lados:

$$\log Q = \log a + b \log (h-h_0) \quad (7)$$

Fazendo $Y = \log Q$, $A = \log a$ e $X = \log (h-h_0)$, tem-se a equação de uma reta. Para se determinar a e b , é apresentado, de forma sucinta, uma regressão linear por mínimos quadrados.

$$b = \frac{\sum X_i Y_i - n \bar{X} \bar{Y}}{\sum X_i^2 - n \bar{X}^2} \quad (8)$$

$$a = \bar{Y} - b \bar{X} \quad (9)$$

O valor de h_0 , pode ser estimado a partir de registros humanos. Por exemplo, os igarapés visitados por Mesquita et al., 1999, sempre tiveram relatos de moradores das pequenas comunidades, dizendo que, em secas extremas os igarapés apartaram, ou seja, cessaram de escoar, e assim estimou-se o par ($h_0 = 0$, $Q = 0$).

As estimativas de vazão utilizando a curva chave costumam definir apenas um trecho central da curva. Porém existem problemas nos trechos superiores e inferiores. Os problemas na representação da relação inferior são devidos principalmente a mudança de leito devido à deposição de sedimentos ou erosão. Já problema na relação superior é a carência de medidas nos eventos extremos. Então o ramo superior e o inferior são os pontos críticos da qualidade da relação. Assim para poder estimar as vazões também nessas situações e estabelecer uma série contínua de vazões (hidrograma), a curva chave deve ser extrapolada. Essas extrapolações, embora muitas vezes calçadas em maior e ou menor grau nas leis da hidráulica, são sempre de caráter duvidoso, devendo-se realizar medições de vazão fora do intervalo já medido a fim de confirmar ou retificar as extrapolações. A Figura 8 apresenta a curva chave extrapolada do Igarapé São João no sítio hidrológico da futura CGH Irmã Dorothy.

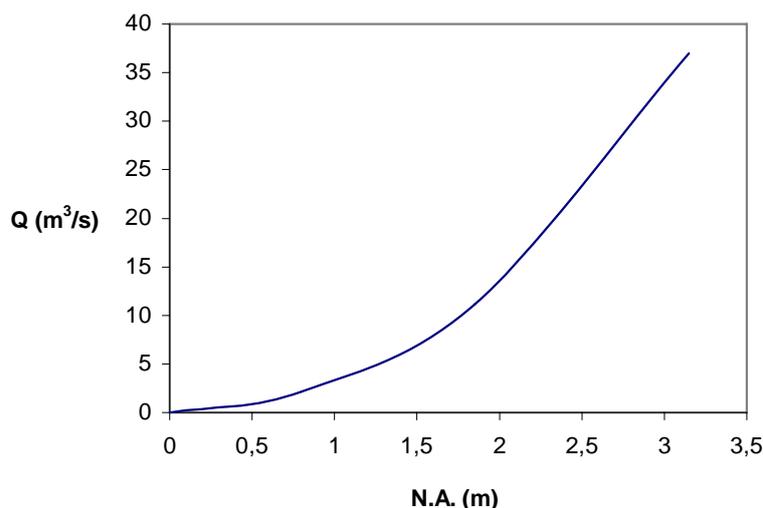


Figura 8 – Curva Chave do Igarapé São João – Anapú/PA

Desde que as pequenas bacias amazônicas não possuem dados de vazão, os hidrogramas e as curvas de permanência, deste estudo, são construídos via modelos hidrológicos chuva-vazão (Tucci et al., 1997, Giasante, 1999, Blanco et al., 2005, Blanco et al., 2007). A curva chave é utilizada na simulação das áreas de inundação das pequenas bacias hidrográficas. A Figura 9 mostra o sistema de apoio à decisão, adaptado de Blanco, 2005, envolvendo os aspectos hidrológicos. O modelo de transposição, citado na figura, é descrito no artigo apresentado no capítulo 3 deste trabalho.

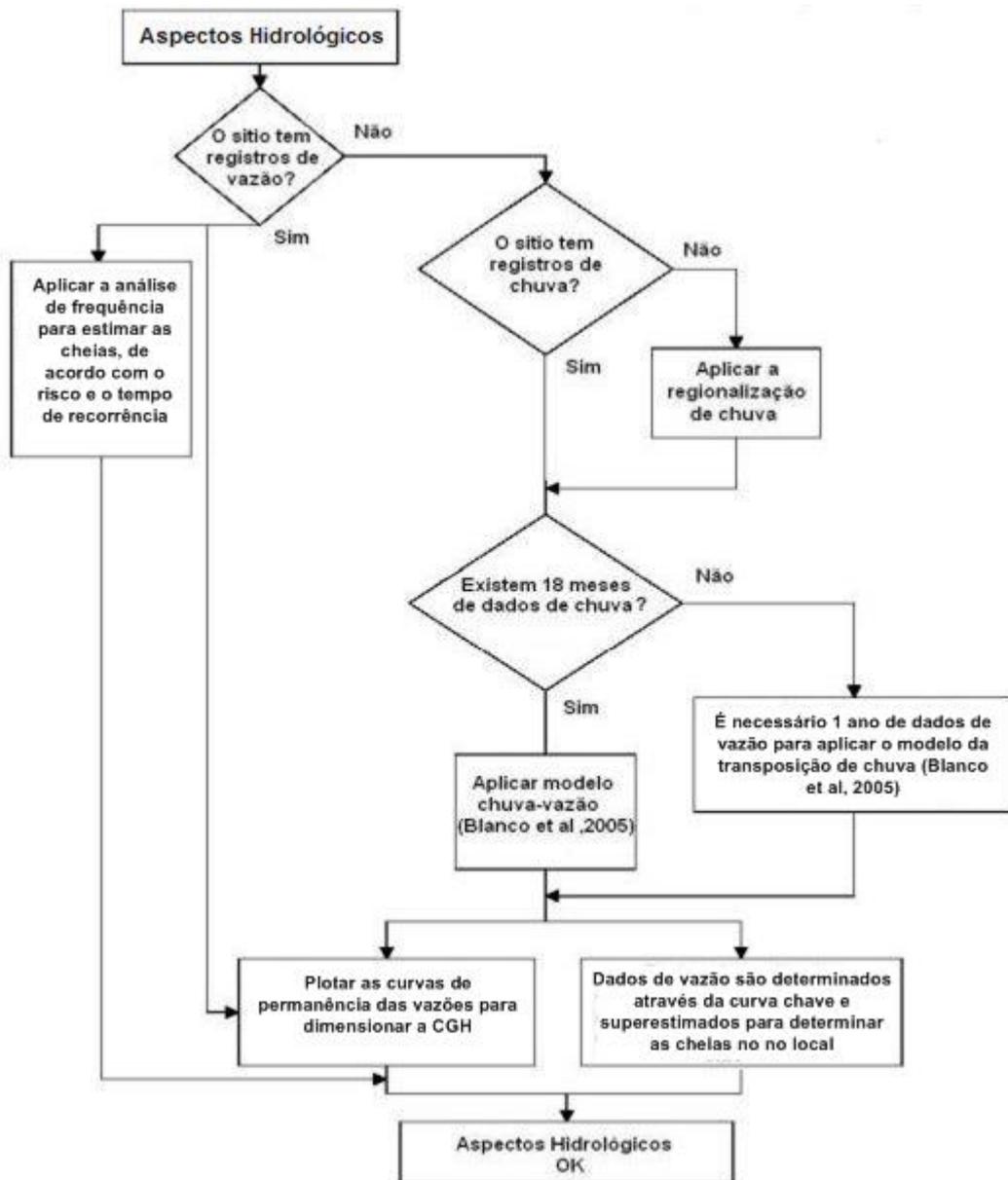


Figura 9 - Sistema de apoio à decisão - aspectos hidrológicos (adaptado de Blanco, 2005).

2.4. Aspectos Energéticos e Tecnológicos

2.4.1. Central Geradora Hidrelétrica (CGH)

As CGH's atual nomenclatura brasileira para designar as antigas MCH's (ANEEL, 2003), têm-se consolidado como alternativas para as comunidades isoladas ou agroindústrias que não estão interligadas ao sistema energético, ou são atendidas com uma energia cara e de baixa qualidade por estarem na ponta das redes de transmissão. Elas correspondem a potências inferiores a 1 MW (ANEEL, 2003) e podem ser classificadas quanto à queda de projeto, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das CGH's quanto à queda de projeto

| Queda (m) | Baixa | Média | Alta |
|-----------|-------|----------|-------|
| CGH | < 20 | 20 – 100 | > 100 |

As características encontradas em regiões da Amazônia conforme dados de levantamentos realizados por Mesquita et al., 1999, os quais sintetizaram o levantamento e noticiaram que a queda média dos sítios visitados é de 5 m, com potências inferiores a 100 kW, justificando a escolha das CGH's como centrais mais bem adaptadas a estes sítios. Tais CGH's devem ser do tipo a Fio d'Água (Figura 10), que são empregadas quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária a potência a ser instalada, para atender a demanda máxima prevista.



Figura 10 – Central a Fio d'água.

Neste caso, despreza-se o volume do reservatório criado pela barragem (Eletrobrás, 2000). Este tipo de central é o mais adequado ao relevo da região, que não dispõe de quedas para centrais dos tipos apresentados na Figura 11.

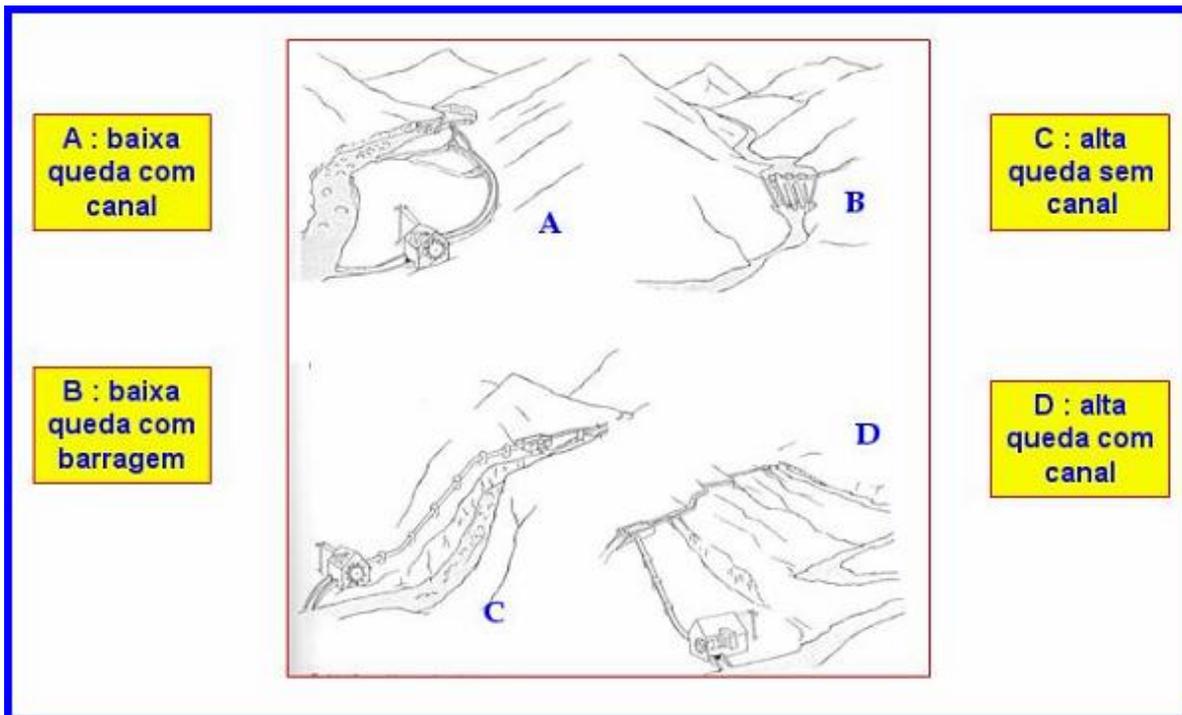


Figura 11 – Tipos de centrais adaptados a relevo acidentado.

2.4.2. Turbinas Axiais para Centrais a Fio d'Água

As turbinas hidráulicas axiais são turbomáquinas cujo escoamento principal através do rotor apresenta-se alinhado com o eixo de rotação da máquina, podendo ser de eixo vertical ou horizontal. Rotores típicos destas máquinas apresentam-se com pás fixas, que são as turbinas hélices ou “propeller”, tendo velocidades consideráveis em baixas quedas e altas vazões. Devido a esta especificidade foram escolhidas, do ponto de vista tecnológico, para serem utilizadas nos igarapés da Amazônia, que tem características de baixa queda e variação sazonal de vazão (Mesquita et al., 1999). Neste caso, pode-se controlar a carga pela vazão através da variação dos ângulos das pás do distribuidor.

Um outro tipo de rotor apresenta-se com pás ajustáveis, sincronizadas às pás do distribuidor: são estas as turbinas Kaplan. Nesta mesma linha de turbinas axiais, dependendo da queda disponível, surgem as configurações de turbinas bulbos, tubulares do tipo “S” e Straflo.

- Turbinas Hélice

A necessidade de obtenção de turbinas com velocidades consideráveis em baixas quedas e grandes vazões, o que não é viável com as turbinas Francis, deu origem em 1908 às turbinas hélices (Figura 12). Esse tipo de turbina apresenta rotor em forma de hélice de propulsão de pás fixas, sendo possível controlar sua vazão através da variação dos ângulos das pás do distribuidor, controlando assim sua carga.



Figura 12 – Turbina Hidráulica tipo hélice – Laboratório de Turbomáquinas da UFPA.

- Turbinas Kaplan

O engenheiro Austríaco Victor Kaplan (1876-1934), professor da Universidade Técnica de Brunn na Áustria, após estudos teóricos e experimentais, concebeu em 1912 um novo tipo de turbina axial a hélice, comportando a possibilidade de variar o passo das pás, isto é, inventou uma hélice de pás orientáveis.

Apesar da desconfiança inicial dos fabricantes em aceitarem o novo tipo de turbina por julgarem-no utópico e irrealizável, acabaram rendendo-se às vantagens desse tipo de turbina para quedas pequenas e médias e grandes vazões. O considerável número de turbinas Kaplan instaladas e com pleno êxito representa a consagração definitiva dessas turbinas.

As turbinas axiais do tipo Kaplan, bem como as do tipo hélices, apresentam-se com eixo horizontal, vertical (Figura 13), ou inclinado.

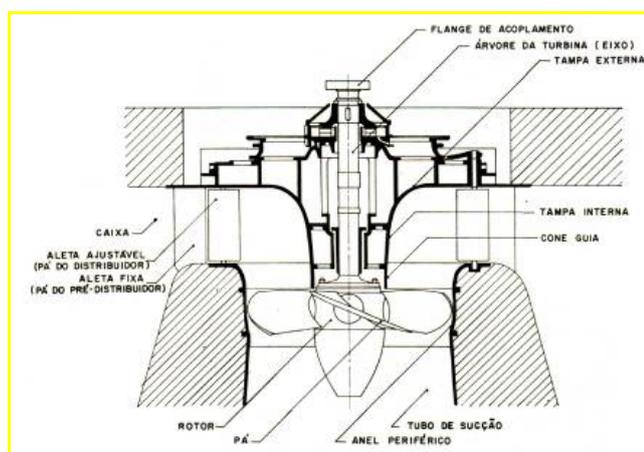


Figura 13 - Turbina Kaplan de eixo vertical.

- Turbinas Tubulares

O rotor, de pás fixas ou orientáveis, é colocado num tubo por onde a água escoa, e o eixo, horizontal ou inclinado, aciona um alternador colocado externamente ao tubo.

Existem três modalidades para essas instalações:

- o rotor tem pás fixas (hélice), e o distribuidor possui pás diretrizes orientáveis;
- o rotor possui pás orientáveis e o distribuidor pás fixas;
- o rotor e o distribuidor possuem ambas as pás orientáveis são os mais perfeitos e permitem o funcionamento reversível da unidade, isto é, como bomba e como turbina.

Em geral o eixo das turbinas tubulares (Figura 14) tem que ser bastante longo, o que obriga os cuidados no projeto para evitar vibrações. A figura mostra dois tipos de turbinas tubulares, com eixo horizontal e com eixo inclinado.

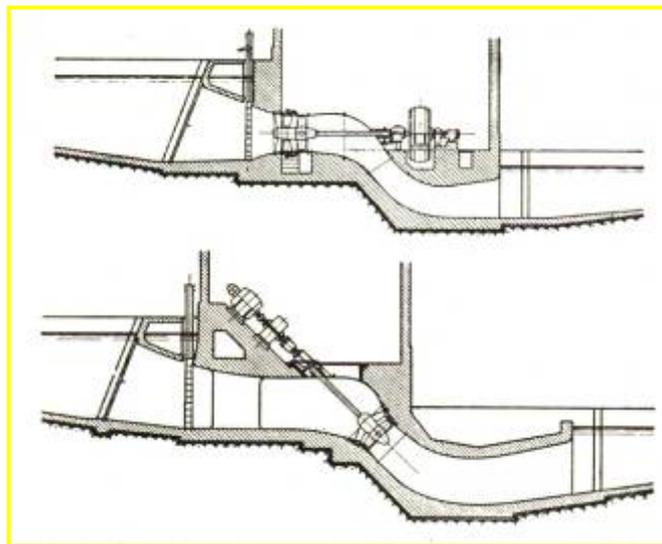


Figura 14 - Turbinas Tubulares com eixo horizontal e com Eixo inclinado.

- Turbinas Bulbo

Podem ser consideradas como uma evolução das turbinas tubulares. O rotor possui pás orientáveis semelhantes às das turbinas Kaplan e existe uma espécie de bulbo, colocado no interior do tubo adutor de água. No interior do bulbo, que é uma câmara blindada, pode existir meramente um sistema de transmissão por engrenagens, para transmitir o movimento do eixo da hélice ao alternador como acontece nos tipos aperfeiçoados, no interior do bulbo fica o próprio gerador elétrico.

A turbina bulbo (Figura 15) dispensa a caixa em caracol e o trecho vertical do tubo de sucção. O espaço ocupado em planta é, portanto, menor que o das turbinas Kaplan. Para um mesmo diâmetro do rotor, a turbina bulbo absorve uma descarga maior que as Kaplan, resultando maior potência a plena carga.

Durante algum tempo, construíram-se turbinas bulbo contendo um conjunto de engrenagens planetárias destinadas a aumentar o número de rotações para o acionamento do alternador. Modernamente, o acoplamento do eixo da turbina ao alternador colocado no interior do bulbo se realiza diretamente.

As turbinas bulbo que podem funcionar eventualmente como turbinas ou como bombas, têm sido empregadas em usinas maré-motrizas como a do estuário do rio Rance na França, onde foram instaladas 24 unidades de 10 MW cada.

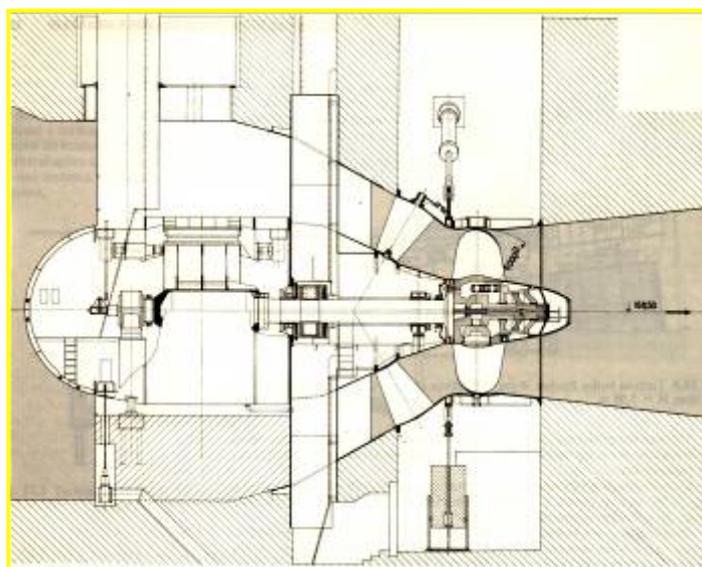


Figura 15 - Turbina Bulbo.

- Turbina Straflo

O que caracteriza a turbina Straflo (Figura 16) é a fixação do anel do indutor do gerador às extremidades das pás do rotor girando, portanto simultaneamente com o eixo da própria turbina. Por essa razão é também denominada turbina geradora de anel ou periférica. A primeira e principal vantagem desse tipo de turbina de baixa queda é não haver necessidade de colocar o gerador no interior de um bulbo, o que cria problemas de limitação das dimensões do gerador elétrico e de resfriamento. A colocação do alternador na periferia do próprio rotor da turbina possibilita uma instalação compacta e a obtenção de fator de potência maior que o conseguido com outros tipos em igualdade de condições de queda, descarga e custo de obras civis.

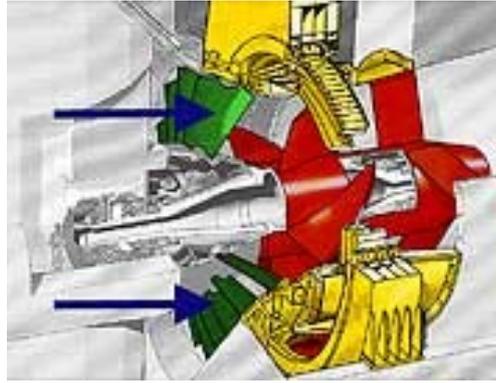


Figura 16 - Turbina Straflo.

As turbomáquinas hidráulicas axiais têm como característica, uma alta rotação específica, portanto, indicada para o aproveitamento hidroenergético de sítios hidrológicos com baixa queda e altas vazões, sendo estas as características dos pequenos rios e igarapés da região amazônica.

A rotação específica, caracterizada pela velocidade específica n_q , determina o tipo e a forma do rotor, bem como outros componentes da turbomáquina, sendo definida pela seguinte expressão;

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{0.75}} \quad (3)$$

onde n é a rotação em rpm, Q e H são respectivamente, a vazão (m^3/s) e a altura (m) de queda disponível. A especificação adequada da rotação específica da máquina é importante, pois os principais parâmetros dimensionais globais estão diretamente relacionados por ela. O valor da rotação específica define a faixa de aplicabilidade, fornecendo meios de comparação entre todos os tipos de turbinas.

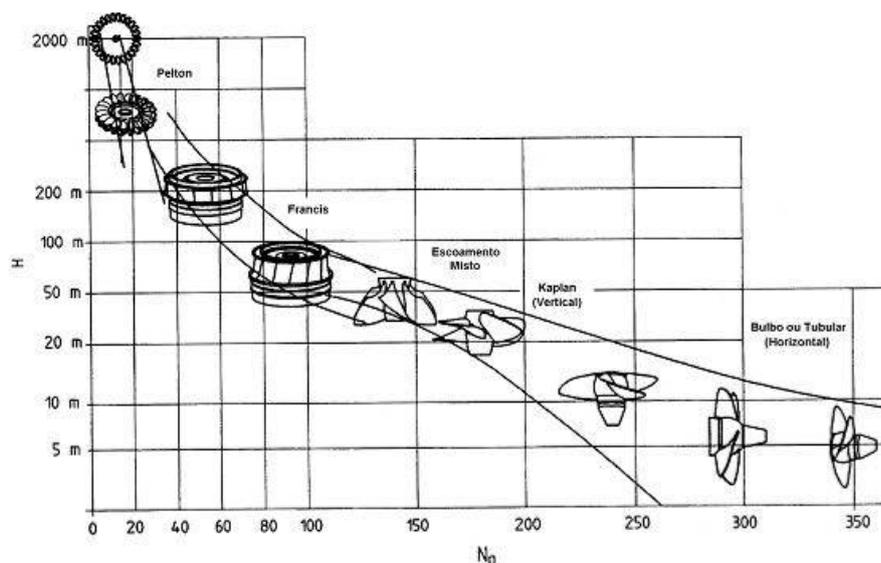


Figura 17 – Tipos de turbina em função da queda e da rotação específica, (ASME hydro power technical committee 1996).

De acordo com a Figura 17, para baixas quedas têm-se turbinas com alta rotação específica (turbomáquinas axiais), enquanto que para altas quedas têm-se turbinas com baixa rotação específica (turbomáquinas radiais, diagonais e as de impulsão).

Turbinas hidráulicas axiais são utilizadas em aproveitamentos cuja altura de queda está abaixo de 35 metros, como a abordada neste trabalho. Contudo, projetos mecânicos específicos, obra civil e fatores econômicos devem ser considerados na seleção dos arranjos de uma turbina axial. Os arranjos mais simples e com custos relativamente baixos são aqueles que apresentam rotor com pás fixas, velocidade constante e pás do distribuidor fixas. Estes arranjos são os mais apropriados para sítios hidrológicos com faixas de queda relativamente estreita.

Turbinas axiais de eixo horizontal ou inclinado, como as do tipo “S”, bulbo e tubulares (Figuras 14 e 15), geralmente têm alta velocidade e capacidade de operação mais elevada dentro de uma dada passagem d’água. Isto permite que a estrutura da casa de força seja menor, não necessitando de fundações profundas, reduzindo os custos relativos a escavações e construção civil. Em sítios que possuem altas quedas e vazões, tendo altas potências de saída, as turbinas axiais de eixo vertical são as mais indicadas. Neste tipo de configuração a estrutura e o suporte mecânico dos equipamentos possuem custos menores. Os geradores podem ser projetados com diâmetros e massa suficientes para prover a inércia adequada para estabilidade do sistema. Estas configurações não possuem restrições quanto à necessidade de acesso, resfriamento e capacidade dos geradores.

Uma análise dos parâmetros globais (hidráulicos, energéticos e geométricos) é indispensável no processo de desenvolvimento de turbomáquinas. Os parâmetros dimensionais são aqui determinados a partir de correlações disponíveis na literatura, possibilitando uma rápida seleção do tipo de turbina a ser utilizada, bem como a determinação das dimensões básicas envolvidas. A correta seleção de turbinas axiais de pequeno porte é um fator importante no desenvolvimento bem sucedido de centrais geradoras hidrelétricas, com um projeto simples e economicamente viável.

Estudos desenvolvidos por Schweiger e Gregori (1990), propõem correlações com base em dados estatísticos coletados a partir de plantas existentes e de vários fabricantes especializados, que fornecem os principais parâmetros hidráulicos, energéticos e geométricos de turbinas de pequeno porte para mini centrais hidrelétricas. Tais dados foram classificados e analisados estatisticamente, sendo os resultados apresentados em forma de coeficientes adimensionais, independente do tamanho e da velocidade do rotor. Deste modo, o projeto do rotor pode ser efetuado criteriosamente, ainda que simplificações no mesmo possam ser introduzidas sem prejuízos significativos à eficiência.

Schweiger e Gregori (1990) oferecem uma completa análise dos parâmetros globais de turbinas hidráulicas axiais. Os resultados por eles apresentados podem ser utilizados de modo a ter-se uma rápida estimativa desses parâmetros básicos de micro, turbinas e com boa confiabilidade. Os resultados dos autores supracitados são utilizados nas análises hidráulicas, energéticas e geométricas da turbina axial adotada no presente trabalho.

2.4.3. Softwares de Turbinas Hidráulicas

- Software TURBNPRO

Com os dados da curva de permanência é possível configurar turbinas hidráulicas e realizar cálculos sobre a geração de energia. O usuário fornece ao programa um conjunto de condições hidroelétricas e parâmetros de operação.

Após o programa ter sido inicializado, surge uma janela (Figura 18) dando ao usuário a opção de selecionar tipo de turbina.

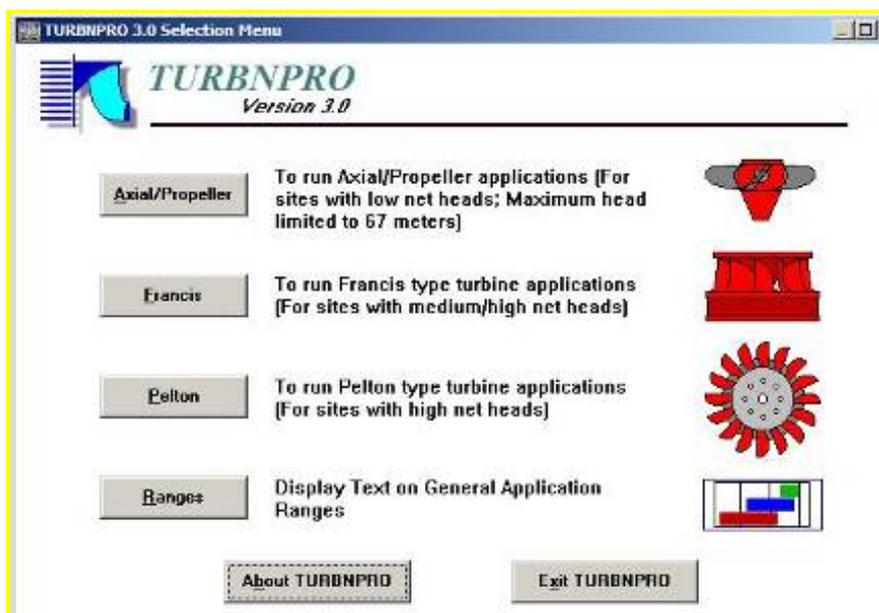
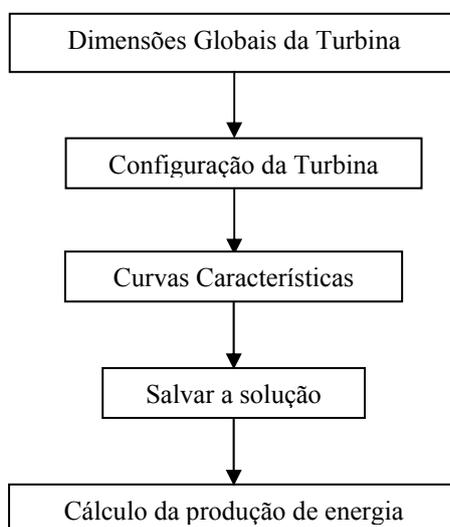


Figura 18 – Tela inicial do TURBNPRO.

Esta seleção dependerá das condições de instalação da máquina que o usuário dispõe. Queda, vazão, etc, pois dependendo destas grandezas definir-se-á qual opção da janela inicial usar-se-á. O software fornece opções de turbinas, a turbina axial, foco deste trabalho na qual tem características de baixas quedas, a Francis a médias e altas quedas e a Pelton operando a altas quedas.

Após a escolha do tipo de turbina, devemos entrar com os dados solicitados pelo software, tais como: vazão nominal, obtida através da curva de permanência; quedas líquidas e brutas, entre outras informações.

Quando uma aplicação do TURBNPRO é executada, uma típica seqüência pode ser definida como segue:



Após a seleção do tipo de turbina, os dados seguintes requeridos pelo Turbpro para a predição de características de desempenho são :

1. Vazão Nominal
2. Queda líquida
3. Queda bruta
4. Altitude em relação ao nível do mar
5. Temperatura
6. Altura do eixo da turbina em relação a jusante
7. Prioridade de eficiência para máxima vazão
8. Razão entre a queda de projeto e a queda de eficiência máxima
9. Frequência do sistema
10. Mínima altura líquida

Baseado nas características típicas de turbinas hidráulicas, o TURBNPRO fornecerá ao usuário dimensões, velocidades, limitações de operação e características de rendimento das turbinas propostas como solução, que satisfariam os dados de entrada do usuário. O usuário deverá escolher uma das opções fornecidas pelo software.

A partir dos dados de entrada listados anteriormente o programa nos fornece as dimensões principais e velocidades das turbinas selecionadas. O usuário então seleciona a que melhor se adapte ao seu sítio de instalação. Com as dimensões e as velocidades da turbina selecionadas, o usuário define então as configurações de instalação da turbina.

Curvas Características

Após a seleção do tamanho e configuração da turbina o programa fornece as curvas de desempenho da turbina, bem como os desenhos com as dimensões selecionadas da turbina e sua configuração como pode ser visto a seguir:

Cálculo da Produção de Energia

Além do arquivo mencionado anteriormente, são necessários também a curva de permanência, e as curvas de elevação a montante e a jusante do rio em função da vazão para o cálculo da produção de energia. Com isto o programa nos fornece os seguintes resultados.

Resumo dos Resultados Relativos à turbina e sua produção de energia anual

Dimensões da turbina e do tubo de sucção

Diâmetro do rotor

Diâmetro do cubo do rotor
Diâmetro do anel das pás diretrizes
Comprimento do tubo de sucção
Rotação da turbina
Potência na máxima queda líquida
Potência na mínima queda líquida
Produção de Energia anual
Energia anual

- Programa CARTHA

O programa Cartha foi desenvolvido em Matlab, através de projeto de pesquisa no âmbito do programa trópico úmido do CNPq, desenvolvido pela Universidade Federal do Pará e UNI-FEI – Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, e consiste na predição de características de desempenho de turbinas hidráulicas axiais tipo hélice, sem regulagem no rotor ou no distribuidor (geometria totalmente fixa), O programa pode auxiliar nos seguintes aspectos: levantamento de características de vazão, pressão e rotação dos circuitos hidráulicos e do sistema de acionamento/frenagem necessários para eventuais ensaios; indicação de possíveis alterações em unidades em funcionamento; fornecimento de dados para análise do desempenho do conjunto turbomáquina-elétrica, verificação dos dados nominais de desempenho fornecido pelo fabricante de uma certa turbina.

O programa fornece avaliações expeditas, relativamente confiáveis, das principais características operativas de uma turbina hélice, partindo de seus dados geométricos (tabela1), mais importantes e simples de se obter (diâmetros, comprimentos e ângulos). Informações detalhadas sobre perfis de pás não são contempladas, pois nem sempre estão disponíveis ou são de difícil medição, mas é plenamente possível inserir esses dados na rotina do programa.

Como resultado, o programa gera diversos diagramas de colina e curvas operacionais: 1) diagrama de colina **Vazão x Rotação** com curvas de altura e rendimento constante; 2) diagrama de colina **Altura x Vazão** com curvas de rendimento constante; 3) diagrama de colina **Altura x Rotação** com curvas de rendimento constante; 4) diagrama auxiliar **Rendimento x Vazão** com curvas de altura constante; 5) diagrama auxiliar **Rendimento x Rotação** com curvas de altura constante; 6) diagrama **Potência x Vazão** com curvas de altura constante.

Tabela 1 – Dados de entrada solicitados pelo CARTHA.

| DADOS DE ENTRADA | |
|--|---------------------------------------|
| TURBINA | PÁS DO DISTRIBUIDOR |
| Diâmetro Interno do Rotor | Número de Pás do Distribuidor |
| Diâmetro Externo do Rotor | Largura da Pá do Distribuidor |
| Diâmetro da Carcaça no Local do Rotor | Ponto Médio da Pá do Distribuidor |
| Diâmetro Interno da Entrada da Turbina | Ângulo do Cone de Pás do Distribuidor |
| Diâmetro Externo da Entrada da Turbina | Ângulo de Saída da Pá do Distribuidor |
| | |
| PÁS DO ROTOR | TURBINA ELEMENTAR 1 |
| Número de Pás do Rotor | Largura Axial da Pá do Rotor |
| | Corda da Pá do Rotor |
| TURBINA ELEMENTAR 2 | Ângulo de Entrada das Pás do Rotor |
| Largura Axial da Pá do Rotor | Ângulo de Saída da Pá do Rotor |
| | |
| TURBINA ELEMENTAR 3 | TURBINA ELEMENTAR 4 |
| Largura Axial da Pá do Rotor | Largura Axial da Pá do Rotor |
| Corda da Pá do Rotor | Corda da Pá do Rotor |
| Ângulo de Entrada das Pás do Rotor | Ângulo de Entrada da Pá do Rotor |
| Ângulo de Saída da Pá do Rotor | Ângulo de Saída da Pá do Rotor |
| | |
| TURBINA ELEMENTAR 5 | |
| Largura Axial Pá do Rotor | |
| Corda da Pá do Rotor | |
| Ângulo de Entrada das Pás do Rotor | |
| Ângulo de Saída da Pá do Rotor | |

2.5. Aspectos Ambientais

A análise desses aspectos baseia-se principalmente na investigação dos impactos ambientais que podem ser causados por CGH's e nas medidas mitigadoras e compensatórias visando à minimização e à compensação dos mesmos.

2.5.1. Tipos de Impactos Ambientais

Atualmente a literatura relaciona diversos tipos de impactos ambientais para grandes centrais hidrelétricas. De forma geral, os impactos ambientais de aproveitamento hídricos são classificados em duas dimensões (Trussart *et al.*, 2002):

- Impactos biológicos, físicos e químicos;
- Impactos sócio-econômicos.

O impacto físico mais comum é a diminuição da correnteza do rio, o que gera uma alteração na dinâmica do ambiente aquático. Com isso a temperatura da água também sofre alterações, tendendo a dividir o lago da represa em dois ambientes: o fundo do lago (onde a temperatura é mais baixa) e a superfície do lago (onde a temperatura é mais alta). Essa diferença de temperatura faz com que haja pouca mistura na água do ambiente represado, criando condições anóxicas e favorecendo a eutrofização do lago. Esse é o principal impacto químico, pois leva a reações que geram compostos nocivos a saúde humana.

Já os impactos biológicos estão relacionados à barreira física introduzida com a implantação da barragem. Eles geram um fator de isolamento para populações e espécies aquáticas que antes viviam em contato e impede ou dificulta a piracema de algumas espécies de peixe. Também altera a dinâmica do rio, bem como as alterações na qualidade da água, afetando tanto a região a montante quanto a jusante da barragem (Trussart *et al.*, 2002).

A impossibilidade de desova dos peixes migratórios faz com que essas espécies desapareçam e haja a redução de habitat de várias espécies. A secagem de alguns lagos pela diminuição do volume de água à jusante da barragem destrói importantes áreas de reprodução de peixes; provoca uma diminuição das plantas aquáticas que servem de alimento e local de proteção para algumas espécies. A montante da barragem o quadro é inverso; há uma proliferação descontrolada de macrófitas aquáticas, aumentando a oferta de alimento, mas reduzindo a penetração de luz e aeração da água (Magalhães *et al.*, 1996).

Também a diminuição da qualidade da água e o possível aumento da incidência de doenças são considerados como impactos sócio-econômicos. Os projetos desenvolvidos na Amazônia são alvos de muita crítica, em função de terem provocado o deslocamento de populações nativas e destruição do meio ambiente. (Pereira Darzé, 2002).

No caso das centrais geradoras hidrelétricas de pequeno porte e baixa queda para suprimento a comunidades isoladas, os impactos sócio-econômicos são insignificantes ou inexisten-

tes, pois a área inundada é bastante reduzida devido ao menor tamanho e ao tipo da central que é a fio d'água, ou seja, não necessita de reservatórios de regularização para operar, com isso não necessitando de desmobilização de pessoas ou comunidades, e não interferindo no sistema de produção. No entanto, os impactos biológicos, físicos e químicos são prováveis, mas devido ao porte da central tais impactos devem existir em menor escala.

2.5.2. Medidas Mitigadoras e Compensatórias

Várias medidas de mitigação são criadas e implementadas por grandes centros de pesquisa, dentro do contexto de projetos de aproveitamentos hídricos em todo mundo. Os projetos requerem o compartilhamento das responsabilidades pelos agentes públicos e comunitários locais. Neste contexto, categorias de medidas sociais e ambientais de mitigação geralmente estão ligadas aos impactos das centrais hidroelétricas citados anteriormente (Trussart et al, 2002).

Os impactos biológicos e físicos apresentam medidas de mitigação de sucesso, em relação à vida aquática, através de medidas para o desenvolvimento de comunidades de peixe e pesca em reservatórios:

- Criação de condições para habitat de espécies;
- Criação de espécies comerciais que são bem adaptadas a reservatórios;
- Implantação de tecnologias de viveiro;
- Sistema de comercialização de peixes (mini-cooperativa).

Um outro impacto analisado é a redução do nível de oxigênio, que pode comprometer a qualidade da água, e está relacionado com a dimensão da área de inundação e com a cota de água do reservatório. A montante com o fechamento da barragem há uma proliferação descontrolada de macrófitas aquáticas, aumentando a oferta de alimento, mas reduzindo a penetração de luz e aeração da água, e a jusante o volume de água torna-se baixo, provocando a diminuição das plantas aquáticas. Como as CGH's possuem uma área de inundação reduzida, espera-se, neste caso, pouco impacto ambiental ligado à qualidade da água.

2.6. Aspectos Legais

Os procedimentos, atuais, de licenciamento ambiental são estabelecidos nas Resoluções CONAMA N^{os} 001, de 23 de janeiro de 1986, e 237, de 19 de dezembro de 1997 e, para empreendimentos do setor elétrico, de forma complementar, na Resolução CONAMA n^o 006, de 16 de setembro de 1987.

De acordo com a legislação brasileira, a classificação dos aproveitamentos hidrelétricos se divide em dois tipos; serviços públicos e uso exclusivo. Os aproveitamentos destinados aos serviços públicos são aqueles cuja energia elétrica gerada, independentemente da potência da usina, se destina ao uso geral, sendo para isso comercializada pelo seu produtor, ou seja, a concessionária de serviços públicos.

Os aproveitamentos destinados ao uso exclusivo são aqueles cuja energia elétrica gerada se destina ao uso exclusivo de seu produtor, que é denominado autoprodutor. Conforme a potência a ser instalada, a implantação depende de uma simples notificação, ou autorização federal, ou ainda de uma concessão federal (ANEEL, 2003) e estabelece as seguintes faixas de potência para tal fim:

As usinas com potência instalada de até 1.000 kW, denominadas de Centrais Geradoras Hidrelétricas – CGH, necessitam apenas de um simples registro para funcionar (ANEEL, 2003). A Constituição Federal de 1988, no seu art 176, alterado pela Emenda Constitucional nº 6/95, definiu no parágrafo 4º que não dependerá de autorização ou concessão o aproveitamento do potencial de energia renovável de capacidade reduzida. O art 8º da Lei nº 9.074, de 1995, estabeleceu que os aproveitamentos de potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 1.000 kW estão dispensados de concessão, permissão ou autorização, devendo apenas ser comunicados ao poder concedente. O art 5º do Decreto nº 2.003, de 1996, regulamentou que os aproveitamentos de potenciais hidráulicos iguais ou inferiores a 1.000 kW independem de concessão ou autorização, devendo, entretanto, ser comunicados ao órgão regulador e fiscalizador do poder concedente, para fins de registro.

Os aproveitamentos hidrelétricos para uso exclusivo deverão ter a propriedade da área onde será construída a central, inclusive as inundadas pelo eventual reservatório, ou obter uma autorização dos proprietários ribeirinhos.

A notificação de operação referida é feita através de correspondência ao diretor geral da ANEEL, através de formulário padrão disponibilizado para registro de aproveitamento hidrelétrico.

De acordo com a Constituição Federal, os potenciais de energia hidráulica constituem bens da União (Capítulo II, art. 20, inciso VIII).

De acordo, ainda, com a Constituição, compete à União explorar diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão, o aproveitamento energético dos cursos d'água, em articu-

lação com os Estados onde se situam os potenciais hidroenergéticos (Capítulo II, art. 21, inciso XII, alínea b).

Especificamente para impactos ambientais de pequeno porte, a Resolução CONAMA 279 de 27 de junho de 2001, resolve que os procedimentos e prazos estabelecidos nesta resolução, aplicam-se, em qualquer nível de competência, ao licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental, aí incluídos:

I - Usinas hidrelétricas e sistemas associados;

II - Usinas termelétricas e sistemas associados;

III - Sistemas de transmissão de energia elétrica (linhas de transmissão e subestações).

IV - Usinas Eólicas e outras fontes alternativas de energia.

Para os fins desta Resolução, são adotadas definições padrão para obtenção da licença ambiental:

I - Relatório Ambiental Simplificado - RAS (segundo modelo CONAMA): os estudos relativos aos aspectos ambientais relacionados à localização, instalação, operação e ampliação de uma atividade, ou empreendimento, apresentados como subsídio para a concessão da licença prévia requerida, que conterà, dentre outras, as informações relativas ao diagnóstico ambiental da região de inserção do empreendimento, sua caracterização, a identificação dos impactos ambientais e das medidas de controle, de mitigação e de compensação.

II - Relatório de Detalhamento dos Programas Ambientais: é o documento que apresenta, detalhadamente, todas as medidas mitigatórias e compensatórias e os programas ambientais propostos no RAS.

A Lei 9433/97 que "Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos", traz em um dos seus instrumentos essenciais para a gestão dos recursos hídricos, a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, que é um instrumento pelo qual o usuário recebe autorização ou concessão, para fazer uso da água. Art. 5º São instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos: III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos.

A outorga de uso da água promove o acesso à água para todos os usuários, pois, quando o usuário solicitar a sua outorga, receberá esta, na forma de autorização, concessão, ou permissão. Mediante a outorga, poderá fazer uso da água, de acordo com as condições estabelecidas, que dependerão da capacidade do manancial hídrico e da quantidade de água que o usuário deman-

dar. Com a outorga, o usuário terá um documento que lhe assegurará o direito de uso da água naquele local, vazão, prazo e a finalidade de uso da água outorgada.

A outorga de direito de uso, é o elemento central do controle dos recursos hídricos, é o instrumento legal que permite que todos os usuários possam usar a água e, com isso estimulará a participação dos mesmos na gestão dos recursos hídricos, fazendo com que cada usuário busque obter a sua outorga e efetivando o Princípio do Usuário Pagador, porque a água é domínio público. A participação da sociedade se concretiza através dos Comitês de Bacias, que serão os responsáveis pelo gerenciamento dos recursos hídricos. Embora a outorga seja concedida pelo Poder Público, essa concessão está condicionada às diretrizes estabelecidas pelos planos de bacia, aprovados.

A outorga de direitos de uso de Recursos Hídricos está prevista no artigo 12, que estabelece os usos da água sujeitos a outorga pelo poder público:

Art. 12. Estão sujeitos à outorga pelo Poder Público os direitos dos seguintes usos de recursos hídricos:

I - derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;

II - extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;

III - lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim e sua diluição, transporte ou disposição final;

IV - aproveitamento dos potenciais hidrelétricos;

V - outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

§ 1º Independem de outorga pelo Poder Público, conforme definido em regulamento:

I - o uso de recursos hídricos para a satisfação das necessidades de pequenos núcleos populacionais, distribuídos no meio rural;

II - as derivações, captações e lançamentos considerados insignificantes;

III - as acumulações de volumes de água consideradas insignificantes.

§ 2º A outorga e a utilização de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica estará subordinada ao Plano Nacional de Recursos Hídricos, aprovado na forma do disposto no inciso VIII do art. 35 desta Lei, obedecida a disciplina da legislação setorial específica.

A análise dos aspectos legais condiciona a implantação de uma CGH apenas à outorga do direito de uso dos recursos hídricos, devido ao artigo 12, inciso I. Em contra-partida, o mesmo artigo em se § 1º, inciso III, define que empreendimentos cujas acumulações de volumes de água sejam consideradas insignificantes, independem de outorga. Contudo, o artigo 12 não define o

que seria volume insignificante, caso houvesse tal definição, uma saída para a dispensa de outorga para a implantação de CGH's seria o cálculo da área inundada pela barragem. Todavia, a área inundada deve ser calculada para satisfazer o RAS.

Do exposto acima, deve-se contactar o órgão ambiental estadual, já que se trata de uma pequena bacia não transfronteiriça, para que se faça o pedido de outorga. No Estado do Pará, o pedido é feito à SEMA – Secretaria Estadual de Meio Ambiente.

2.7. Aspectos Financeiros

O objetivo da análise financeira é o de comparar os custos das CGH's com outras possíveis alternativas de geração para escolha da melhor alternativa dentro de uma perspectiva de desenvolvimento sustentável da comunidade.

Do ponto de vista financeiro, as CGH's diferem dos geradores a diesel, opção muito utilizada em pequenas comunidades da Amazônia, por terem um custo de instalação por kW elevado (Penche, 1998). Entretanto, os custos operacionais são extremamente baixos, pois não necessitam de combustível para operar.

No Centro-sul do Brasil, o custo de instalação de uma CGH por kW está entre US\$510.00 e US\$ 2,074.00 (Balarim, 1998). Porém, estes custos não podem ser aplicados a este estudo, porque as turbinas analisadas são do tipo Francis. Em um nível internacional, Khennas e Barnett (2000) analisaram projetos de Nepal, Sri Lanka, Zimbábue e Peru e eles notaram uma variação nos custos de instalação por kW entre \$ 1,136.00 e \$ 5,630.00.

O custo de instalação C_i por kW produzido é calculado por:

$$C_i = \frac{\text{Custo do projeto}(\$US)}{\text{Potência instalada} (kW)} \quad (10)$$

O custo do projeto é o somatório dos custos de construção da barragem, da casa de força e da tubulação forçada para uma região de acesso difícil, ocasionando custos extras de transporte, logística e mobilizações de pessoal. Além destes, são também estabelecidos os custos do grupo turbina/gerador/regulador, aos quais são adicionados os custos de transporte.

Além da determinação do custo de instalação é necessário determinar o custo unitário da energia produzida pela CGH. Tal custo pode ser determinado considerando-se o valor presente (depreciação) de uma anuidade calculada sobre os custos do projeto e de O&M (Operação e Manutenção) e é dado por,

$$CUE = \frac{cp + com}{a_n \cdot t \cdot P} \quad (11)$$

onde:

CUE – Custo Unitário de Energia;

cp – custo do projeto (US\$);

com – custo de O&M (US\$);

a_n – fator de desconto (-);

t – tempo de funcionamento (h);

P – Potência (kW).

As Eqs. (10) e (11) podem ser aplicada às CGH's e ao principal concorrente delas na Amazônia – os geradores a diesel. Logo, os custos destes dois sistemas de geração isolados, podem ser comparados aos do abastecimento rural, completando a análise financeira da melhor alternativa, dentre as três supracitadas. Entretanto, nem sempre a melhor opção financeira, é a melhor opção para o desenvolvimento sustentável de uma pequena comunidade da região.

Capítulo 3

Modelo Chuva-Vazão para Simulação de Vazões de Pequenas Bacias Hidrográficas Visando à Estimação de Potencial Hidrelétrico¹

Fábio Vinícius Vieira Bezerra², André Luiz Amarante Mesquita³ & Claudio José Cavalcante Blanco⁴

RESUMO --- O artigo pauta-se na necessidade de conhecimento de dados de vazão de pequenas bacias hidrográficas, as quais raramente possuem registros. Os dados de vazão servem para a obtenção das curvas de permanência dos pequenos cursos d'água. Essas curvas são necessárias para o dimensionamento de microcentrais hidrelétricas que podem ser utilizadas para o fornecimento de energia a pequenas comunidades isoladas. Assim, sobre as bacias hidrográficas é aplicada a transposição de um modelo chuva-vazão para a simulação das vazões. O modelo é linear e invariável no tempo, baseado numa relação de causa e efeito entre as chuvas e as vazões que é traduzida pela resposta impulsional do sistema linear considerado, no caso a pequena bacia hidrográfica. As vazões simuladas são comparadas às vazões observadas, comprovando que o modelo não é adequado à simulação dos hidrogramas. Todavia, como o modelo simula bem as curvas de permanência, o mesmo é utilizado com este fim sobre as pequenas bacias alvos e sem dados de vazão. As curvas de permanência juntamente com as quedas brutas servem para estimar a potência dos sítios, demonstrando que os pequenos cursos d'água podem servir para a instalação de microcentrais hidrelétricas, visando o fornecimento de energias a pequenas comunidades isoladas.

¹ Artigo Publicado no VIII Simpósio dos Recursos Hídricos do Nordeste

² Aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – CT – UFPA. E-mail: fvvb@ufpa.br.

³ Professor da Faculdade de Engenharia Mecânica – DEM – CT – UFPA. E-mail andream@ufpa.br.

⁴ Professor colaborador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – CT – UFPA. Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Côrrea, 1, Belém, PA, 66075-110. E-mail: blanco@ufpa.br.

ABSTRACT --- The paper is focused on the need of streamflow data of small catchments, which rarely are gauged. The streamflow data are used for obtaining the flow duration curves of the small rivers. These curves are necessary for the project of micro hydropower that can be used for the energy supply the small isolated communities. This way, the transferability of the rainfall-runoff model is applied on the catchments for streamflow simulation. The model is linear and time-invariant (input-output), based on a cause-effect relationship between rainfall and the runoff that is represented by impulse response of the considered linear system, in that case, the small catchment. The simulated streamflows are compared to observed streamflows, demonstrating that the model is not adapted to the hydrogram simulation. Though, as the model simulates adequately the flow duration curves, it is used with this end on the ungauged small catchments. The flow duration curves together with the gross heads are used for estimating the power installed of the sites, demonstrating that the small rivers can serve for the installation of micro hydropower to the supply the small isolated communities.

Palavras-chave: Pequenas bacias hidrográficas, transposição de um modelo chuva-vazão, potencial hidrelétrico.

1 - INTRODUÇÃO

Nas regiões Norte e Nordeste a energia é gerada por hidrelétricas que aproveitam principalmente os recursos das grandes bacias hidrográficas, onde existem dados históricos de vazão. Isto deixa de lado as inúmeras pequenas bacias que não possuem esses dados. Tais bacias podem ser usadas na geração de energia elétrica para as pequenas comunidades isoladas (Mesquita et al., 1999). Neste caso, as plantas seriam microcentrais hidrelétricas (MCH) que possuem uma potência inferior a 100 kW (DNAEE/Eletróbrás, 1985). Esta potência é pequena, mas suficiente para responder as demandas energéticas das pequenas comunidades.

Como as chuvas são os únicos dados disponíveis para as pequenas bacias das regiões supracitadas. O primeiro objetivo deste artigo é a transposição de um modelo chuva-vazão desenvolvido por Blanco et al. (2005), visando à simulação das vazões e conseqüentemente as curvas de permanência de igarapés e riachos. O segundo objetivo é a estimação da potência instalada dos sítios, para tanto, utilizam-se juntamente com as curvas de permanência, as alturas de queda medidas por Mesquita et al. (1999).

A estimação das potências permitirá a análise do aproveitamento hidrelétrico das pequenas bacias, respondendo as demandas energéticas das pequenas comunidades isoladas.

2 – MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO

O modelo desenvolvido por Blanco et al. (2005) é baseado na relação de causa-efeito entre as chuvas e vazões. Modelos que seguem este tipo de relação são apresentados na literatura desde que Sherman (1932) introduziu o conceito de hidrograma unitário. Eles são igualmente utilizados por Rodriguez (1967), Papazafiriou (1976), Goring (1984), Kachroo (1992) e Labat et al. (2000).

Os processos chuva-vazão são conhecidamente não lineares (Kachroo & Liang, 1992) e invariáveis no tempo. A principal fonte das não linearidades é a infiltração, outra fonte origina-se das variações espaciais do subsolo das bacias hidrográficas. A variabilidade no tempo é explicada pela sazonalidade das chuvas e vazões que caracterizam os sistemas hidrológicos. Apesar disso, as hipóteses simplificadoras do modelo são a linearidade e a invariabilidade no tempo da relação chuva-vazão. Elas são justificadas pelo pequeno tamanho das bacias analisadas. Assim, as vazões $y(t)$ são representadas pela convolução entre a chuva $x(t)$ e a resposta impulsional, $h(u)$ (Equação 1).

$$y(t) = \int_0^t h(u)x(t-u)du \quad (1)$$

Aplicando-se a análise espectral cruzada à Equação 1, pode-se demonstrar (Blanco et al., 2005), que a resposta impulsional expressa-se da seguinte forma:

$$H(\omega) = f_{xy} / f_x \quad (2)$$

onde f_{xy} é o espectro de variância cruzada entre a entrada e a saída, f_x é o espectro de variância da entrada e $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência. É possível estimar f_x e f_{xy} a partir de um truncamento m aplicado às transformadas de Fourier de γ_x e de γ_{xy} , os quais são representados respectivamente por C_x (Equação 3) e por C_{xy} e C_{yx} (Equações 4 e 5) (Padilla e Pulido-Bosch, 1995):

$$C_x(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{n} \quad (3)$$

$$C_{xy}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y})}{n} \quad (4)$$

$$C_{yx}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-k} (y_i - \bar{y})(x_{i+k} - \bar{x})}{n} \quad (5)$$

onde C_x é a autocovariância discreta de $x(t)$, C_{xy} é a covariância cruzada discreta entre $x(t)$ e $y(t)$, C_{yx} é a covariância cruzada discreta entre $y(t)$ e $x(t)$, k varia de 0 à m e representa a decaagem temporal entre x e y ; e i é o passo no domínio do tempo.

A determinação das respostas impulsionalis no domínio da frequência (Equação 2), implica que é necessário aplicar a essas respostas a transformada inversa de Fourier para calculá-las no domínio do tempo, permitindo a aplicação da convolução entre os dados de chuva (x) e as respostas impulsionalis (h), determinando as vazões (y).

O mecanismo que conduz as chuvas, em uma bacia hidrográfica, até os rios é muito complexo. Ele depende das condições de evaporação, interceptação, umidade do solo e dos escoamentos subterrâneos, os quais dependem dos eventos passados de chuva; essa dependência em relação aos eventos passados de chuva é traduzida pela memória dos sistemas hidrológi-

cos, que são representados matematicamente pela forma discreta da integral de convolução dada por,

$$Q_i = \sum_{j=1}^m h_j C_{i-j+1} \quad \text{com} \quad i = 1, 2, \dots, n+m-1$$

(6)

onde $Q(m^3/s)$ é a vazão, $h_j(m^2/s)$ é a resposta impulsional, $C(mm)$ é a chuva, m é o comprimento da memória do sistema que representa o efeito de uma chuva continua que se estende por m intervalos de duração T . Essa duração depende da frequência dos dados, os quais podem ser: diários, horários, etc; e n é o número de observações.

3. APLICAÇÃO E TRANSPOSIÇÃO DO MODELO

A Figura 1 ilustra o fluxograma de transposição do modelo de uma bacia fonte a uma bacia alvo, partindo dos dados de entrada (chuvas e vazões) aos quais se aplica a análise espectral cruzada para determinar a resposta impulsional da bacia fonte. Em seguida, aplica-se a convolução entre essa resposta e as chuvas da bacia alvo para simular as vazões desta. Neste caso, $Q_s(m^3/s km^2)$ é a vazão específica, $C(mm)$ é a chuva, $H_s(m^2/s km^2)$ é a resposta impulsional específica, $S_{bh}(km^2)$ é a área de drenagem da bacia hidrográfica, $Q(m^3/s)$ é a vazão simulada, a e f são respectivamente os índices das bacias alvo e fonte.

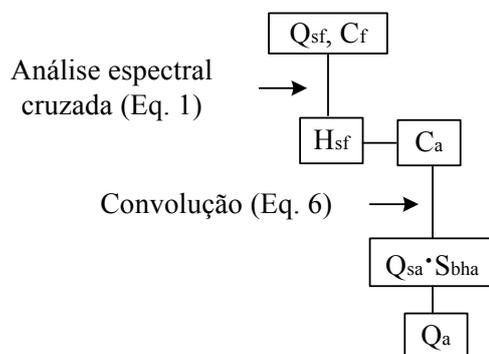


Figura 1 – Fluxograma de transposição do modelo

4. PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

4.1. Bacia Fonte

A bacia do igarapé da Prata localiza-se 160 km a leste de Belém, Pará (Figura 2) e possui uma área de drenagem de 82 km². Ela serve como bacia fonte, pois é a única na região a apresentar registros de vazões consecutivos (7 anos/1993-1999) necessários à aplicação do

modelo chuva-vazão, porém não dispõe diretamente de dados de chuva. Portanto, retêm-se dados de chuvas da estação pluviométrica mais próxima da estação fluviométrica (Tabela 1), distante aproximadamente 15 km a norte. Tanto os dados de vazão como os dados de chuva são diários.

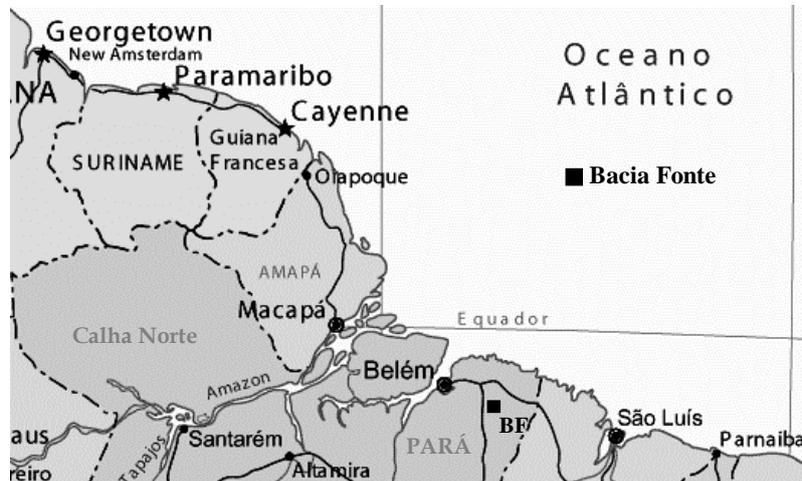


Figura 2 – Localização da pequena bacia hidrográfica fonte

Tabela 1. Estações hidrológicas.

| Tipo de estação | Código ANA | Latitude | Longitude |
|-----------------|------------|------------|-------------|
| Fluviométrica | 31600000 | -1°39'06'' | -47°07'03'' |
| Pluviométrica | 00147016 | -1°33'02'' | -47°07'01'' |

A Figura 3 apresenta respectivamente os hidrogramas observado e simulado (Figura 3(a)); as curvas de permanência observada e simulada (Figura 3(b)) para a bacia fonte. Pela análise do hidrograma, observa-se bem a sazonalidade das vazões na região. Também se observa que o modelo simula melhor as curvas de permanência que os hidrogramas. O que não é prejudicial para o trabalho, já que ele se pauta, principalmente, na avaliação das permanências das vazões que são necessárias ao dimensionamento da produção de energia hidrelétrica pelos igarapés amazônicos.

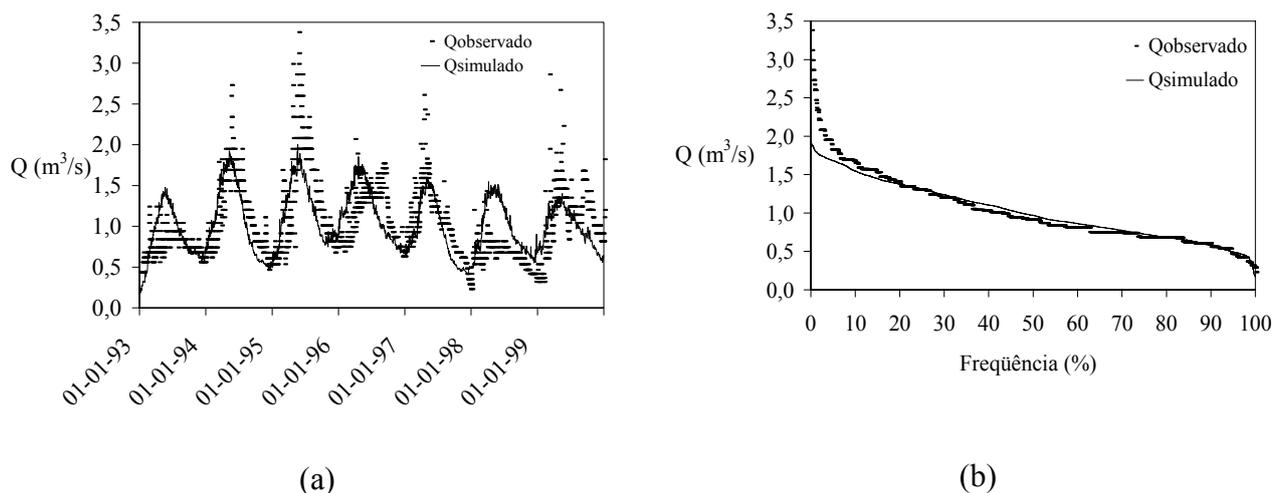


Figura 3 - Hidrogramas e curvas de permanência observados e simulados – Igarapé da Prata.

4.2. Bacias alvos

As bacias alvos estão localizadas no Estado do Pará, na Calha Norte do rio Amazonas (Figura 2). O levantamento de dados foi executado por Mesquita et al. 1999, que visitaram os igarapés apresentados na Tabela 2 com os respectivos municípios, áreas de drenagem (AD) das bacias; alturas de queda (H) dos sítios e códigos das estações pluviométricas.

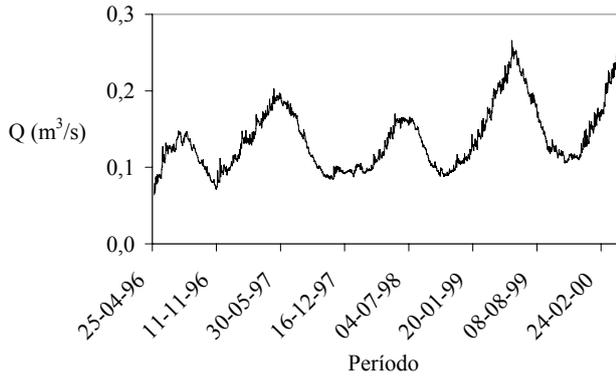
Tabela 2 – Municípios, igarapés, AD, H e códigos ANA

| Município | Igarapé | AD (Km ²) | H (m) | Código ANA |
|--------------|------------------------|-----------------------|-------|------------|
| Monte Alegre | Limão | 11,62 | 4,0 | 154000 |
| Óbidos | Açu | 54,12 | 2,0 | 155001 |
| | Ipixuna | 10,57 | 2,5 | |
| Oriximiná | Jatuarana | 32,09 | 3,0 | 155000 |
| | Cachoeira do Jatuarana | 7,04 | 10,5 | |
| | Poção | 30,27 | 3,0 | |
| Prainha | Jatuarana | 134,0 | 3,5 | 153000 |

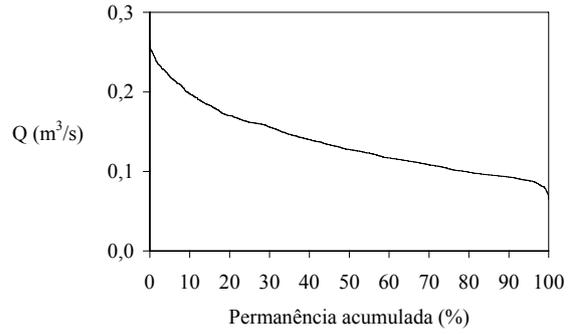
5. RESULTADOS

5.1 Simulação das Vazões e Estimação da Potência Instalada

Das estações pluviométricas, as mais próximas possíveis dos sítios dos igarapés, são extraídos os dados de chuvas, que são utilizados juntamente com as áreas de drenagem para a transposição do modelo (Figura1); visando à simulação das vazões, sob forma de hidrogramas e de curvas de permanência. As Figuras de 4 a 10 apresentam os hidrogramas e as curvas de permanência dos igarapés apresentados na Tabela 2.

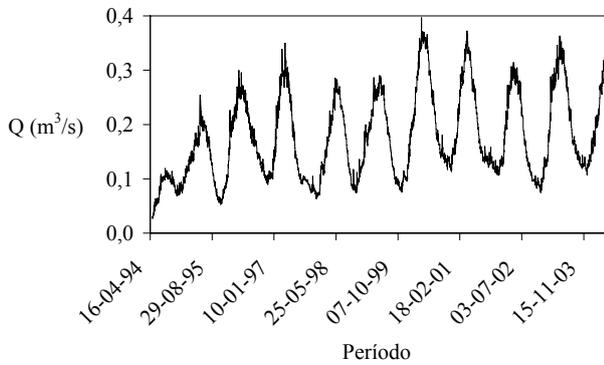


(a)

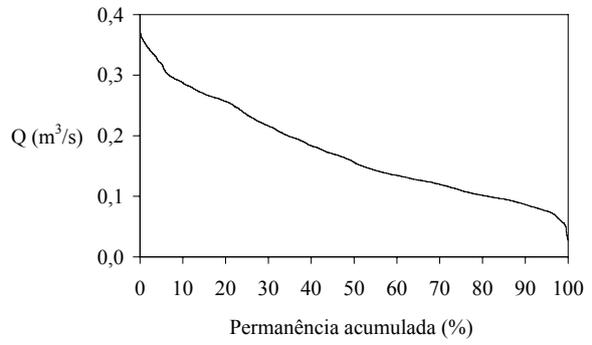


(b)

Figura 4 - Hidrograma e curva de permanência – Igarapé Limão.

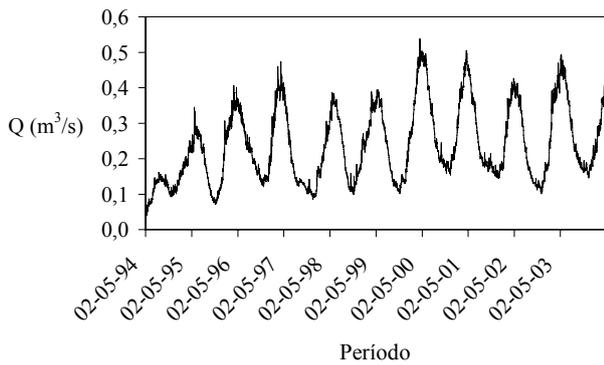


(a)

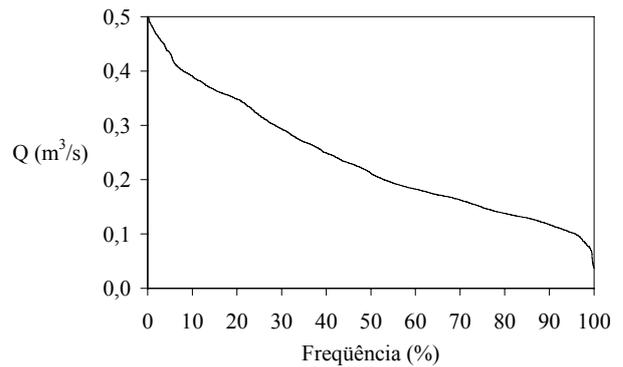


(b)

Figura 5 - Hidrograma e curva de permanência – Igarapé Açú.

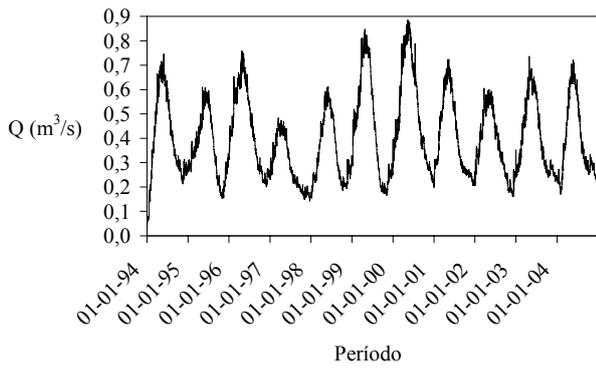


(a)

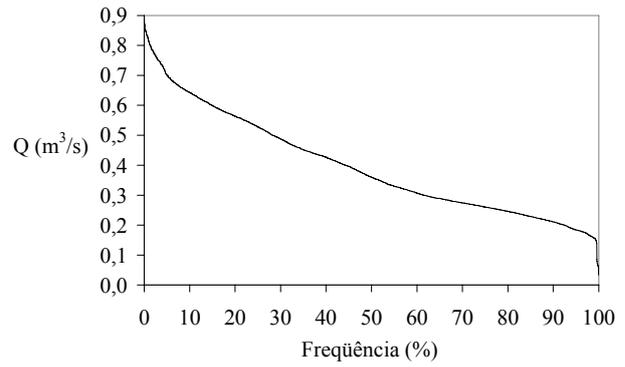


(b)

Figura 6 - Hidrograma e curva de permanência – Igarapé Ipixuna.

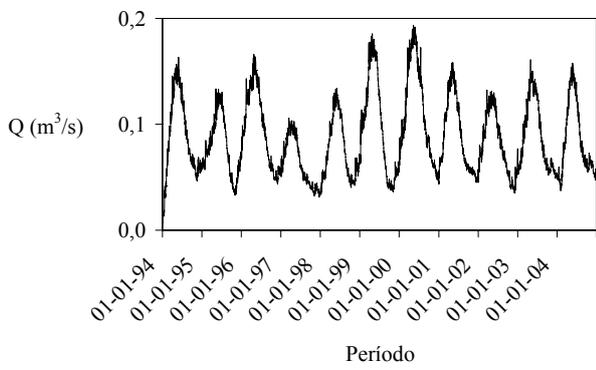


(a)

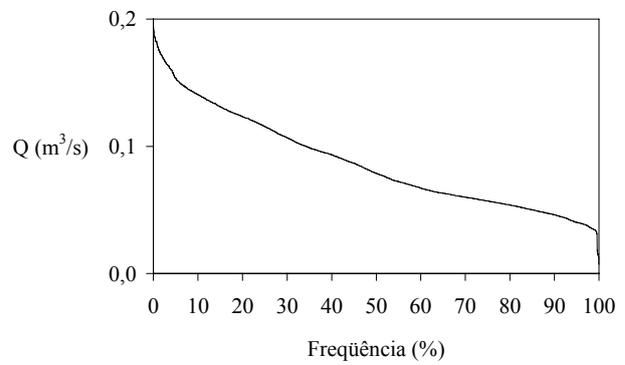


(b)

Figura 7 - Hidrograma e curva de permanência – Igarapé Jatuarana (Oriximiná).

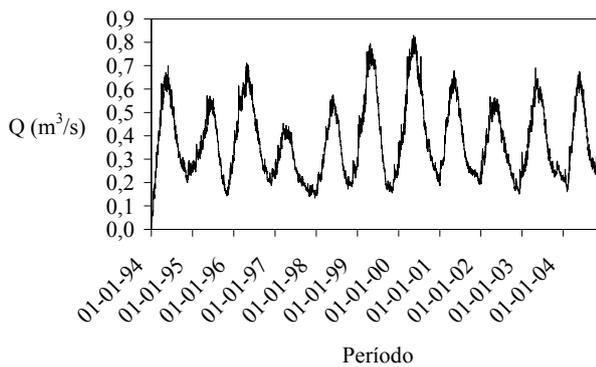


(a)

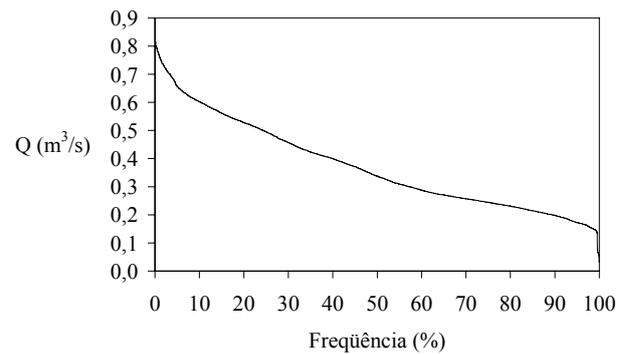


(b)

Figura 8 - Hidrograma e curva de permanência – Cachoeira do Jatuarana.



(a)



(b)

Figura 9 - Hidrograma e curva de permanência – Poção.

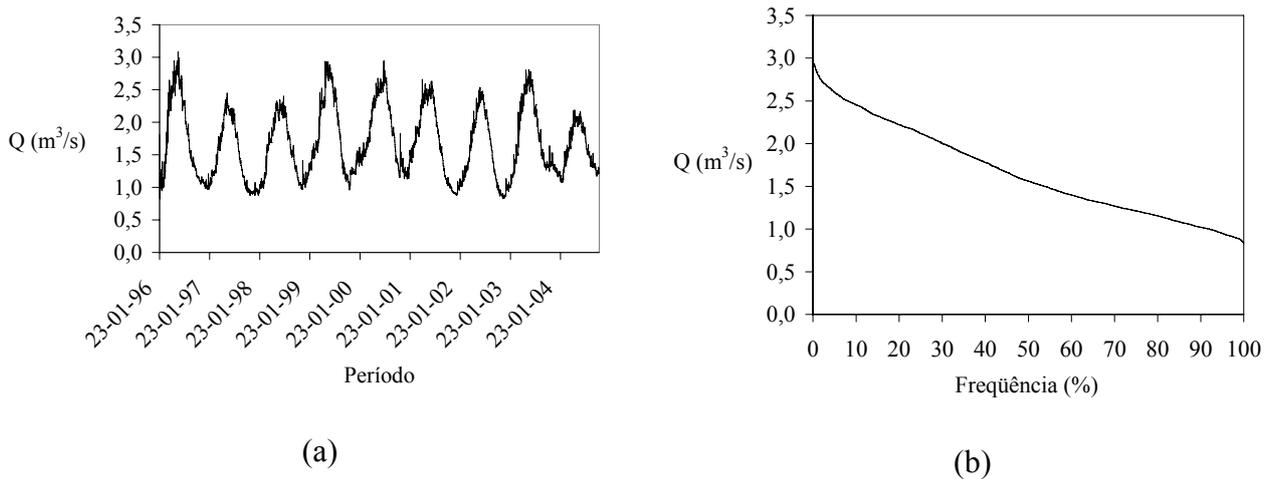


Figura 10 - Hidrograma e curva de permanência – Jatuarana (Prainha).

As curvas de permanência são utilizadas para a determinação das vazões de projeto que juntamente com a altura de queda (Tabela 2) são utilizadas para o dimensionamento das microcentrais através da estimativa da potência instalada do sítio (Equação 7).

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \tag{7}$$

onde, P (W) é a potência, η (-) é o rendimento total da central, ρ (kg/m^3) é a massa específica da água, g (m/s^2) é a gravidade, Q (m^3/s) é a vazão e H (m) é a altura de queda.

A Tabela (3) apresenta as vazões medidas (Q_m) por Mesquita et al. 1999 e as datas; as vazões simuladas (Q_s) e as potências instaladas (P) para cada igarapé, considerando-se $\eta = 0,65$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $Q = Q_{50\%}$, $Q_{75\%}$ e $Q_{95\%}$; e H é igual à altura de queda do sítio (Tabela 2) mais 3 m, que é altura máxima das pequenas barragens para microcentrais hidrelétricas (DNAEE/Eletróbrás, 1985).

Tabela 3 – Igarapés, Q_m , Q_s , $Q_{50\%}$, $Q_{75\%}$, $Q_{95\%}$ e P

| Igarapé | Limão | Açu | Ipixuna | Jatuarana (Oriximiná) | Cach. do Jatuarana | Poção | Jatuarana (Prainha) |
|------------------------|----------|----------|----------|-----------------------|--------------------|----------|---------------------|
| Data | 06/12/98 | 28/07/98 | 28/07/98 | 30/07/98 | 30/07/98 | 11/11/98 | 02/12/98 |
| Q_m (m^3/s) | 0,23 | 0,12 | 0,18 | 0,45 | 0,18 | 0,30 | 1,37 |
| Q_s (m^3/s) | 0,11 | 0,21 | 0,28 | 0,42 | 0,09 | 0,20 | 1,41 |
| $Q_{50\%}$ (m^3/s) | 0,13 | 0,16 | 0,21 | 0,360 | 0,08 | 0,34 | 1,56 |
| P (kW) | 5,7 | 5 | 7,5 | 13,8 | 6,8 | 12,9 | 65 |
| $Q_{75\%}$ (m^3/s) | 0,10 | 0,11 | 0,15 | 0,26 | 0,06 | 0,24 | 1,21 |
| P (kW) | 4,5 | 3,5 | 5,3 | 10,0 | 5,2 | 9,2 | 50 |
| $Q_{95\%}$ (m^3/s) | 0,09 | 0,08 | 0,10 | 0,18 | 0,04 | 0,17 | 0,95 |
| P (kW) | 4,0 | 3,0 | 3,5 | 7,0 | 3,5 | 6,5 | 40 |

Analisando a Tabela 3, observa-se que as vazões simuladas são da mesma ordem de grandeza que as vazões medidas, porém os erros são significativos, exceto para os igarapés

Jatuaranas. Esse resultado já era esperado, visto que o modelo chuva-vazão utilizado, não é o mais adequado para a simulação dos hidrogramas das pequenas bacias (Blanco, 2005). Esse autor também indica a necessidade de dados de vazão destinados à calibração das curvas de permanência das bacias alvos.

A estimação das potências instaladas em função das vazões, $Q_{50\%}$, $Q_{75\%}$ e $Q_{95\%}$, demonstram cenários de geração de energia. No primeiro, considerando-se $Q_{95\%}$, somente os igarapés Jatuaranas e o igarapé Poção apresentam potências consideráveis, particularmente nesse caso, o Igarapé Jatuarana, município de Prainha, apresenta uma potência de 40 kW, que é suficiente para fins de usos domésticos e produtivos em localidades isoladas da Amazônia. No segundo cenário, considerando-se $Q_{75\%}$, os igarapés que não apresentaram potências consideráveis no primeiro cenário, também não o apresentam nesse cenário. No terceiro cenário, considerando-se $Q_{50\%}$, além dos igarapés que apresentaram potências consideráveis no primeiro cenário, o igarapé Ipixuna e a cachoeira Jatuarana apresentam potências para fins, no mínimo, domésticos.

Nota-se que aumentando o valor da vazão de projeto, o que é conseguido pela diminuição da permanência da vazão, o tempo de energia firme produzida também é diminuído, porém isso é considerado normal em sistemas isolados de geração de energia. Todavia, é necessária uma análise de quanto se pode diminuir a permanência da vazão, aumentando com isso a vazão utilizada para estimação da potência instalada, em detrimento ao período de fornecimento de energia. Um procedimento justificável para essa análise é o de se considerar o período de demanda de energia. Por exemplo, se a demanda somente ocorre durante 6 meses do ano, pode-se projetar uma microcentral com $Q_{50\%}$, ou se a demanda ocorre durante 9 meses, a microcentral pode ser projetada com $Q_{75\%}$.

6. CONCLUSÃO

Este estudo permitiu analisar a transposição de um modelo chuva-vazão e a simulação dos hidrogramas e curvas de permanência de sete igarapés amazônicos. A análise dos resultados demonstra que a transposição do modelo é indicada para a simulação das curvas de permanência, porém ela depende de medidas de vazões para a calibração da transposição do modelo. Contudo, como as bacias analisadas não dispõem de dados de vazão, a transposição do modelo serve para a estimação das vazões e conseqüentemente para a estimação das potências instaladas dos sítios analisados.

As potências estimadas revelam que os setes igarapés analisados possuem potenciais hidrelétricos diferenciados que podem servir ao fornecimento de energia de pequenas comunidades isoladas. Esse fornecimento depende da demanda energética e do período da demanda de cada comunidade, pois foram estimadas potências entre 3 e 65 kW, sendo que esses valores dependem das permanências das vazões utilizadas e conseqüentemente do número de meses nos quais elas são ultrapassadas ou no mínimo igualadas.

Assim, dependendo da demanda de energia e do período a ser atendido, os igarapés analisados podem ser utilizados como sítios para instalações de microcentrais hidrelétricas, visando ao fornecimento de energia em regiões isoladas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq o apoio financeiro através de uma bolsa de doutorado, processo 200360/00-0; e à CAPES através de uma bolsa de mestrado, processo 60009357220.

BIBLIOGRAFIA

BLANCO, C. J. C., SECRETAN, Y., FAVRE, A. C. AND SLIVITZKY, M. (2005). “*Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l’Amazonie*”. Canadian Journal of Civil Engineering 32, pp. 803 - 811.

BLANCO, C. J. C, 2005. *Méthodologie pour l’implantation de micro-centrales hydro-électriques en Amazonie dans une perspective de développement durable*. Tese de Ph.D. INRS-ETE. Universidade do Quebec.

DNAEE / ELETROBRÁS. (1985). *Manual de Microcentrais Hidrelétricas*. Brasília.

GORING, D. G. (1984). “*Flood routing by a linear systems analysis technique*”. Journal of Hydrology 69, pp. 59 - 76.

KACHROO, R. K. (1992). “*River flow forecasting. Part 1. A discussion of the principles*”. Journal of Hydrology 133, pp. 1 - 15.

KACHROO, R. K., LIANG, G. C. (1992). “*River flow forecasting. Part 2. Algebraic development of linear modelling techniques*”. Journal of Hydrology 133, pp. 17 - 40.

LABAT, D., ABABOU, R., MANGIN, A. (2000). “*Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: Convolution and spectral analyses*”. Journal of Hydrology 238, pp. 123 - 148.

MESQUITA, A. L. A., BLANCO, C. J. C., LOBATO, R. V. (1999). *Levantamento do potencial energético para a implantação de mini centrais hidrelétricas na região da Calha Norte, Pará*. Relatório FUNTEC 115-00/97.

PADILLA, A., PULIDO-BOSCH, A. (1995). “*Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis*”. *Journal of Hydrology* 168, pp. 73 - 89.

PAPAZAFIRIOU, Z. G. (1976). “*Linear and nonlinear approaches for short-term runoff estimations in time-invariant open hydrologic systems*”. *Journal of Hydrology* 30, pp. 63 - 80.

RODRIGUEZ, I. (1967). “*The application of cross-spectral analysis to hydrologic time series*”. *Hydrology Papers*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 24.

SHERMAN, L. K. (1932). “*Streamflow from rainfall by the unit-graph method*”. *Engineering News-Record* 108, pp. 501 - 505.

A CGH obteve financiamento do CNPq para a aquisição do grupo turbina-gerador-regulador de velocidade, para os levantamentos de campo e estudos de definição do tipo da central mais adaptada à região. Atualmente a CGH conta com financiamento do Ministério de Minas e Energia para finalização do projeto de engenharia e para a obra civil do empreendimento.



Figura 20 – Placa na Transamazônica indicando a Vila sucupira.

Ela deverá suprir as necessidades energéticas da unidade de processamento de frutas (Figura 21), a qual tem como produto principal a farinha de banana (Figura 22).



Figura 21 – Pequena indústria de beneficiamento de frutas – Vila sucupira – Anapú/PA.



Figura 22 – Farinha de banana produzida pela unidade de processamento de frutas.

4.2. Avaliações Preliminares, levantamento de campo e topografia

A Figura 23 apresenta uma imagem de satélite do terreno onde está sendo implantada a CGH irmã Dorothy, nela se destacam o rio Anapú, o igarapé São João (afluente do rio Anapú), o local da barragem e a vila de Sucupira. Através da figura, foi estimada a distância do local da barragem à pequena comunidade de Vila Sucupira, sendo a mesma em torno de 3 Km.

Em visita ao sítio hidrológico, observou-se a abundância de pedras (Figura 24), que podem ser utilizadas na construção da barragem, da casa de força e da tomada d'água da CGH. A figura revela também a presença de uma pequena quantidade de areia, mas que demonstra a existência de jazidas do material próximo ao local, além de barro, conforme relato dos avaliadores de campo.



Figura 23 – Imagem de satélite mostrando o local da barragem (adaptado de Google 2006).



Figura 24 – Foto do local da barragem com pedras e areia.

A medida da vazão do igarapé através do método do flutuador deu-se em 18/04/1998, período de cheia da região, ou seja, um período favorável a produção hidrelétrica. A vazão foi de $11,4 \text{ m}^3/\text{s}$. No mesmo dia mediu-se através de teodolito, a queda bruta do sítio, a qual é de

3,42 m. Assim, aplicando-se a Eq. (2) com $\eta = 0,65$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, tem-se uma potência instalada de aproximadamente 250 kW, é claro que no período de estiagem a vazão cai bastante e conseqüentemente a potência também cai. Entretanto, o resultado acima, motivou uma análise hidrológica mais detalhada do regime de vazões do igarapé São João, principalmente a determinação da curva de permanência visando fins de produção hidrelétrica.

O Igarapé São João possui as seguintes coordenadas geográficas, latitude $03^{\circ} 21' 11''$ e longitude: $51^{\circ} 17' 53''$, estes dados foram extraídos do seguinte mapa, ANAPU – MI – 596, com uma escala de 1:100.000, fornecido pelo IBGE.

Próximo ao Igarapé São João existe uma estação pluviométrica localizada na Granja Gazela, município de Portel, que possui as seguintes coordenadas geográficas, latitude: $03^{\circ} 25' 00''$ e longitude: $51^{\circ} 15' 15''$, estes dados foram extraídos do Hidroweb da ANA, neste sistema a estação tem o código 00351000. Devido a proximidade entre o Igarapé São João e a Granja Gazela os dados pluviométricos desta estação serão usados para simular as vazões do Igarapé São João.

A Figura 25 apresenta um mapa ilustrativo da região da localidade de Vila Sucupira que está localizada no município de Anapú, Estado do Pará. Apresenta-se também a localização da barragem no Igarapé São João, do posto pluviométrico da Granja Gazela e parte da rodovia Transamazônica. Bem como, a área de drenagem relativa ao posicionamento da CGH irmã Dorothy. A Figura 25 foi obtida com base no mapa fornecido pelo IBGE e a partir dela foram calculados os seguintes dados físicos:

Área de drenagem, $A_d = 133,75 \text{ km}^2$;

Comprimento do igarapé São João até o local da barragem, $L = 21,0 \text{ km}$;

Desnível da bacia até o local da barragem, $H_p = 35,0 \text{ m}$.

Estes dados físicos são necessários ao estudo hidrológico da bacia.

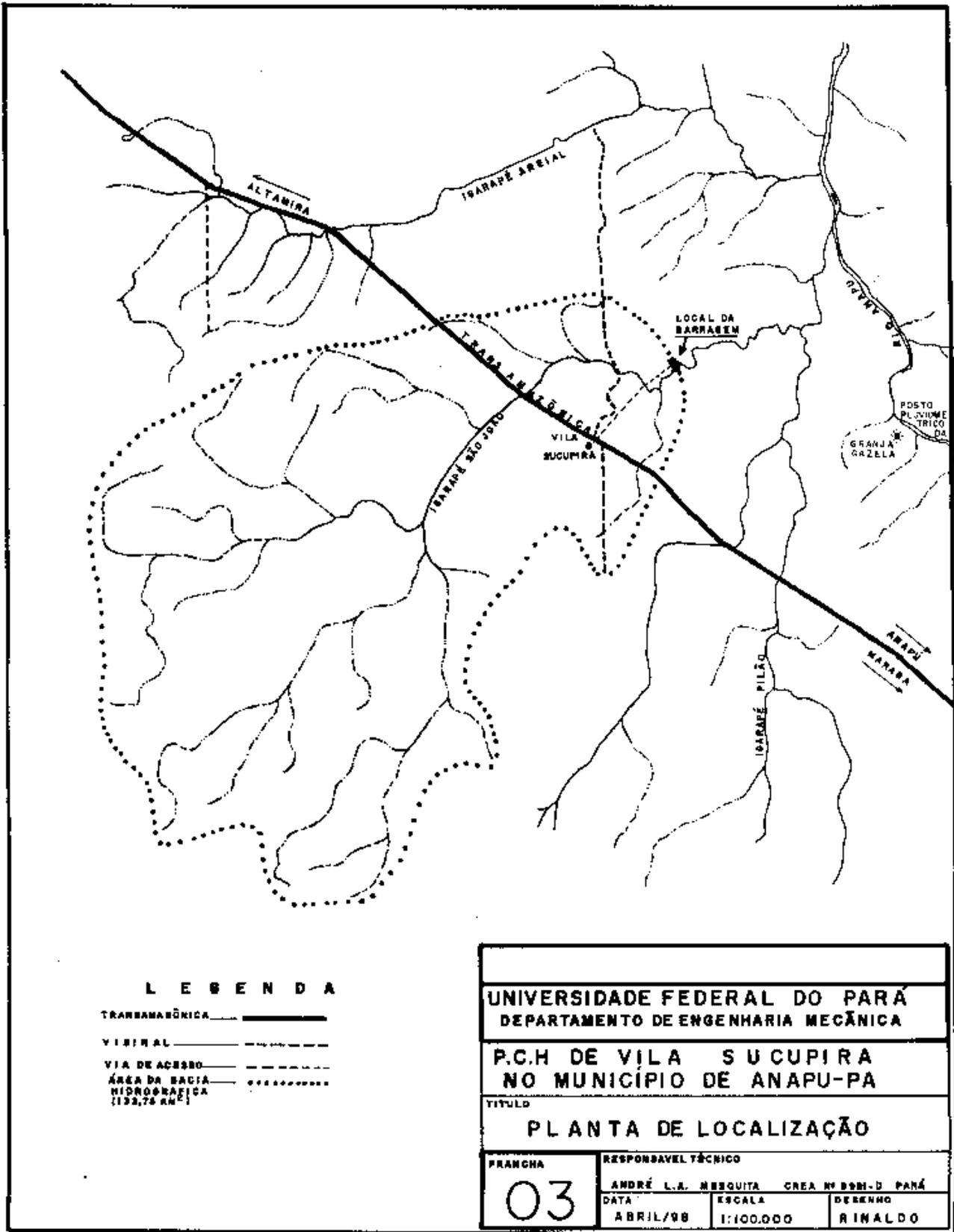


Figura 25 – Planta de localização da CGH irmã Dorothy destacando a área de drenagem.

4.3. Aspectos Hidrológicos do Igarapé São João

4.3.1. Introdução

O principal objetivo da análise dos aspectos hidrológicos da bacia hidrográfica do igarapé São João é a simulação das vazões em função dos dados de chuva da estação pluviométrica Granja Gazela, pois ela é a mais próxima, com dados, do local da barragem. A Tabela 3 apresenta os totais pluviométricos mensais aos quais são aplicados o modelo **I-PAI-WU** (Giasante, 1999). A transposição do modelo chuva-vazão de Blanco *et al.*, 2005 não foi aplicada pela falta de dados de vazão necessários à calibração.

Tabela 3 - Totais Pluviométricos Mensais.

| | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1978 | 424,0 | 310,6 | 563,0 | 372,4 | 413,3 | 120,5 | 49,2 | 19,7 | 12,6 | 69,1 | 18,8 | 321,7 |
| 1979 | 395,4 | 331,0 | 303,9 | 223,8 | 146,5 | 39,2 | 22,3 | 49,7 | 87,7 | 251,3 | 108,2 | 212,8 |
| 1980 | 365,0 | 340,6 | 314,7 | 358,1 | 166,3 | 21,4 | 60,2 | 31,3 | 2,4 | 18,6 | 74,6 | 164,6 |
| 1981 | 577,2 | 199,6 | 202,3 | 107,7 | 88,5 | 37,3 | 18,3 | 28,1 | 10,2 | 44,8 | 79,5 | 167,7 |
| 1982 | 567,9 | 339,2 | 252,3 | 432,4 | 193,6 | 61,1 | 7,5 | 17,9 | 6,1 | 35,1 | 6,7 | 91,2 |
| 1983 | 116,7 | 230,5 | 376,0 | 230,1 | 69,9 | 41,7 | 10,3 | 1,0 | 3,3 | 70,5 | 49,0 | 175,0 |
| 1984 | 300,9 | 542,2 | 712,8 | 420,2 | 33,5 | 70,9 | 70,5 | 72,0 | 19,8 | 57,9 | 82,2 | 194,9 |
| 1985 | 414,8 | 513,9 | 287,7 | 255,3 | 242,8 | 126,8 | 32,9 | 50,6 | 8,8 | 140,6 | 82,1 | 349,3 |
| 1986 | 241,0 | 368,5 | 501,1 | 595,8 | 124,3 | 174,4 | 59,7 | 0,0 | 20,4 | 100,7 | 177,0 | 319,0 |
| 1987 | 132,5 | 232,3 | 240,4 | 361,4 | 171,5 | 53,6 | 7,0 | 26,5 | 12,7 | 43,0 | 0,0 | 199,0 |
| 1988 | 324,1 | 586,4 | 325,0 | 470,5 | 352,1 | 157,8 | 51,6 | 0,0 | 41,3 | 6,0 | 107,2 | 153,4 |
| 1993 | 335,0 | 531,5 | 295,9 | 388,5 | 226,8 | 70,9 | 61,5 | 16,7 | 29,0 | 25,3 | 143,0 | 264,5 |
| 1994 | 372,6 | 599,1 | 815,7 | 433,4 | 314,4 | 186,5 | 100,3 | 116,3 | 23,6 | 64,8 | 46,4 | 55,3 |
| 1995 | 105,2 | 59,3 | 136,1 | 377,2 | 350,6 | 307,6 | 52,7 | 16,0 | 0,0 | 86,5 | 56,1 | 81,7 |
| 1996 | 391,5 | 432,7 | 338,9 | 445,6 | 186,3 | 15,4 | 59,3 | 20,4 | 5,3 | 25,4 | 149,5 | 68,6 |
| 1997 | 243,7 | 241,8 | 499,9 | 227,4 | 115,9 | 0,0 | 8,6 | 30,4 | 0,0 | 48,0 | 105,8 | 139,2 |

A Figura 26 apresenta os dados da tabela anterior sob forma de curvas, incluindo a curva do total pluviométrico médio.

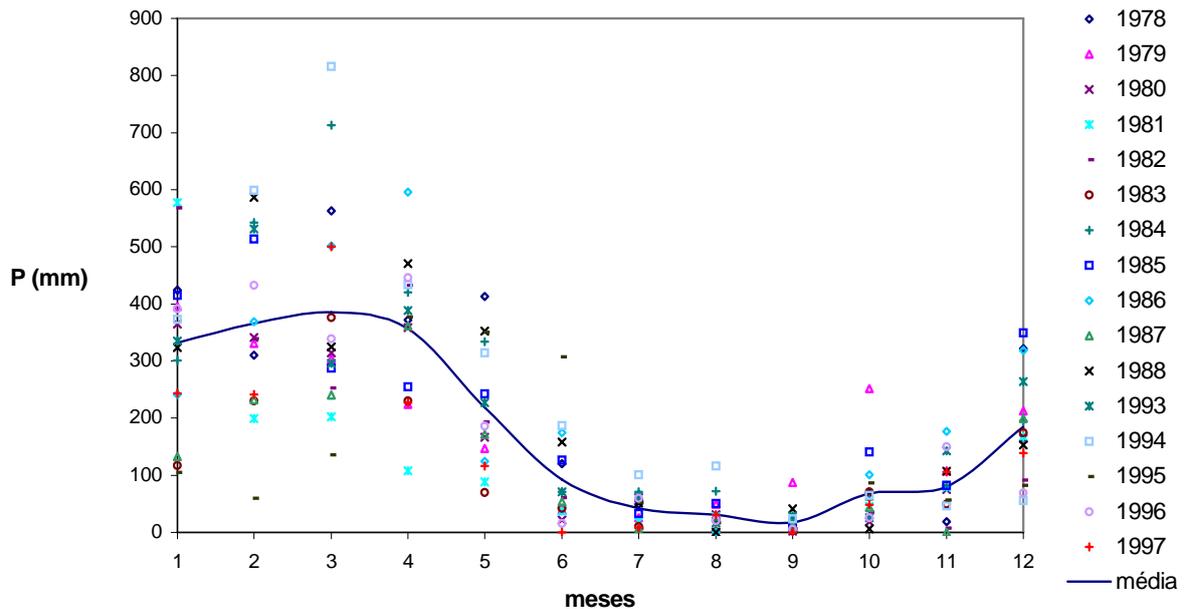


Figura 26 – Totais pluviométricos mensais e médio registrados na granja Gazela.

4.3.2. Modelo I-PAI-WU

Este modelo constitui um aprimoramento do modelo racional (Tucci, 1997). Ele tem sido aplicado em bacias com áreas de drenagem de até 200 km² (Giasante, 1999) e sem limitações quanto ao período de retorno. O modelo racional apesar de ser mais utilizado e aceito em bacias pequenas e pouco complexas, permite aperfeiçoamentos efetuados por meio de análise e considerações de diversos fatores intervenientes, como os efetuados pelo I-PAI-WU. Os fatores adicionais referem-se ao armazenamento na bacia, à distribuição da chuva e à forma da bacia. A aplicação deste modelo, levando em conta esses parâmetros adicionais, torna-se mais adequada na medida em que estes exercem um papel importante no desenvolvimento de uma cheia para as bacias de maior área de drenagem e mais complexas. O modelo I-PAI-WU também pode ser usado para previsão de vazão e é indicado quando não se dispõe de dados fluviométricos, nem de posto próximo, e até mesmo da região em estudo.

A equação matemática para aplicação do modelo é similar e provém do modelo racional,

$$Q_p = 0,278 C I A_d^n k \tag{12}$$

Onde:

Q_p = vazão de pico de cheia (m^3/s);

C = Coeficiente de escoamento superficial (-);

I = intensidade da chuva (mm/h);

A_d = área de drenagem (km^2);

n = coeficiente redutor relativo ao efeito de armazenamento na bacia (-);

k = coeficiente de distribuição espacial da chuva (-).

Após o início de uma precipitação, o escoamento superficial direto é o maior responsável pelo acréscimo de vazão, efeito que vai cessando após o término da chuva. O modelo I-PAI-WU considera os efeitos mencionados e descritos a seguir na atenuação da vazão de pico de cheia, que é a vazão máxima procurada.

Efeito da Distribuição de Chuva

A desigualdade de distribuição das chuvas na bacia é levada em conta mediante a aplicação de um coeficiente (k) de distribuição de chuvas, obtido da Figura 4.8. O seu valor tende a 1 (ou 100%) quando as bacias são muito pequenas, de forma que é desprezível este fenômeno. Porém, nas maiores bacias, raras são as precipitações homogeneamente distribuídas, este fato é de grande relevância na admissão do coeficiente k .

A determinação da intensidade de precipitação é feita de modo igual ao utilizado no modelo racional (Tucci, 1997).

Efeito de Armazenamento

O efeito do armazenamento de água na bacia ocorre em pontos localizados na superfície da bacia, como depressões, por exemplo. É levado em conta por meio de um expoente redutor (n) aplicado sobre o parâmetro área de drenagem da bacia. Adota-se usualmente $n = 0,9$ (Giansante, 1999).

Efeito da Forma da bacia

Quando duas bacias de mesma área possuem formas diferentes, uma mais alongada e a outra mais arredondada, por exemplo, os respectivos perímetros também o são. Nas bacias arredondadas, o escoamento superficial é proveniente de vários pontos da bacia no mesmo instante no exutório, dado que as distâncias percorridas têm as mesmas ordem de grandeza. Nas mais alongadas não ocorre o mesmo fenômeno, porque após a passagem da contribuição das áreas mais próximas ao exutório, um tempo significativo vai decorrer até que chegue a

contribuição das áreas mais distantes. Portanto, as bacias mais arredondadas tendem a ter um pico de cheia mais acentuado do que as alongadas.

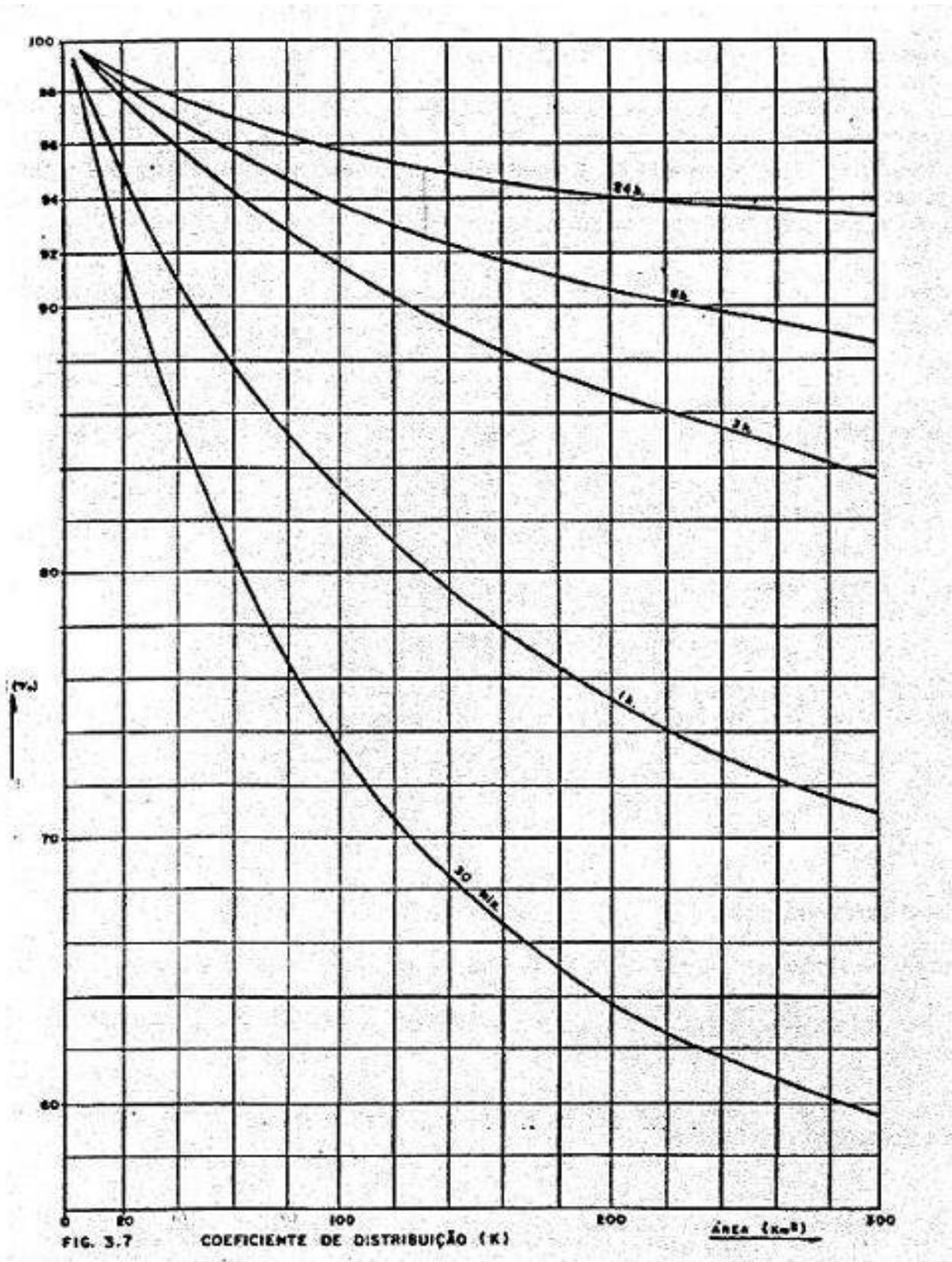


Figura 27 – Coeficiente de distribuição de chuva, k.

Esse fenômeno é considerado por meio do fator de forma que é dado pela expressão abaixo,

$$F = \frac{L}{2\sqrt{\frac{A}{\pi}}} \quad (13)$$

Onde:

L = Comprimento do talvegue do rio (km);

A = área da bacia de contribuição, (km²).

O fator de forma relaciona a forma real da bacia com um círculo de mesma área. É utilizado porque uma bacia perfeitamente circular teria o maior pico de cheia, isto é, a maior vazão máxima, quando comparada com outras bacias de mesma área, mas de formas diferentes. Mede então, a taxa de alongamento da bacia, de maneira que se esta fosse exatamente circular ter-se-ia $F = 1$.

A consideração dos fatores analisados anteriormente, aprimora este modelo de várias maneiras. O efeito da forma, por exemplo, é introduzido no cálculo do coeficiente de escoamento superficial e o da distribuição da chuva por meio do coeficiente k (Figura 27).

Coefficiente de escoamento Superficial

No presente modelo esse coeficiente é dado por:

$$C = f \frac{C_2}{C_1} \quad (14)$$

Onde:

$$f = \frac{2}{1+F} \quad (15)$$

C_2 = coeficiente de deflúvio ou escoamento superficial do modelo racional.

$$C_1 = \frac{4}{2+F} \quad (16)$$

Vazão de Projeto

Considerando esses parâmetros adicionais para o cálculo da vazão de pico, Q_p (Eq. 17) e somando-se esta à vazão de base, Q_b (Eq. 19) suposta como sendo da ordem de 10% da vazão de pico, obtém-se a vazão máxima de cheia, Q (Eqs. 18 e 20).

$$Q_p = 0,278 C I A_d^n k \quad (17)$$

Sendo:

$$Q = Q_b + Q_p \quad (18)$$

$$Q_b = 0,10 Q_p \quad (19)$$

Resulta em:

$$Q = 1,1 Q_p \quad (20)$$

Onde:

Q_p = vazão de pico de cheia (m^3/s).

Q_b = vazão de base (m^3/s).

Q = vazão máxima de cheia (m^3/s).

Assim, o modelo I-PAI-WU foi utilizado na simulação das vazões do Igarapé São João, já que a bacia em estudo possui $133,75 \text{ km}^2$ e este modelo é indicado para bacias com tais dimensões. O C_d é definido pelo modelo racional (Tucci, 1997).

A Figura 28 apresenta as vazões simuladas para cada ano, bem como a vazão média do Igarapé São João. Mostra-se também o valor da vazão medida em 18/04/1998, da vazão simulada para o mês de abril de 1997 e da vazão média simulada entre os anos de 1978 e 1997. Estes valores são comparados e percebe-se que a vazão simulada para o mês de abril de 1997, $4,5 \text{ m}^3/s$, é cerca de 60% menor do que a vazão medida em abril de 1998, $11,4 \text{ m}^3/s$, e o valor médio simulado para este mês, $7,08 \text{ m}^3/s$, também se mostra menor, porém cerca de 40%. Apesar dessas diferenças, observa-se que o valor medido em abril de 1998 é próximo ao valor simulado para abril de 1986, mostrando que o hidrograma simulado não está disvinculado da vazão medida.

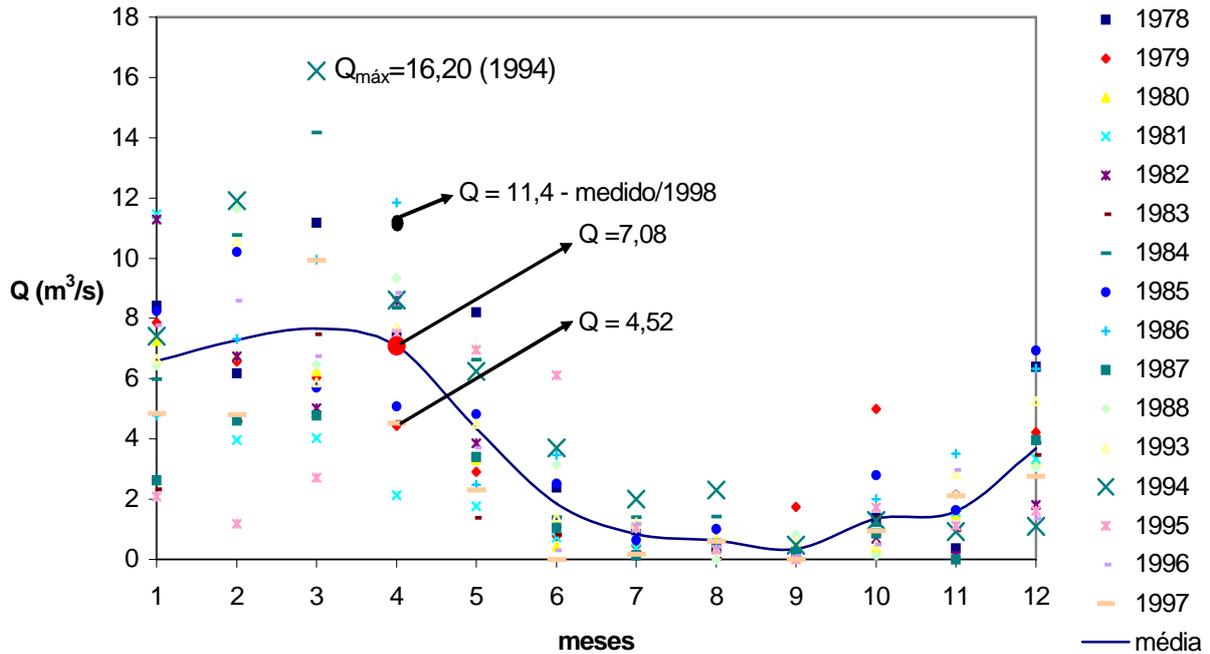


Figura 28 – Hidrograma simulado do igarapé São João.

4.3.3. Modelo Hidrodinâmico

Com o intuito de se avaliar o resultado de vazão máxima simulada com o modelo I-PAI-WU e de defini-la para o dimensionamento do vertedouro da CGH, lançou-se mão de um modelo hidrodinâmico que relaciona a vazão com o N.A. observado, quando estes são medidos simultaneamente.

Avaliação Expedida da Curva – Chave

O caso mais crítico, em que não se dispõem de dados da região, nem pluviométricos, nem fluviométricos, dever-se requerer obviamente uma avaliação expedida da vazão a ser admitida no projeto. Este caso deverá abranger, em especial, algumas regiões da Amazônia (DNAEE/Eletróbrás, 1985). Recomenda-se o seguinte procedimento para obtenção da curva-chave:

- Realizar uma ou mais medições de descarga durante o período de estiagem, de forma a se estimar a descarga mínima do curso d'água;
- Realizar uma ou mais medições de descarga e correspondente declividade na seção de medição fora do período de estiagem, visando a construção de uma curva-chave, indiretamente;

- Através de informações e observações locais, levantar marcas de níveis das maiores secas e cheias acontecidas na seção de medição;
- A partir das medições de descarga líquida, e da declividade, efetuadas simultaneamente, adicionadas a área e ao perímetro da seção de medida, o coeficiente de rugosidade de Manning é calculado através da seguinte expressão matemática:

$$n = \frac{A^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{QP^{\frac{2}{3}}} \quad (21)$$

onde:

n = coeficiente de rugosidade de Manning ($s/m^{1/3}$);

A = área da seção transversal de medição (m^2);

P = perímetro da seção transversal de medição (m);

Q = descarga líquida (m^3/s).

- Conhecido o fator de rugosidade, e com a seção topo-batimétrica levantada durante a medição de descarga, são atribuídos diversos níveis para os quais são encontrados novas áreas e perímetros. Daí, então, utiliza-se a mesma fórmula para se encontrar as vazões correspondentes a esses níveis, dada por:

$$Q = \frac{A^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{nP^{\frac{2}{3}}} \quad (22)$$

- Uma vez definidos, os pares $Q \times N.A.$, eles são plotados de forma a definir a curva-chave. Nesta curva, são plotados os níveis. $N.A_{\min, \text{ obs}}$, $N.A_{\max, \text{ obs}}$, obtendo-se as vazões correspondentes.

Através do modelo Hidrodinâmico, exposto anteriormente, pode-se calcular o coeficiente de Manning do local da CGH do Igarapé São João, já que se possui uma medida de vazão feita no dia 18/04/1998. No mesmo dia foi levantada a seção topo-batimétrica que está apresentada na Figura 29, juntamente com a seção do dia 26/11/1998 e da seção correspondente ao $N.A_{\max, \text{ obs}}$, 01/01/1997.

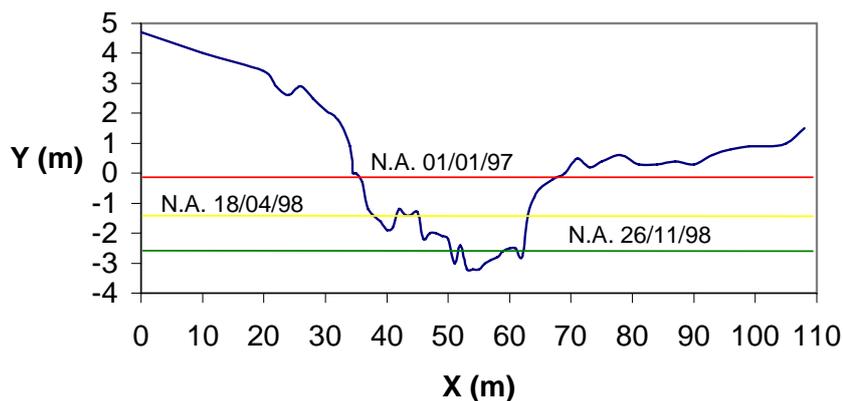


Figura 29 – Seções topo-batimétricas - Igarapé São João.

Através da seção topo-batimétrica do dia 18/04/1998, foi possível calcular a área e o perímetro da mesma. As cotas a montante e jusante da seção, necessárias ao cálculo da declividade, foram medidas através de uma régua e a medida da distância entre estes dois pontos foi feita através de uma trena. Os valores da vazão, declividade, área e perímetro da seção topobatimétrica do Igarapé São João no dia 18/04/1998, são apresentados a seguir:

$$Q = 11,14 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = 7,61 \times 10^{-3}$$

$$A = 23,68 \text{ m}^2$$

$$P = 37,80 \text{ m}$$

Cálculo do Coeficiente Manning

Substituindo-se os valores de Q, S, A e P na Eq. (21), obtém-se o seguinte valor para o coeficiente de Manning,

$$n = 0,14$$

A Tabela 4 apresenta os valores do coeficiente de Manning em função da cobertura da bacia (Tucci, 1997). O valor do coeficiente de Manning encontrado para a bacia do Igarapé São João está entre uma bacia com pouca vegetação e vegetação densa, pelo valor de 0,14, a cobertura da bacia está mais para ser de vegetação densa, o que, ainda, é comum no Estado do Pará.

Tabela 4 - Valores do coeficiente de Manning.

| Cobertura da bacia | n |
|----------------------------|-------|
| Asfalto suave | 0,012 |
| Asfalto ou concreto | 0,014 |
| Argila compactada | 0,030 |
| Pouca vegetação | 0,020 |
| Vegetação densa | 0,350 |
| Vegetação densa e floresta | 0,400 |

Determinação da Curva-Chave

Com o fator de Manning determinado, as áreas e os perímetros das outras seções topobatimétricas calculados através da Figura 29, pode-se calcular as vazões correspondentes aos N.A. das outras seções (Tabela 5).

Tabela 5 – Pares de Q e N.A. para o igarapé São João.

| Data | N.A. (m) | P (m) | A (m ²) | Q (m ³ /s) |
|----------|----------|-------|---------------------|-----------------------|
| 18/04/98 | 1,85 | 37,8 | 23,7 | 11,4 |
| 26/11/98 | 0,80 | 17,0 | 6,50 | 2,17 |
| 01/01/97 | 3,15 | 72,0 | 63,0 | 36,97 |

Observando-se a tabela 5 percebe-se que, tanto o valor de $N.A._{max, obs} = 3,15$ m, quanto o valor $N.A._{min, obs} = 0,80$ m, são valores provenientes de informações da comunidade local.

Com base nos dados apresentados na tabela anterior foi possível traçar a Curva-Chave para o igarapé São João, a qual é apresentada na Figura 30.

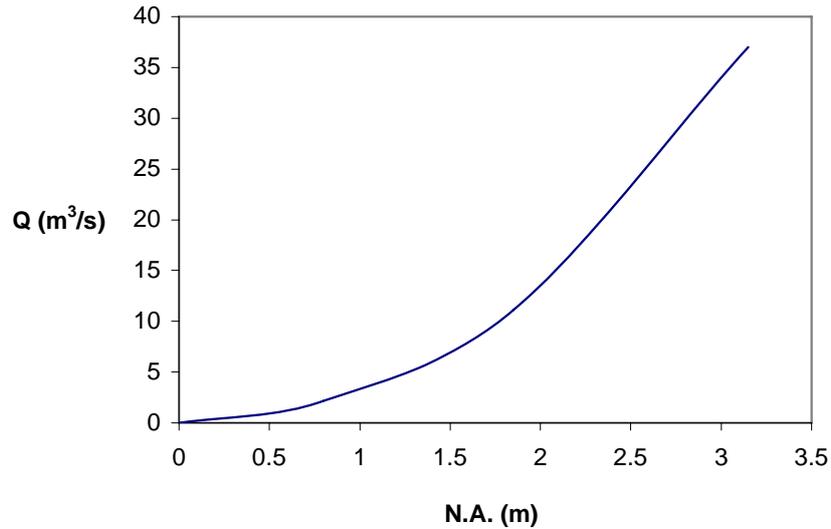


Figura 30 – Curva-Chave do Igarapé São João.

4.3.4. Determinação da Curva de Permanência

A partir das simulações de vazão feitas através do modelo I-PAI-WU, já que o mesmo é o mais indicado para bacias de até 200 km², foi possível determinar a curva de permanência para o igarapé São João (Figura 31).

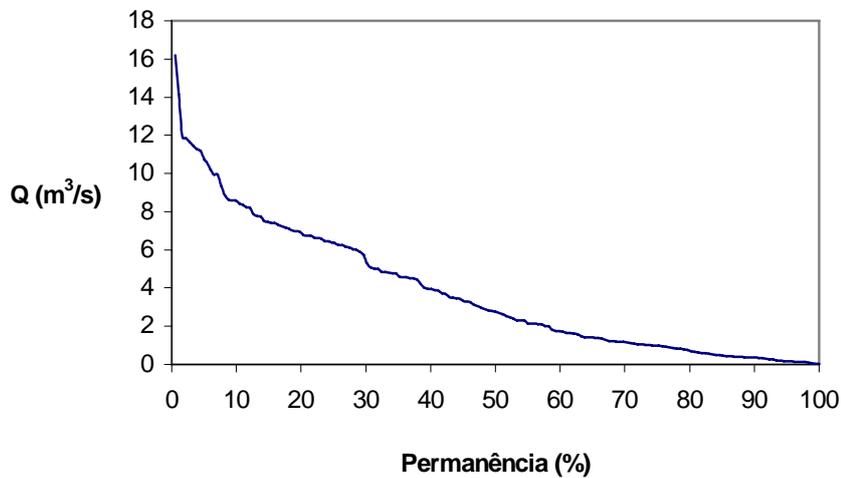


Figura 31 – Curva de Permanência do Igarapé São João.

Com as ferramentas hidrológicas (hidrograma, curva-chave e curva de permanência), determinadas para o igarapé São João, pode-se analisar os aspectos tecnológicos e energéticos da CGH irmã Dorothy.

4.4. Aspectos Tecnológicos e Energéticos

4.4.1. Software TURBNPRO aplicado à CGH Irmã Dorothy

Para previsão de comportamento e características de desempenho da turbina axial a ser implantada em Anapú, utilizou-se o software Turbnpro. O software necessita de dados da curva de permanência e de topografia (Figura 32), os quais foram levantados no estudo em questão.

| | | |
|---|-------------------------------------|--------|
| Vazão Nominal | <input type="text" value="1.8000"/> | Limits |
| Queda Líquida | <input type="text" value="3.2700"/> | Limits |
| Queda bruta | <input type="text" value="3.4200"/> | Limits |
| Altura em relação ao nível do mar | <input type="text" value="0.0000"/> | Limits |
| Temperatura | <input type="text" value="25"/> | Limits |
| Altura do eixo da turbina em relação a jusante | <input type="text" value="1.8900"/> | Limits |
| Prioridade de eficiência para máxima vazão | <input type="text" value="5"/> | Limits |
| Razão entre a queda de projeto e a queda de eficiência máxima | <input type="text" value="0.9000"/> | Limits |
| Frequência do sistema | <input type="text" value="60"/> | Limits |
| Mínima altura líquida | <input type="text" value="1.9300"/> | Limits |

Figura 32 – Dados Iniciais TURBNPRO.

O software fornece as possíveis soluções em relação à geometria da turbina (Figura 33). No caso da CGH irmã Dorothy foi selecionada a solução 7.

| Solution Number | Runner Diameter Millimeters | Runner Diameter Inches | Unit Speed rpm | Specific Speed NS | Centerline Setting meters |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|----------------|-------------------|---------------------------|
| 1 | 653 | 25.7 | 514.3 | 847 | 3.7 |
| 2 | 687 | 27.0 | 450.0 | 741 | 5.0 |
| 3 | 722 | 28.4 | 400.0 | 659 | 5.9 |
| 4 | 756 | 29.8 | 360.0 | 593 | 6.7 |
| 5 | 790 | 31.1 | 327.3 | 539 | 7.2 |
| 6 | 824 | 32.4 | 300.0 | 494 | 7.7 |
| 7 | 858 | 33.8 | 276.9 | 456 | 8.1 |
| 8 | 892 | 35.1 | 257.1 | 423 | 8.4 |
| 9 | 926 | 36.5 | 240.0 | 395 | 8.6 |
| 10 | 961 | 37.8 | 225.0 | 370 | 8.8 |

Preliminary Output: KW

Enter Size Selection:

Figura 33 – Soluções Possíveis do TURBNPRO.

Para finalizar as configurações da turbina, o programa fornece a caixa de diálogo (Figura 34) para definição do arranjo da turbina. No caso da CGH irmã Dorothy, tem-se uma turbi-

na axial do tipo tubular, com eixo horizontal de pás do rotor e distribuidor fixos. O software não fornece opção para pás e distribuidor fixos, desta forma definiu-se a simulação com regulação somente do distribuidor.

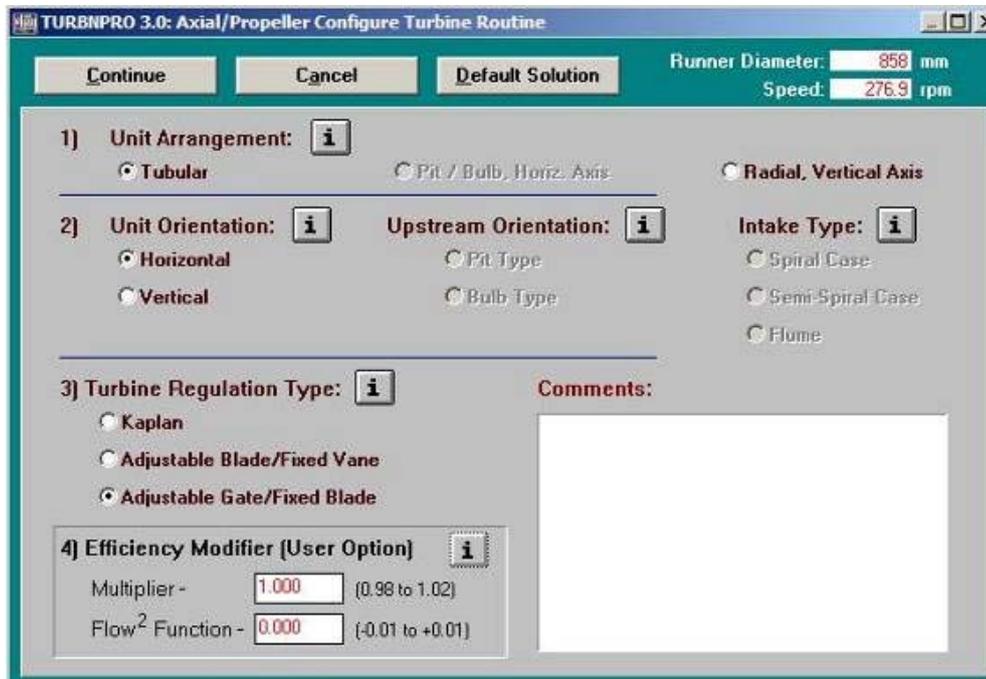


Figura 34 – Caixa de diálogo para definição tipo de turbina.

A Figura 35 ilustra o arranjo da turbina selecionada com medidas globais calculadas pelo software.

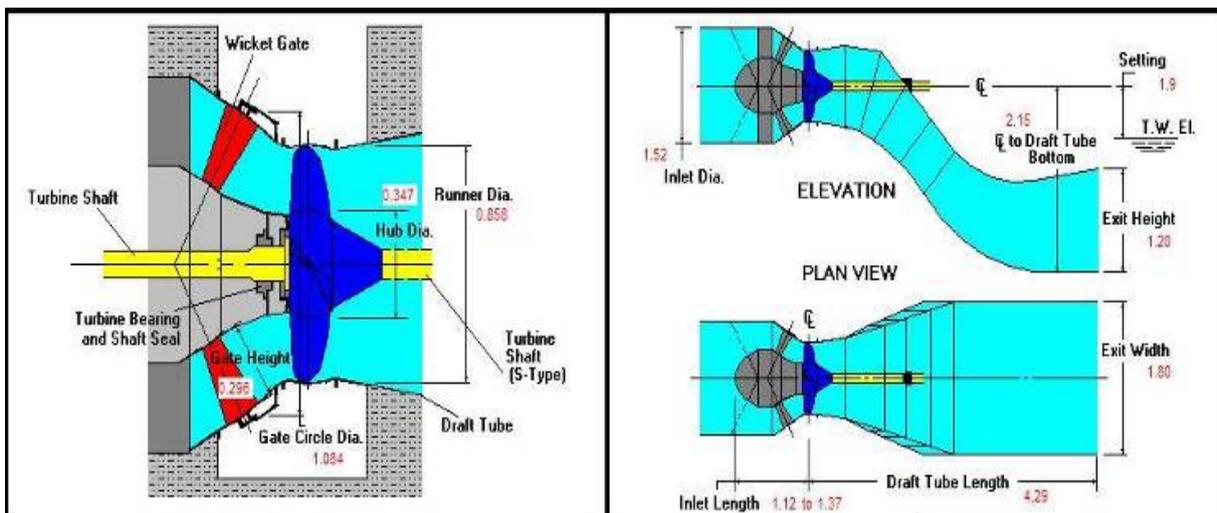


Figura 35 – Arranjo da Turbina.

A Figura 36 ilustra as faixas de operação da turbina axial, relacionando as potências com respectivas eficiências e vazões. O software aponta a condição onde é possível melhor rendimento de operação. O projeto corresponde à permanência de 60%, definido após o término de estudos topográficos e hidrológicos da região, associado a características da turbina,

definindo desta forma a faixa de operação para atendimento energético que absorva as sazonalidades. Percebe-se que o software relaciona a condição de melhor eficiência a uma vazão de $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

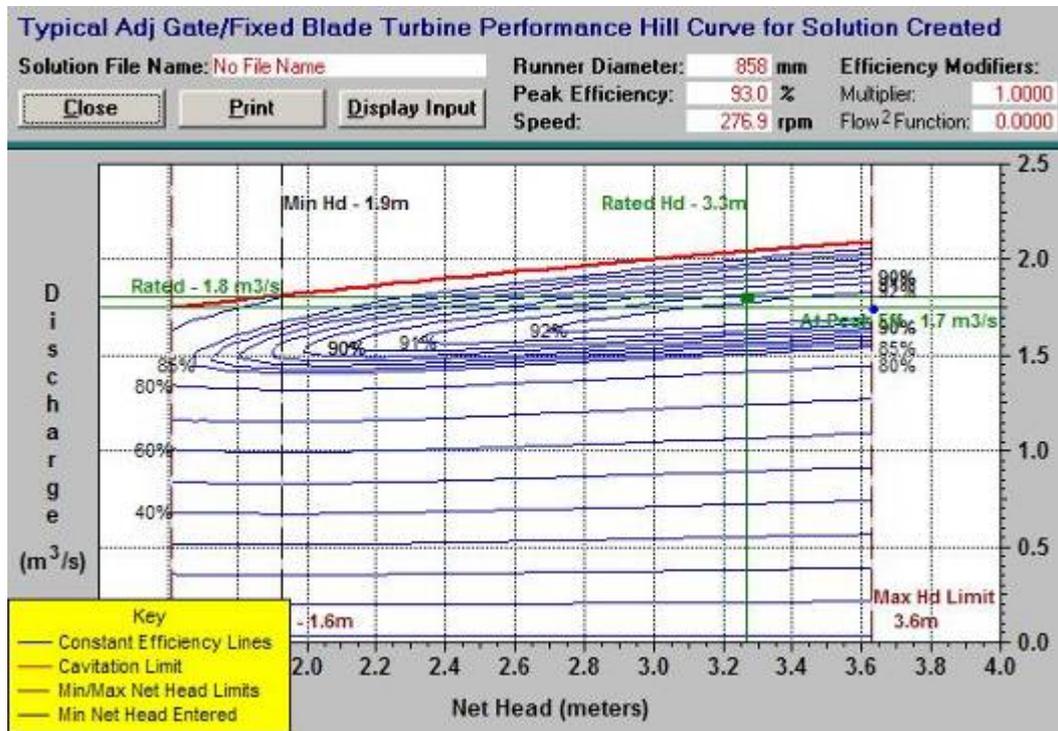


Figura 36 – Curva de eficiência da Turbina.

A Figura 37 apresenta as características de operação da turbina selecionada.

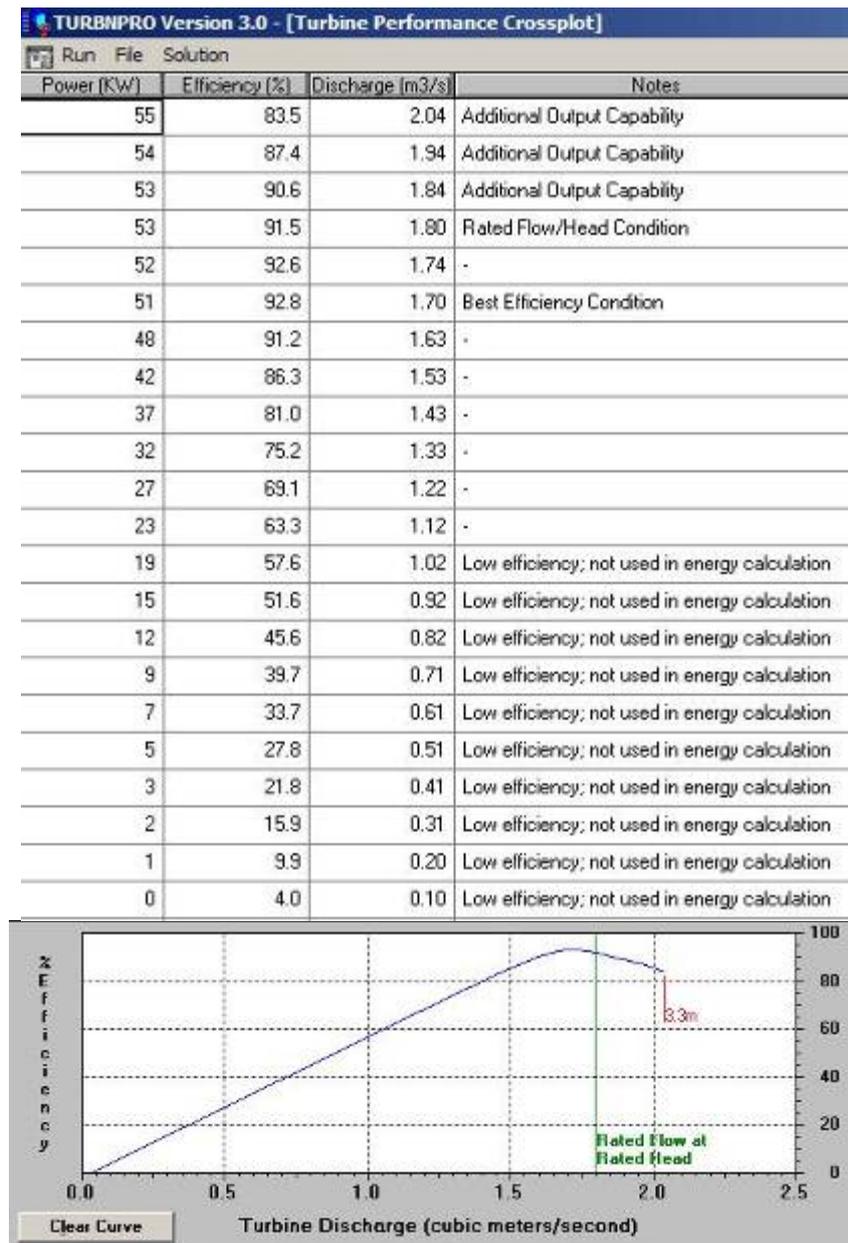


Figura 37 – Características de operação da Turbina.

4.4.2. Programa CARTHA aplicado à CGH Irmã Dorothy

Com os dados geométricos da turbina axial (Figura 39), foi possível a simulação do comportamento das características de desempenho da mesma. Dados referentes à geometria das pás (Tabela 6), foram levantados a partir de desenho em Autocad da turbina em 3D via rotina autolisp (Figura 38).

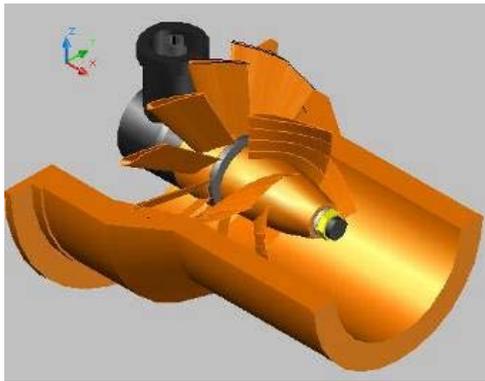


Figura 38 – Turbina axial gerada pelo autolisp



Figura 39 – Turbina axial modelo.

Tabela 6 – Dados de entrada da turbina hidráulica axial modelo.

| DADOS DE ENTRADA | |
|---|--|
| TURBINA | PÁS DO DISTRIBUIDOR |
| Diâmetro Interno do Rotor : 361 mm | Número de Pás do Distribuidor: 12 |
| Diâmetro Externo do Rotor: 840 mm | Largura da Pá do Distribuidor: 220 mm |
| Diâmetro da Carcaça no Local do Rotor: 845 mm | Ponto Médio da Pá do Distribuidor: 120 mm |
| Diâmetro Interno da Entrada da Turbina: 422 mm | Ângulo do Cone de Pás do Distribuidor: 16° |
| Diâmetro Externo da Entrada da Turbina: 1000 mm | Ângulo de saída da Pá do Distribuidor: 42° |
| | |
| PÁS DO ROTOR | TURBINA ELEMENTAR 1 |
| Número de Pás do Rotor: 4 | Largura Axial da Pá do Rotor: 326 mm |
| | |
| TURBINA ELEMENTAR 2 | Ângulo de Entrada da Pás do Rotor: 67° |
| Largura Axial da Pá do Rotor: 323 mm | Ângulo de Saída da Pá do Rotor: 69° |
| Corda da Pá do Rotor: 255 mm | |
| Ângulo de Entrada da Pás do Rotor: 63° | |
| Ângulo de Saída da Pá do Rotor: 66° | |
| | |
| TURBINA ELEMENTAR 3 | TURBINA ELEMENTAR 4 |
| Largura Axial da Pá do Rotor: 314 mm | Largura Axial das Pá do Rotor: 294 mm |
| Corda da Pá do Rotor: 232 mm | Corda da Pá do Rotor: 214 mm |
| Ângulo de Entrada da Pás do Rotor: 60° | Ângulo de Entrada da Pás do Rotor: 42° |
| Ângulo de Saída da Pá do Rotor: 64° | Ângulo de Saída da Pá do Rotor: 53° |
| | |
| TURBINA ELEMENTAR 5 | |
| Largura Axial Pá do Rotor: 270 mm | |
| Corda da Pá do Rotor: 195 mm | |
| Ângulo de Entrada da Pás do Rotor: 33° | |
| Ângulo de Saída da Pá do Rotor: 50° | |

As dimensões da turbina modelo foram consideradas para aplicação do CARTHA. Os ângulos referente à geometria das pás de cada estação, foram extraídos de desenho em autocad, adotando a convenção conforme a Figura 40.

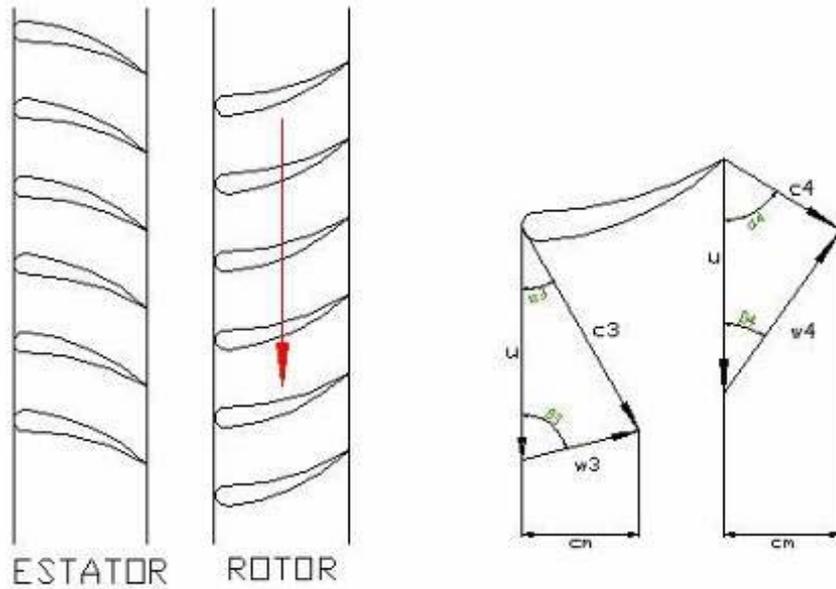


Figura 40 – Triângulo de Velocidade nas Pás do Rotor.

Para a vazão de projeto definida a 60% da permanência, $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$, e uma altura de queda líquida em torno de 3 m, tem-se uma rotação nominal de 257 rpm, e rendimento de 86% (Figura 41). Para situações de cheia máxima ($Q = 16 \text{ m}^3/\text{s}$), percebe-se que a rotação tende ao infinito. Como a turbina possui as pás do distribuidor e rotor fixos, há necessidade do uso de sistema para regulagem de rotação. Caso a turbina possuísse regulagem das pás, automaticamente as sazonalidades em relação às vazões poderiam ser atendidas. As Figuras 41, 42 e 43 apresentam, respectivamente, o diagrama de colina Vazão x Rotação com curvas de altura e rendimento constantes, o diagrama de colina Altura x Rotação com curvas de rendimento constante e o diagrama Potência x Vazão com curvas de altura constante. Tais diagramas são saídas do programa CARTHA.

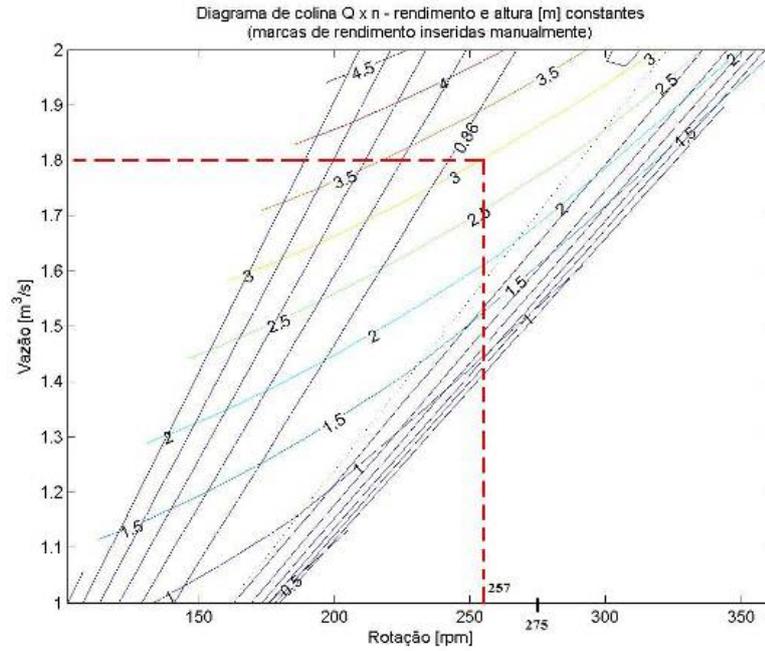


Figura 41 - Diagrama de colina Vazão x Rotação com curvas de altura e rendimento constantes.

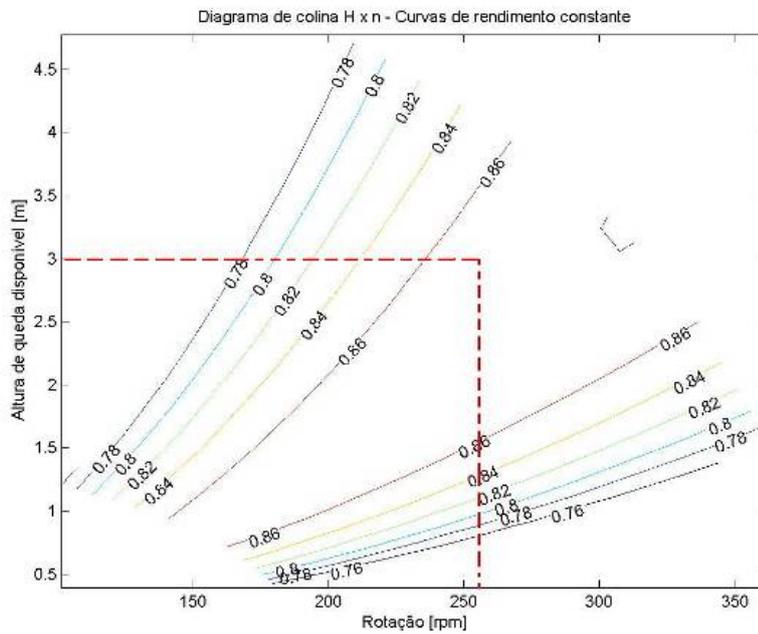


Figura 42 - Diagrama de colina Altura x Rotação com curvas de rendimento constante.

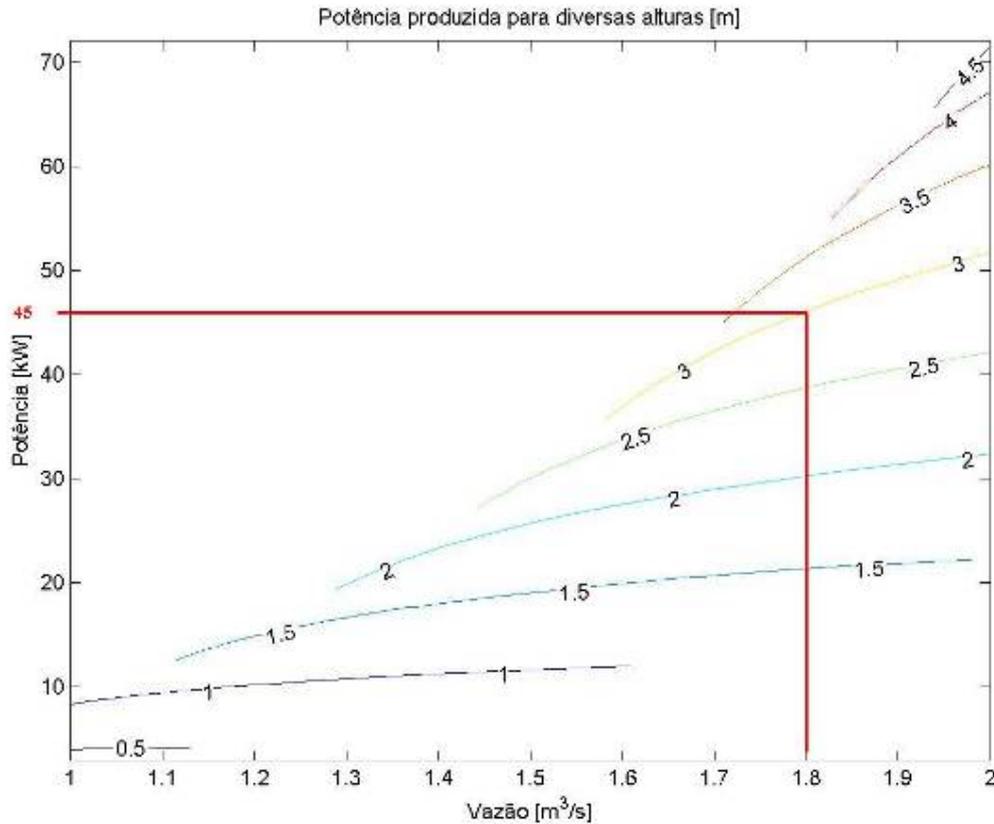


Figura 43 -Diagrama Potência x Vazão com curvas de altura constante.

Para o projeto de implantação da CGH irmã Doroty com $Q_{60\%} = 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$, estima-se, através do CARTHA, uma potência de 45 kW. A Tabela 7 compara os valores obtidos no TURBNPRO com os do CARTHA.

Tabela 7 – Comparativo das simulações – TURBNPRO E CARTHA.

| (Q _{60%}) | TURBNPRO | | | CARTHA | | |
|-----------------------|----------------|------------|--------|----------------|------------|--------|
| | ω (rpm) | η (%) | P (kW) | ω (rpm) | η (%) | P (kW) |
| 1,8 m ³ /s | 276,9 | 93,0 | 53,0 | 257,0 | 86,0 | 45,0 |

Para as condições de operação estabelecidas, o comportamento de desempenho da turbina axial apresentou diferenças. O programa Turbnpro foi desenvolvido para predição de características de desempenho de turbinas axiais, que tenham pás do distribuidor ou do rotor móveis, ou as duas móveis, o mesmo não realiza para condições de pás do rotor e distribuidor fixas. Utilizou-se, portanto, na simulação do Turbnpro, a opção de movimentação das pás do distribuidor, com isso o software ajustou, os regimes de operação para os rendimentos máximos.

No caso do CARTHA, o mesmo foi desenvolvido para predição de desempenho de turbinas axiais de pás e distribuidor fixos, com isso mediante os dados geométricos da turbina axial modelo, conseguiu-se valores próximos da simulação com o Turbnpro. Esta diferença pode ser atribuída por conta da utilização de diferentes características de simulação, ou seja, no Turbnpro foi utilizado distribuidor com pás móveis, com isso o próprio software ajustou as condições de operação para obtenção de rendimento ótimo. Já o CARTHA, apresenta os valores geométricos fixos, sem possibilidade de ajuste. Por outro lado, também, a diferença de valores pode ser atribuída à incerteza das medidas realizadas na turbina teste.

4.5. Aspectos Ambientais

4.5.1. Introdução

A região amazônica detém um grande potencial de rios e igarapés que podem ser aproveitados para geração de energia para atendimento de pequenas comunidades isoladas, no entanto há necessidade de mensurar os possíveis impactos causados mesmo que sejam pequenos, devido a imensa riqueza de vida aquática e terrestre encontradas na Amazônia. Atualmente há uma grande dificuldade referente a informações e metodologias específicas para análise de aspectos ambientais causdos por CGH's, ao contrário de grandes centrais hidrelétricas que tem informações, ferramentas e metodologias, para o diagnóstico de seus respectivos impactos.

Neste sentido é de vital importância a concepção de técnicas que permitam a avaliação dos impactos das CGH's, para obtenção de resultados que venham contribuir de maneira concreta e sustentável para o desenvolvimento da região.

A principal questão a ser respondida é: Qual é a área inundada de uma pequena bacia hidrográfica amazônica provocada pela implantação de uma CGH de baixa queda a fio d'água em um pequeno rio ou igarapé da região?

A resposta a esta questão depende da curva de permanência do sítio hidrológico, pois para vazões de baixa permanência, que são caracterizadas por períodos de cheia, a área inundada é maior. Enquanto que, para vazões de alta permanência, que são caracterizadas por períodos de estiagem, a área inundada é menor. Assim, a seguir, vai-se propor e analisar um método de cálculo de área inundada aplicado à CGH irmã Dorothy. O método demanda como dados de entrada a topografia da área, para que se possa compor o MNT (modelo numérico do terreno); a curva de permanência que fornece as vazões com as respectivas permanências; e as seções topo-batimétricas importante para conhecimento do perfil transversal do igarapé, e as cotas de terreno para geração do perfil em 3D.

4.5.2. Método para determinação da Área Inundada

Tratamento dos dados de topografia

A topografia do terreno foi levantada através de um teodolito eletrônico DT-104 precisão de 10''. Os dados topográficos foram tratados, e inseridos no software DATAGEOSIS 2.3. O DataGeosis é um software topográfico, que tem capacidade de executar cálculos topográficos e geodésicos (transformação de coordenadas), cálculo e divisão de áreas, edição de

desenhos, curvas de nível, projeto geométrico de estradas, perfis transversais e/ou longitudinais, volumes através de superfícies ou pelo método tradicional de seções (Método das semi-distâncias), mapa de declividades, área de inundação entre outros.

Por ser um software desenvolvido para ambiente WINDOWS através de programação orientada a objetos, o DataGeosis torna-se uma ferramenta funcional, precisa e ágil, favorecendo atualizações e manutenções do sistema. A Figura 44 apresenta a planilha com os dados topográficos levantados, em coordenadas X,Y,Z, para construção do MNT.

| Ré | P.Visado | Atributos | X-Total | Y-Total | Z-Total |
|----|----------|-----------|---------|---------|---------|
| Pf | 4 | | 0.000 | 52.000 | 9.000 |
| Pf | 3 | | 4.000 | 52.000 | 8.900 |
| Pf | 2 | | 8.000 | 52.000 | 8.800 |
| Pf | 1 | | 12.000 | 52.000 | 8.700 |
| Pf | 0 | | 16.000 | 52.000 | 8.000 |
| Pf | 1 | | 18.000 | 52.000 | 7.800 |
| Pf | 2 | | 20.000 | 52.000 | 7.700 |
| Pf | 3 | | 22.000 | 52.000 | 7.300 |
| Pf | 4 | | 24.000 | 52.000 | 7.200 |
| Pf | 5 | | 26.000 | 52.000 | 7.500 |
| Pf | 6 | | 28.000 | 52.000 | 7.700 |
| Pf | 7 | | 30.000 | 52.000 | 7.600 |
| Pf | 8 | | 32.000 | 52.000 | 7.400 |
| Pf | 9 | | 34.000 | 52.000 | 7.200 |
| Pf | 10 | | 36.000 | 52.000 | 7.100 |
| Pf | 11 | | 37.000 | 52.000 | 7.000 |
| Pf | 12 | | 38.000 | 52.000 | 6.800 |
| Pf | 13 | | 39.000 | 52.000 | 6.700 |
| Pf | 14 | | 40.000 | 52.000 | 6.600 |
| Pf | 15 | | 41.000 | 52.000 | 6.400 |
| Pf | 16 | | 42.000 | 52.000 | 6.100 |
| Pf | 17 | | 43.000 | 52.000 | 6.000 |
| Pf | 18 | | 44.000 | 52.000 | 6.100 |

Figura 44 – Planilha do Software DATAGEOSIS 2.3 com dados topográficos.

Para cada coordenada Y têm-se valores correspondentes à distância $X_1..X_2....X_n$. Analogamente, também se tem uma cota (altura) correspondente $Z_1..Z_2.....Z_n$. Com isso serão obtidos os pontos correspondentes necessários a composição do MNT, o qual possui 4752 pontos de coordenadas (X, Y, Z) inseridos manualmente na planilha do software topográfico. Selecionando-se o menu “Projeto” (Figura 44), pode-se visualizar a superfície em 3D do terreno (Figura 45), construída pelo software, tendo como base os pontos (X, Y, Z) inseridos anteriormente no software.

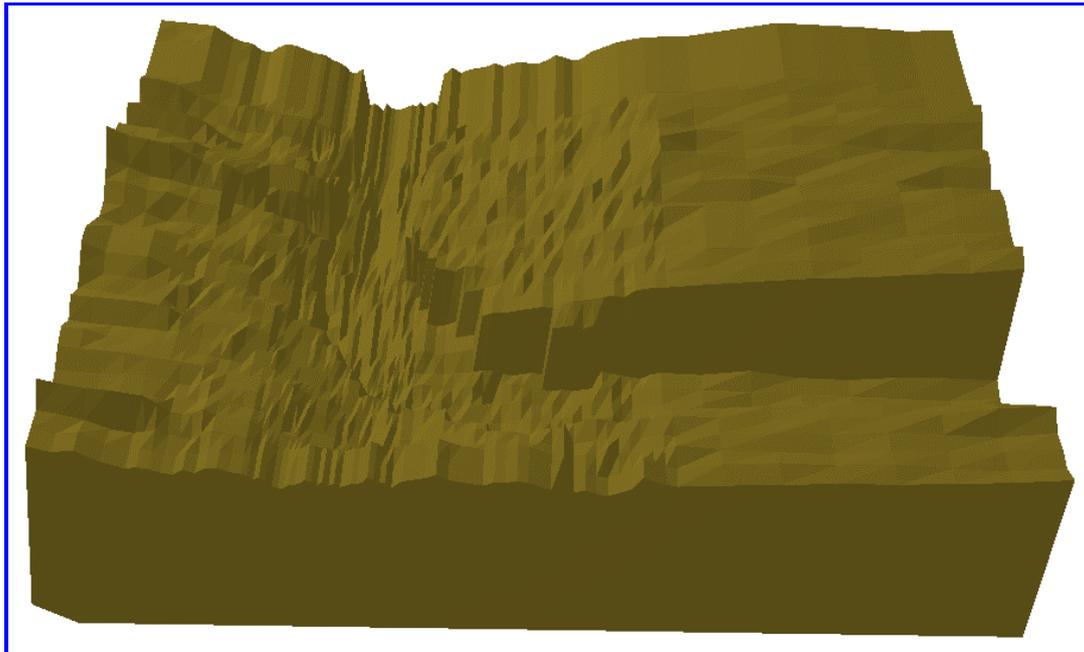


Figura 45 – Representação Gráfica do Terreno do igarapé São João.

Cálculo da área de inundação sem barragem

As curvas de permanência (Figura 31) e chave (Figura 30) são fundamentais no cálculo da área de inundação, pois elas permitem, respectivamente, o conhecimento dos regimes de vazão do rio ou igarapé, e das cotas que devem ser relacionadas às vazões. As Figuras 46 e 47 representam as Figuras 31 e 30, destacando as vazões selecionadas para o cálculo da área inundada sem barragem.

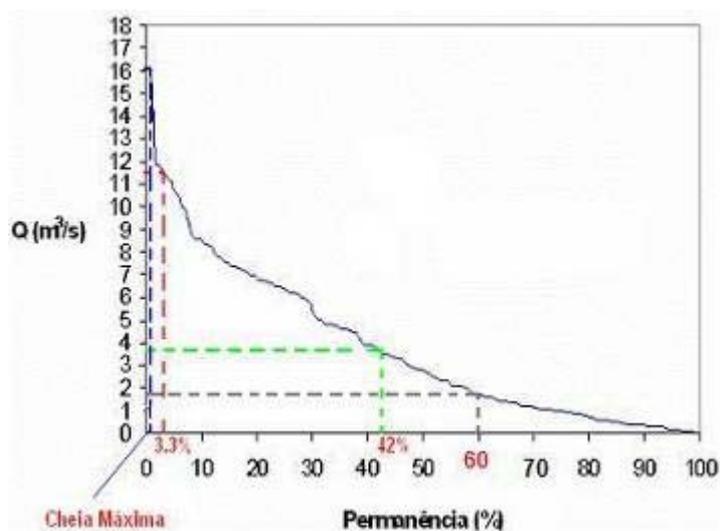


Figura 46 - Curva de permanência com vazões para cálculo das áreas de inundação.

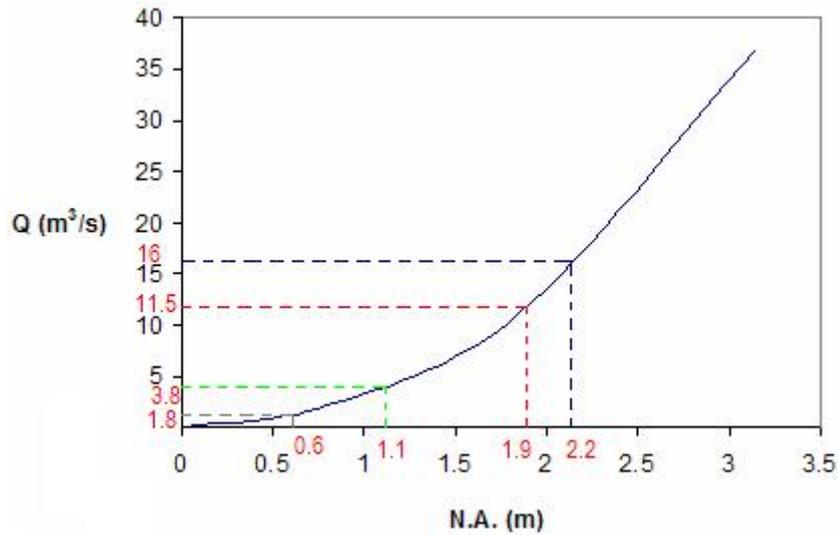


Figura 47 - Curva chave relacionando as vazões para cálculo de inundação.

Assim, para as vazões $Q_{\text{máx}} = 16 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{3,3\%} = 11,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{42\%} = 3,8 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{60\%} = 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$, obtêm-se as cotas d'água correspondentes, através da curva chave (Figura 47). Abaixo estão listadas as vazões selecionadas e as respectivas cotas somadas ao valor de referência, 3,7 m.

$$Q_{\text{máx}}: 3,7 + 2,2 \implies 5,9 \text{ metros}$$

$$Q_{60\%}: 3,7 + 0,6 \implies 4,3 \text{ metros}$$

$$Q_{42\%}: 3,7 + 1,1 \implies 4,8 \text{ metros}$$

$$Q_{3,3\%}: 3,7 + 1,9 \implies 5,6 \text{ metros}$$

As cotas resultantes são apresentadas na Figura 48.

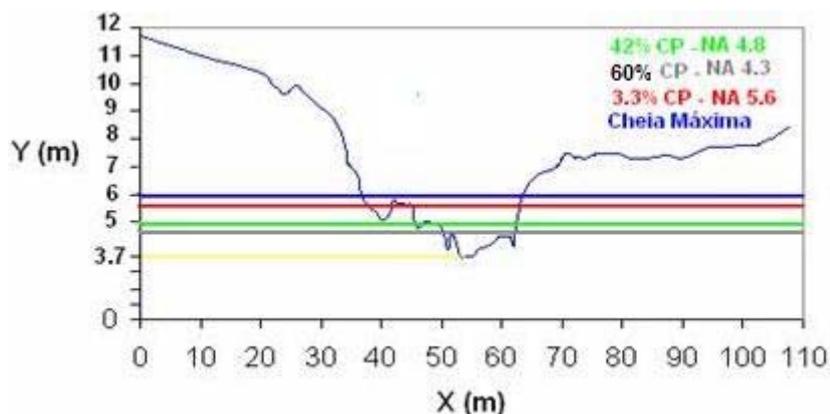


Figura 48 – Cotas na seção transversal na posição do eixo principal da barragem.

Com as cotas e as vazões, pode-se calcular a área inundada para a configuração "sem barragem". Para isso, em menu projeto do DATAGEOSIS 2.3 (Figura 44), seleciona-se "Área de inundação" (Figura 49). Com a opção apenas um nível, determina-se a superfície inundada para uma cota determinada, caso se deseje saber as áreas inundadas de vários níveis de cotas ao mesmo tempo utiliza-se a opção múltiplos níveis de cota.

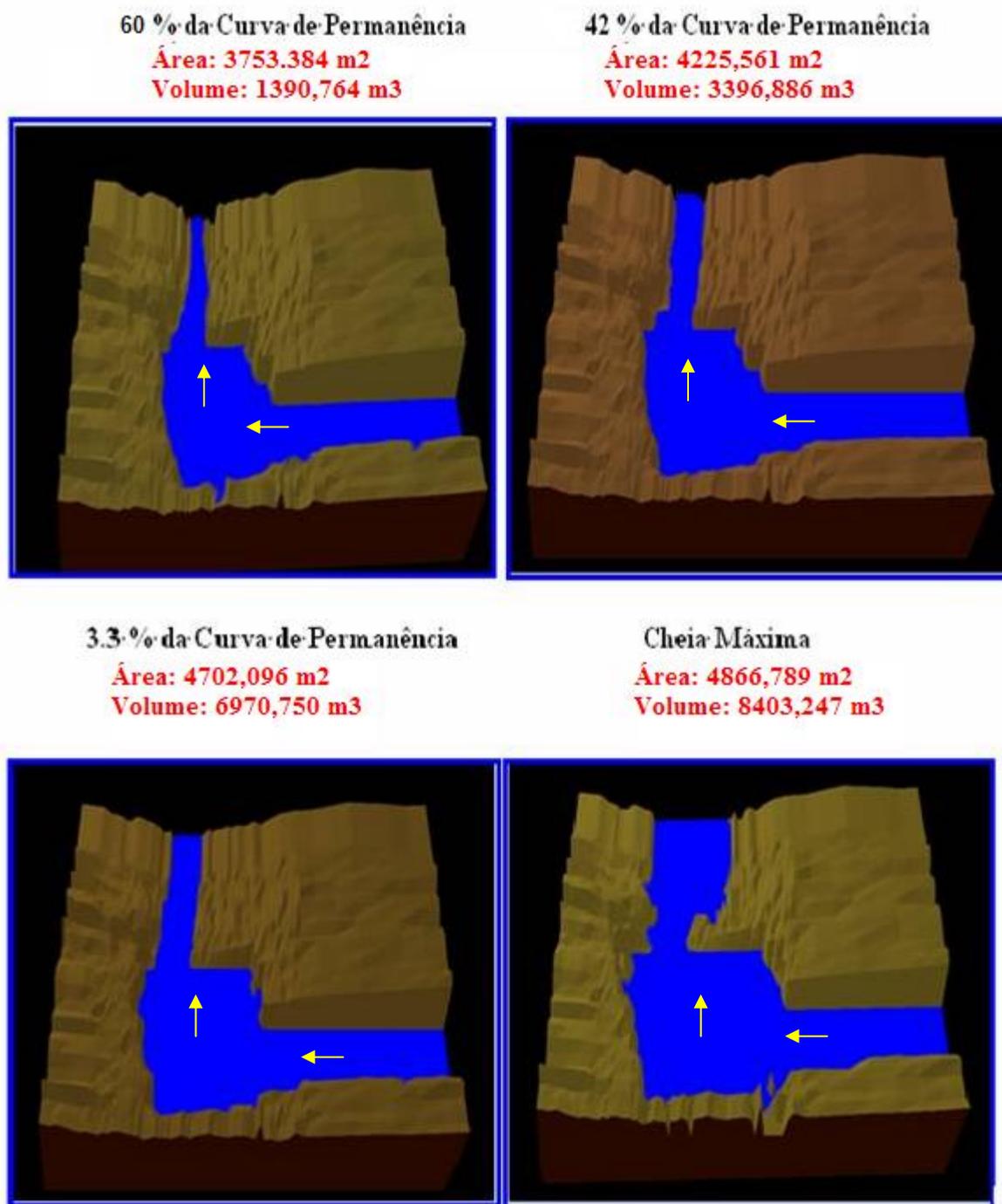


Figura 49 - Caixa de diálogo para cálculo da área inundada.

A Figura 50 apresenta as áreas inundadas e os volumes para os níveis d'água da Figura 48. A análise da figura permite observar que as três áreas inundadas simuladas apresentam a mesma ordem de grandeza, ou seja, elas estão entre 4 000 e 5 000 m² ou 0,004 e 0,005 km². O valor máximo de 0,005 km² corresponde à cheia máxima (Q_{máx}), em condições naturais, do igarapé são João. A seguir apresenta-se a simulação da área inundada na configuração com

barragem, para que se possa mensurar a área inundada da bacia hidrográfica devida à implantação da CGH.

Figura 50 – Áreas inundadas do igarapé São João – sem barragem.



Cálculo da área de inundação com barragem

Para o cálculo da área de inundação com barragem, segue-se o mesmo procedimento discutido anteriormente, porém as áreas inundadas devem ser simuladas a montante e a jusante

e depois somadas. Neste caso, são necessárias cotas dos níveis d'água, a montante e a jusante, conforme mostrado respectivamente nas Figuras 51 e 52.

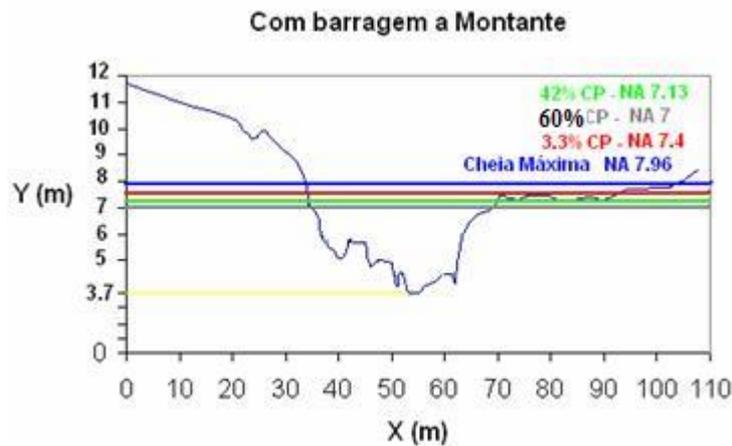


Figura 51 - Cotas na seção transversal a montante do eixo central da barragem.

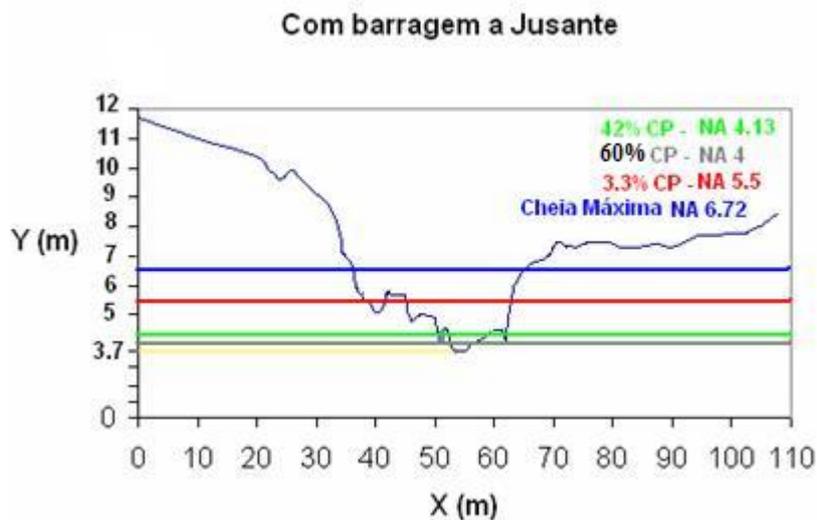


Figura 52 - Cotas na seção transversal a jusante do eixo central da barragem.

Com as cotas referentes aos níveis d'água a montante e a jusante bem definidas, bem como as cotas da barragem, vertedouro, casa de força e conduto forçado, pode-se calcular a área de inundação e os volumes conforme mostra a Figura 53. A figura apresenta também as estruturas que foram inseridas no MNT da CGH, com objetivo de simular as interações das cotas d'água com as estruturas, principalmente com a casa de força, que não pode ser inundada.

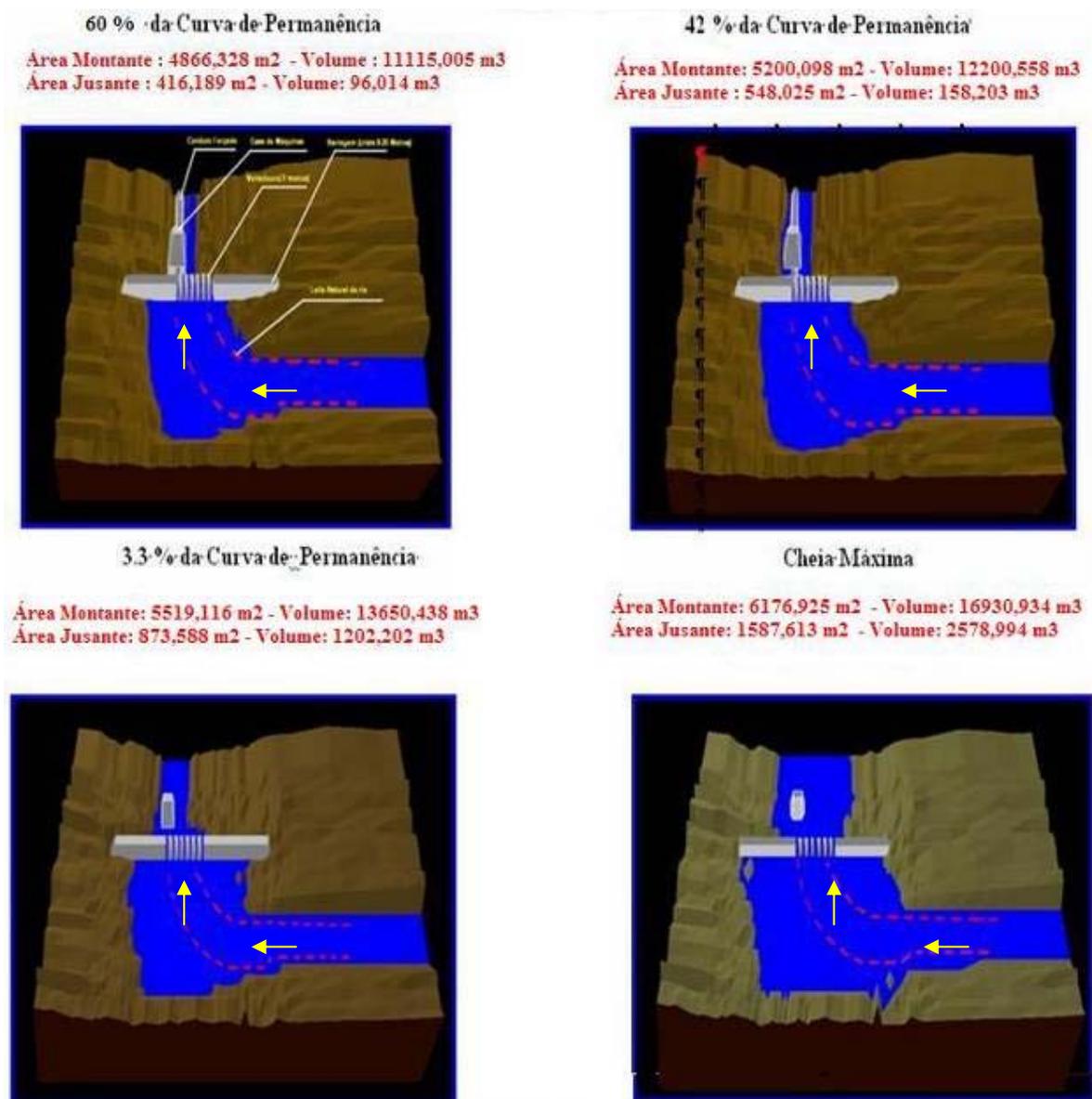


Figura 53 – Áreas inundadas do igarapé São João – com barragem.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos cálculos das áreas inundadas com a barragem. A área inundada é o resultado da soma das áreas inundadas com a barragem a montante e a jusante, menos a área inundada sem a barragem (Figura 50).

Tabela 8 – Tabela resumo com as áreas inundadas da CGH irmã Dorothy.

| Q(m ³ /s) | Área (m ²) | | | |
|---------------------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | c/barragem | | s/barragem | inundada |
| | montante | jusante | | |
| 16,0 (Q _{máx}) | (+) 6.176,925 | (+) 1.587,613 | (-) 4.866,789 | (=) 2.897,749 |
| 11,5 (Q _{3,3%}) | (+) 5.519,116 | (+) 873,588 | (-) 4.702,096 | (=) 1.690,608 |
| 3,8 (Q _{42%}) | (+) 5.200,098 | (+) 548,025 | (-) 4.225,561 | (=) 1.522,562 |
| 1,8 (Q _{60%}) | (+) 4.866,328 | (+) 416,189 | (-) 3.753,384 | (=) 1.529,133 |

A Tabela 8 revela que em cheia máxima ($Q_{máx} = 16 \text{ m}^3/\text{s}$), a área inundada pela CGH é igual a aproximadamente 2.897 m^2 ou $28,97 \times 10^{-4} \text{ km}^2$, o equivalente a um quadrado de lado igual a 54 m. Um valor pequeno, diante da importância da central, que pode ser constatado visualmente através da Figura 54, mostrando que a área inundada se restringe ao próprio vale do igarapé São João. Sendo a cheia máxima um evento extremo e de frequência menor, a condição de área inundada máxima também será de pouca frequência, minimizando assim, o impacto ambiental da central devido à área inundada. Todavia, a simulação da área inundada pela CGH serve de base para a formulação das medidas mitigadoras, caso essas sejam julgadas necessárias pelo órgão regulador, conforme os aspectos legais discutidos anteriormente.

4.6. Aspectos financeiros

A análise dos aspectos financeiros da CGH irmã Dorothy, é baseada na determinação dos custos de instalação (Eq. 10) e unitário de energia (Eq. 11). O cálculo desses custos passa, obrigatoriamente, pelo levantamento do custo dos itens que compõem a central. A futura CGH será equipada com uma turbina tipo hélice (Figura 12) importada do Canadá pela UFPA com financiamento do CNPq; mais gerador elétrico e regulador de velocidade, que ficarão abrigados na casa de força, a qual será integrada à barragem e ao duto forçado. A barragem e a casa de força serão construídas em concreto e pedra argamassada, enquanto que o duto forçado será confeccionado em aço. Além dos custos inerentes à construção civil dos itens supracitados, há ainda, os custos relacionados ao transporte do conjunto eletromecânico (turbina-gerador-regulador) e dos materiais de construção.

Os custos referentes às obras civis foram orçados por empresa brasileira especializada na área; o custo do duto forçado foi calculado a partir de preços de chapas de aço encontradas no mercado de Belém; e por último os custos de transporte foram baseados em empresas de

transportes também de Belém, em média R\$ 10,00/Kg. A Tabela (9) apresenta a composição dos custos da CGH irmã Dorothy, sendo que o custo do projeto é da ordem de US\$ 185,000.00.

Tabela 9 – Composição dos custos da CGH irmã Dorothy.

| | Quantidade | Turbina – 50 kW (Custo \$US) |
|---------------------------------|------------|---------------------------------|
| <u>Casa de Força</u> | Global | |
| Obras Civis | | 9,152.67 |
| Turbina / Gerador /Regulador | | 89,628.00 |
| Transporte | | 6,700.00 |
| <u>Tubulação Forçada</u> | 14 m | |
| Compra Material / Confeção | | 4,000.00 |
| Transporte | | 7,000.00 |
| Obras Civis | | 410.88 |
| <u>Barragem</u> | Global | |
| Fundações | | 20,630.00 |
| Estrutura | | 48,374.56 |
| TOTAL | | 185,596.00 |

Assim, aplicando a Eq. 10, tem-se que o custo de instalação da CGH é igual a US\$ 3,711.92 por kWh instalado. Este valor está de acordo aos valores analisados por Khennas e Barnett (2000). Blanco et al., 2007 analisaram também um projeto de CGH no estado Pará, neste caso o C_i é igual a US\$ 5,000.00 para uma potência de 40 kW. Os autores não possuíam dados reais dos custos da central, sendo que, os mesmos foram estimados a partir da metodologia apresentada por DNAEE/Eletróbrás, 1985, a qual é adaptada à região centro-sul do Brasil.

O CUE (Custo Unitário de Energia) foi determinado através da Eq. 11, resultando em um valor igual a US\$ 0.11 por kWh fornecido. Os parâmetros utilizados na Eq. 11 foram os seguintes:

$a_n = 6,566$, para um tempo de vida de projeto igual a 30 anos e uma taxa de desconto de 15%;

$t = 60\%$ de um ano;

$P = 50$ kW;

$com =$ desprezado devido a falta de dados.

O período de funcionamento da CGH (t), foi determinado levando em consideração a vazão de projeto igual a $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a $Q_{60\%}$ (Figura 4.13). No cálculo do CUE considera-se a CGH operando com fator de carga de 100% , em condições normais este fator é menor e o custo torna-se maior. A Tabela 10 apresenta o custo do projeto, de instalação e o custo unitário de energia da CGH irmã Dorothy.

Tabela 10 – Custos da CGH irmã Dorothy.

| | Custos | | |
|-----|----------------|-----------------------|----------------|
| | Projeto (US\$) | Instalação (US\$/kWh) | CUE (US\$/kWh) |
| CGH | 185,596.00 | 3,711.92 | 0.11 |

Blanco (2005) apresentou o CUE para um gerador a diesel de 40 kW igual a 0.12 US\$/kWh, sendo que o autor desprezou os custo de manutenção por falta de dados. Os cálculos de Blanco foram retomados para que se possa atualizar o valor do diesel, o qual custa hoje no mercado de Altamira (região de Anapú), aproximadamente US\$ 1.15. Assim, tem-se, um CUE igual a 0.26 US\$/kWh. Este valor é bem mais alto que o apresentado na Tabela 10. A diferença é que o gerador a diesel proporcionaria um período de energia firme igual a 1 ano, enquanto que a CGH proporcionará um período de 7,2 meses (60% de um ano) de energia firme. Todavia, se necessário, para os 4,8 meses sem energia proveniente da CGH, a pequena fábrica da vila Sucupira poderá comprar energia da rede rural ao custo médio de 0.12 US\$/kWh (ANEEL, 2007). Entretanto, se o período sem produção de energia coincidir com o período de entressafra, a compra de energia pode ser dispensada.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

São apresentadas as conclusões de maior relevância extraídas da pesquisa e julgadas terem maior contribuição, analisando-se os aspectos que nortearam o trabalho:

Aspectos hidrológicos - não foi possível a transposição do modelo chuva-vazão desenvolvido por Blanco 2005, pois o modelo necessita de dados de vazão para calibração. Assim, utilizou-se o modelo de Giasante, 1999 para se levantar a curva de permanência do igarapé São João. Além disso, foi construída a curva chave do igarapé, necessária aos cálculos de área de inundação da CGH.

Aspectos ambientais - neste trabalho foi utilizado e desenvolvido um método para cálculo e simulação da área inundada para implantação de CGH's na Amazônia, aplicado ao estudo de caso de Implantação da CGH irmã Dorothy, onde se constatou uma área de inundação bem pequena.

Aspectos tecnológicos e energéticos - contemplou a análise tecnológica do comportamento de turbina axial adaptável a baixas quedas, aplicada ao estudo de caso da implantação da CGH irmã Dorothy. A análise tecnológica com a utilização de ferramentas para predição de desempenho de turbinas axiais, como o software comercial TURBNPRO e programa computacional desenvolvido em Matlab, chamado CARTHA; simulou a operação da turbina axial, sendo que o Turbnpro simulando para distribuidor móvel e o Cartha para pás totalmente fixas. Para que os resultados fossem comparados, estabeleceu-se um ponto de projeto ($Q_{60\%}$), avaliando desta forma suas características de desempenho, como rendimento e rotação. A diferença nos resultados foi atribuída às características de simulação e banco de dados com métodos de cálculos diferenciados entre os dois programas mas com propósitos semelhantes sobre as características de desempenho. O TURBNPRO com propósito de estimar potencial e fornecer indicativo do tipo de turbina e características tecnológicas e energéticas, para estudo inicial de projeto de CGH. O CARTHA detêm de rotinas computacionais bem definidas para

aplicação a predição de características de turbinas hidráulicas axiais. Concluiu-se que o TURBNPRO é utilizado para estimar os potenciais hidrelétricos, auxiliando na elaboração do projeto, já o CARTHA apresenta um estudo mais definido para levantamento do rendimento de operação em função da geometria da turbina.

Aspectos financeiros - são raras as informações referente aos custos de implantação de CGH's na Amazônia. Assim, os levantamentos de custos referentes à implantação da CGH irmã Dorothy, foram estimados e estabelecidos e comparados com a literatura. A implantação de CGH's quando comparadas a implantação do diesel tem custo inicial mais elevado, porém o custo de manutenção e operação baixos, e ao longo dos anos é recuperado.

As conclusões particulares de cada aspecto abordado e apresentado no presente trabalho, corroboram que projetos de implantação de CGH's na Amazônia, são via de solução sustentável para o problema de desabastecimento de energia elétrica no interior da região. Tal afirmação é ilustrada pelo estudo de caso da CGH irmã Dorothy, onde resultados satisfatórios do ponto de vista técnico, econômico e ambiental sinalizam a viabilidade de implantação do empreendimento.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

São apresentadas algumas sugestões visando ao desenvolvimento do estudo de implantação de CGH's na Amazônia:

- No aspecto hidrológico, faz-se necessária a operacionalização do modelo de Blanco, 2005 ou de outros adaptados a pequenas bacias hidrográficas da Amazônia.

- No aspecto ambiental, aplicar, o método desenvolvido no presente trabalho para o cálculo de área de inundação, a outros projetos de CGH na Amazônia.

- No aspecto tecnológico, seguindo a mesma linha de predição de características de desempenho de turbinas axiais, pode-se sugerir, um estudo da rotina computacional CARTHA desenvolvido para turbinas axiais de pás fixas, mas com possibilidade de alteração de ângulos de ataques, para obtenção de rendimentos associados às sazonalidades da região. As simulações realizadas, contemplam para ponto de operação de projeto ($Q_{60\%} = 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$), com isso conseguiu-se rendimento ótimo. Caso tenha alteração do ponto de projeto, mudando para ($Q_{80\%}$), é interessante alterar os ângulos na rotina do CARTHA, de forma que tenha rendimento máximo, para isso técnicas geométricas devem ser estudadas, objetivando desenvolver máquinas com pás reguláveis adaptáveis aos pequenos rios da Amazônia.

Capítulo 6

Bibliografia

ANA – Agência Nacional de Águas, <http://hidroweb.ana.gov.br>, 2007.

ANEEL. **Guia do empreendedor de pequenas centrais hidrelétricas**. Brasília, 2003.

ANEEL, www.aneel.gov.br, 2007.

ASME “The Guide to Hydropower Mechanical Design”, HCI publications, Montréal, pp. 4-20; 4-21, 1996.

BALARIM, C. R. **Avaliação expedita do custo de implantação de micro centrais hidrelétricas**. 1996. 158p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências. QUAL A UNIVERSIDADE? Botucatu, 1996.

BIRUEL, J. J.; MANZANARES, F. N. **Predição das Características de Desempenho de Turbinas Hidráulicas Axiais. Relatório de Iniciação Tecnológica Industrial**. FALTA O NOME DA CIDADE, CNPQ, 1999.

BLANCO, C. J. C. **Méthodologie pour l’implantation de micro-centrales hydro-électriques en Amazonie dans une perspective de développement durable**. 2005. Tese de Ph.D. INRS-ETE. Universidade do Quebec, 2005.

BLANCO, C. J. C. ; SECRETAN, Y. ; FAVRE, A. Análise, Aplicação e Transposição de um Modelo Chuva-Vazão para Simulação de Curvas de Permanência de Pequenas Bacias da Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. FALTA O NOME DO PERIÓDICO. v. 12, p. 205-216, 2007

BLANCO, C. J. C. et al. Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l’Amazonie. **Canadian Journal of Civil Engineering**. v. 32, p. 803 – 811, 2005.

DNAEE / Eletrobrás. **Manual de Microcentrais Hidrelétricas**. TEM EDITORA? Brasília, 1985.

ELETROBRAS. **Diretrizes para projetos de implantação de pequenas centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, TEM EDITORA? 2000.

FEARNSIDE, P. M. Social Impacts of Brazil's Tucuruí Dam. **Environmental Management**. v.24, n. 3, p.483-495, 1999.

GIASANTE, A. E. **Determinação da Vazão Máxima de uma Bacia Hidrográfica - uma Comparação entre os Métodos Sintéticos e suas Aplicabilidades**. Universidade Paulista, 1999. FALTA DADOS.

MAGALHÃES, S.B ; BRITO, RC ; CASTRO, E.R, **Energia na Amazônia vol I LOCAL : UFPA/MPEG/UNAMAZ , 1996.**

MESQUITA, A. L. A.; BLANCO, C. J. C.; LOBATO, R. V. **Levantamento do potencial energético para a implantação de mini centrais hidrelétricas na região da Calha Norte, estado do Pará**. LOCAL: EDITORA Relatório Final do projeto FUNTEC 115-00/97, 1999.

DARZÉ, A.S.S. **A questão Ambiental como fator de desestímulo ao investimento no setor privado de geração de energia hidrelétrica no Brasil**. 2002. Dissertação (mestrado em administração), QUAL CENTRO?, Universidade Federal da Bahia, Salvador ,2002.

PENCHE, C. "*Layman's Handbook on How to Develop a Small Hydro Site*" Europa, Commission of the European Communities; 267p, 1998.É UM ARTIGO? FALTA DADOS

SCHWEIGER, F.; GREGORI, J. **Analysis of Small Hydro Turbine Design**. LOCALSmall Hydro Power, 1990.

TRUSSART, S. et. al. Hidropower Projects: a Review of Most Effective Mitigation Measures. **Energy Policy**. v 30, p. 1251-1259. 2002.

TUCCI, C., E., M. et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação** 2.ed. LOCAL :Editora da Universidade/UFRGS, 1997.

KHENNAS, S.; BARNETT, A. Best Practices for Sustainable Development of Micro Hydro Power in Developing Countries. Final Synthesis Report, contract R7215, 2000, 105p.

REFER~ENCIA DE QUAL MATERIAL?

DARZÉ PEREIRA, Adriano. **A questão ambiental como um fator de desestímulo ao investimento no setor privado de geração de energia hidrelétrica no Brasil**. 2002. Tese de mestrado. QUAL CENTRO? QUAL UNIVERSIDADE? Bahia, 2002.

ANEXO I



MICROCENTRAL HIDRELETRICA VILA SUCUPIRA

Relatório Ambiental Simplificado - RAS

André Luiz Amarante Mesquita, Eng. Mecânico, Dr. Ing.

Fábio Vinícius Vieira Bezerra, Eng. Mecânico

Grupo de Turbomáquinas – Depto. de Eng. Mecânica – Centro Tecnológico

Universidade Federal do Pará

Junho/2006

ÍNDICE

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1. OBJETIVOS

1.2. JUSTIFICATIVAS

1.3. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.3.1. Alternativas para a Localização da Barragem

1.3.2. Alternativas Tecnológicas

1.3.3. Características da Microbacia do Igarapé São João

1.3.4. Área de Influência

1.3.5. Características da Barragem de Contenção

1.3.6. Características das MCH Vila Sucupira

2. DIAGNOSTICO E PROGNOSTICO AMBIENTAL

2.1. ASPECTOS GERAIS

2.2. ASPECTOS ESPECÍFICOS

2.3. ASPECTOS LEGAIS

2.4. ANÁLISE DA MCH VILA SUCUPIRA

3. MEDIDAS MITIGADORAS E COMPENSATORIAS

3.1. ASPECTOS GERAIS

3.2. CASO DA MCH VILA SUCUPIRA

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5. REFERÊNCIAS

6. RAS – RELATÓRIO AMBIENTAL SIMPLIFICADO

6.1. CÁLCULO DA ÁREA DE INUNDAÇÃO

6.2. ESTUDO HIDROENERGÉTICO

6.3. FICHA TÉCNICA CGH

6.4. DADOS TÉCNICOS TURBINA-GERADOR

6.5. DOCUMENTOS DA COMUNIDADE

6.6. FOTOS

6.7. PLANTAS

1- DESCRIÇÃO DO PROJETO

OBJETIVOS

Este projeto tem a finalidade de implantar uma Microcentral Hidrelétrica – MCH de baixa queda no Igarapé São João, também conhecido como Igarapé Praiado, de potência nominal de 50 kVA, utilizando tecnologia moderna, visando fornecimento de energia para pequena indústria de beneficiamento de polpa de frutas, pertencendo à comunidade de Vila Sucupira, km 120 da Transamazônica, município de Anapu, estado do Pará (ver mapa da localização na figura 1).

O presente projeto obteve financiamento do CNPq para a aquisição da grupo turbina – gerador - sistema de controle, para os levantamentos de campo e para estudos de definição da microcentral. Atualmente, o projeto conta com financiamento do Ministério de Minas e Energia para finalização do projeto de engenharia e para a obra civil do empreendimento.

O presente relatório apresenta os estudos necessários que constituem o Relatório Ambiental Simplificado – RAS, conforme estabelece a Resolução CONAMA 279, de 27 de junho de 2001, assim como documentos e literatura disponível sobre o tema.

JUSTIFICATIVAS

Um problema de grande relevância social na Amazônia é o fato que as pequenas comunidades isoladas não são contempladas pelos benefícios dos grandes empreendimentos hidrelétricos instalados na região. Considerando ainda a grande malha de pequenos rios e igarapés na região Amazônica, a utilização de mini e microcentrais vem como uma alternativa importante para o atendimento das necessidades energéticas dessas comunidades.

As condições encontradas na região para a implantação de microcentrais hidrelétricas (baixa queda), conduzem à uma solução de turbinas hidráulica axial. Entretanto, não se encontra no Brasil fornecedores deste tipo de máquina. Assim, este projeto visa à implantação de uma microcentral hidrelétrica utilizando um equipamento especialmente concebido para baixa queda e pequena escala, já adquirido no mercado internacional.

Esta microcentral vai fornecer energia, principalmente, para uma pequena indústria de beneficiamento de frutas, já construída (ver figura 2) e com os equipamentos de linha de produção já instalados. A energia será um importante insumo para a viabilidade do projeto.

Os estudos detalhados para a implantação desta central e o acompanhamento de seu desempenho propiciarão condições favoráveis para a geração de tecnologia própria no desenvolvimento de máquinas dessas características.

Com este projeto, tem-se a oportunidade de realização de uma obra, embora pequena em termos físicos e financeiros, de grande impacto sócio-econômico, atendendo uma pequena comunidade de uma região carente e pouco assistida.

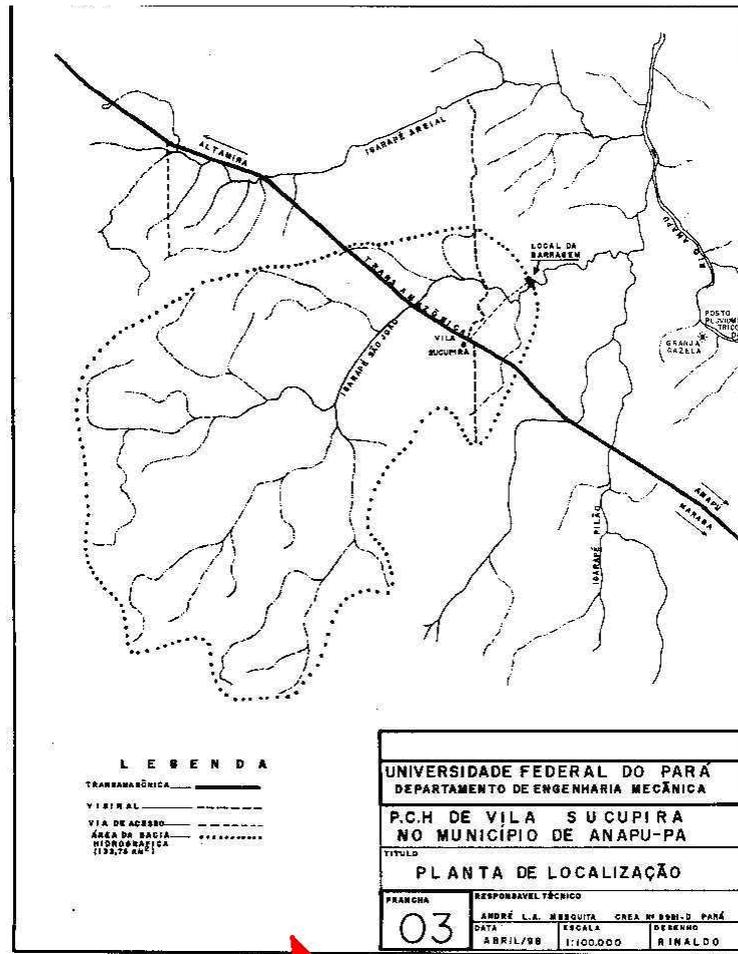


Figura 1. Localização da MCH Vila Sucupira.



Figura 2. Vista da Unidade de Processamento de Frutas em Vila Sucupira.

DESCRIÇÃO DO PROJETO

Alternativas para a Localização da Microcentral

A MCH para atender a localidade de Vila Sucupira foi uma demanda espontânea desta comunidade. Na região da comunidade, o Igarapé São João é o curso d'água com maior potencial para um empreendimento hidroenergético.

A partir de levantamentos plani-altimétricos foi encontrada uma área de bacia de drenagem do igarapé de 133,75 km² (ver figura 1). Ele nasce a 21 km do local da barragem (nascente mais distante), corre através da região na direção nordeste e deságua no rio Anapu. Existe, na região, um desnível natural de 35 metros entre as elevações próximas da cabeceira do rio e do local da barragem.

A partir dos estudos topográficos e de análise de possíveis sítios foi encontrada uma área no igarapé São João com boas condições para se implantar o empreendimento da microcentral. Este sítio tem uma distância de 3 km até a fábrica de beneficiamento de polpa, e receberá a energia produzida (ver figura 1).

A figura 3 apresenta uma vista do fluxo de água no Igarapé São João na área do sítio selecionado para a instalação da MCH Vila Sucupira. Este sítio, apresenta a melhor queda bruta para a instalação da microcentral e apresenta uma formação rochosa que favorece a construção da barragem de contenção, além de dispor de pedras naturais para a elevação da barragem em pedra argamassada. Em anexo seguem fotos caracterizando todo o sítio.

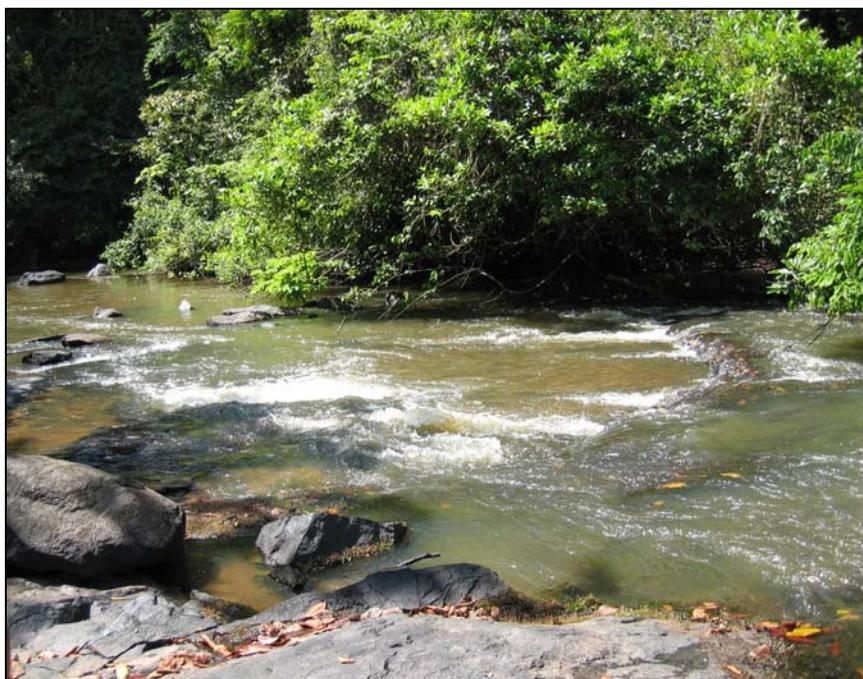


Figura 3. Vista do Igarapé São João no Sítio da MCH Vila Sucupira.

Alternativas Tecnológicas

A MCH a ser implantada é do tipo fio d'água, ou seja, não existe armazenamento de água, tendo-se somente contenção de água, visando um melhor aproveitamento da queda natural disponível e permitir a implantação da tomada d'água para a turbina. Esta característica, em conjunto com a pequena dimensão da obra, gera um projeto de baixíssimo impacto ambiental. (DNAEE, 1985).

Em virtude da existência de pedras em abundância na área, adotou-se a tecnologia de barragem em pedra argamassada para a construção da contenção. A metodologia para a utilização desta tecnologia é apresentada em detalhes no Manual de Microcentral (DNAEE, 1985). Esta construção terá um núcleo central de barragem em pedra argamassada uma barragem complementar do tipo Ambursen, que é constituída de pranchas de madeiras montadas em guias de concreto. Em anexo segue o projeto executivo desta barragem.

Considerando a vazão e a baixa queda disponível, o projeto é adequado para turbinas hidráulicas do tipo axial. Assim, foi escolhido este tipo de tecnologia, com diretrizes e pás do rotor fixas, visando se ter uma máquina de menor custo. Para este tipo de máquina foi realizada uma pesquisa nos mercados nacional e internacional, buscando a melhor opção tecnológica. Um modelo de um fabricante canadense foi escolhido, observando-se que no Brasil ainda não se tem fornecimento em escala comercial deste tipo de equipamento.

A energia será gerada em 220 V trifásica com controle de frequência, sendo elevada para 13 kV para ser transmitida através de uma rede de 3 km até a subestação da fábrica de beneficiamento de frutas, em Vila Sucupira. Em anexo seguem mais detalhes sobre estes equipamentos.

Características da Microbacia do Igarapé São João

O Igarapé São João possui as seguintes coordenadas geográficas, latitude $03^{\circ} 21' 11''$ e longitude: $51^{\circ} 17' 53''$. Estes dados foram extraídos do seguinte mapa, ANAPU – MI – 596, com uma escala de 1:100.000, fornecido pelo IBGE. Próximo ao Igarapé São João existe uma estação pluviométrica localizada na Granja Gazela, que possui as seguintes coordenadas geográficas, latitude: $03^{\circ} 25' 00''$ e longitude $51^{\circ} 15' 15''$. Estes dados foram extraídos do Microsistema de dados Hidrometeorológico do DNAEE de 25/03/99. Devido a proximidade entre o Igarapé São João e a Granja Gazela, os dados pluviométricos desta estação foram utilizados para calcular as vazões no Igarapé São João.

A figura 1 apresenta um mapa ilustrativo da região da localidade de Vila Sucupira que está localizada no município de Anapu, Estado do Pará. Nota-se neste mapa também a localização da barragem no Igarapé São João, do posto pluviométrico da Granja Gazela e em destaque a rodovia Transamazônica. O relevo da região é uma combinação de pouca vegetação, vegetação densa e floresta.

O estudo de hidrologia realizado, detalhado em anexo, permitiu estabelecer o regime hidrológico médio para esta microbacia, apresentado na figura 4. Nesta figura também são apontados pontos de vazões medidas em visitas técnicas ao sítio.

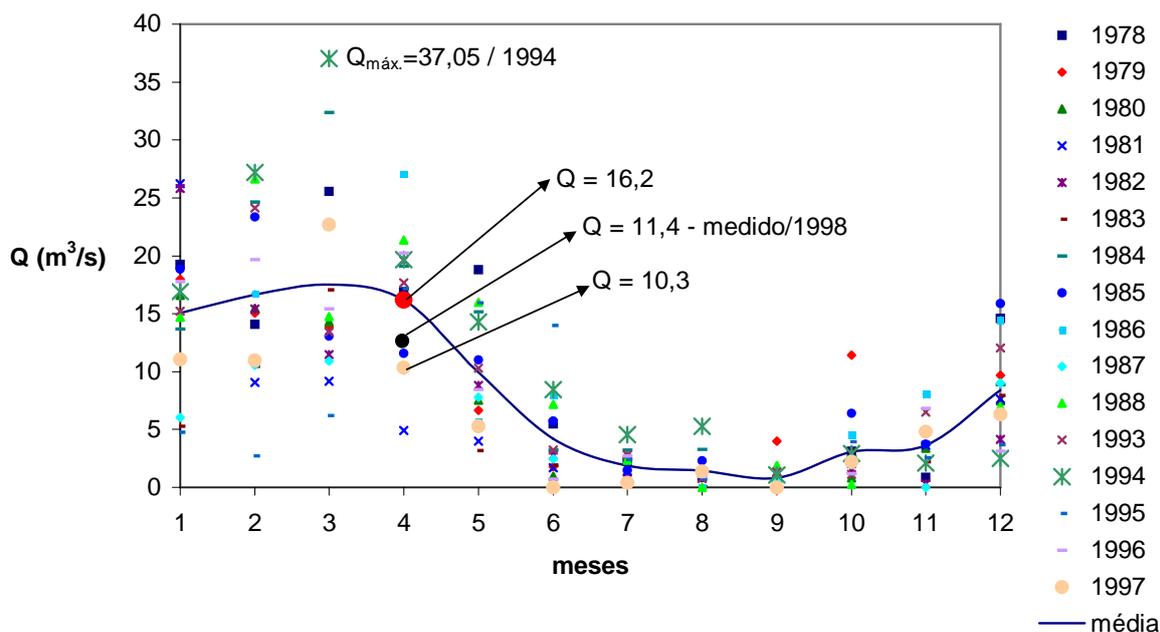


Figura 4. Regime hidrológico do Sítio da MCH Vila Sucupira.

Área de Influência

A MCH Vila Sucupira produz uma retenção de água muito pequena, conforme detalhado em anexo, de tal que a área de influência da barragem de contenção é apenas local.

Mesmo considerando as cheias máximas, a área de influência não se estende por mais de $100 m^2$ em torno da barragem, isto já incluindo possíveis pequenas alterações na flora. Devido às características da barragem, não será realizado desmatamento na área, sendo previsto somente uma limpeza para a instalação da barragem complementar do tipo Ambursem.

No aspecto social, este projeto atingirá a comunidade de Vila Sucupira e algumas pequenas propriedades rurais ao longo da linha de transmissão de 3 km de comprimento. Em documento anexo, segue carta de moradores e líderes da comunidade, sustentando apoio ao projeto.

Características da Barragem de Contenção

Através dos estudos anteriores e utilizando as metodologias do manual de microcentral hidrelétrica da Eletrobrás foi elaborado o projeto executivo da barragem, o qual é descrito a seguir, com as plantas em anexo.

Estrutura da Barragem em Pedra Argamassada

Os serviços deverão ser executados com pedras de dimensão máxima de 30 cm, sendo colocadas cuidadosamente em camadas, de tal forma que cada pedra seja envolvida completamente pela argamassa a ser utilizada, cujo traço deverá ser: 1:4 (cimento: areia), em volume antes de colocação final, as pedras serão prévias e fortemente molhadas.

As peças de madeira que compõem a vertente da barragem deverão ter dimensões de 10 x 20 cm, em madeira de lei, com suas dimensões geométricas plenamente definidas e sem qualquer defeito, para se ter um encaixe satisfatório quando montadas para formar e completar a barragem. As pranchas de madeira serão encaixadas em fendas executadas nas faces laterais da estrutura do vertedouro (conforme projeto estrutural). A seção típica definida para barragem de alvenaria em pedra argamassada é a seguinte:

- Largura da crista da barragem: 1,00 m
- Altura da crista da barragem: 1,20 m
- Altura da barragem: 4,60 m
- Altura do trecho vertedouro: 3,40 m
- Base da barragem: 3,20 m
- Largura da laje da bacia de dissipação: 5,50 m
- Altura da parede lateral da bacia de dissipação: 0,50 m
- Altura média da área de enrocamento: 0,50 m.
- Largura da área de enrocamento: 2,00 m

Neste tipo de barragem, que consiste em um muro de peso, deverá ser feito um tanque (bacia de dissipação), com a mesma largura do vertedouro, que amortecerá o impacto da água que verte pela crista do trecho rebaixado (vertedouro). Caso a rocha de fundação seja pouco resistente, fraturada ou facilmente erodível, será feita uma laje de fundo em pedra argamassada, jogando-se externamente ao redor das paredes do tanque uma camada de pedra de proteção (enrocamento) para evitar que a água que transborda do tanque danifique a superfície da rocha.

Estrutura da Barragem de Ambursem

A barragem tipo Ambursem que será executada, consiste em uma estrutura aliviada, em que a estabilidade é assegurada pelo peso de água sobre o parâmetro inclinado de madeira,

que transmite os esforços à fundação através dos contrafortes em alvenaria de pedra argamassada.

A área que estará situada sob a barragem, e na qual as fundações se apoiarão, deverá ser limpa, incluindo o desmatamento, destocamento e a remoção das camadas superficiais de solo, até ser atingido o terreno com boa resistência para assentamento das fundações. Será executado um bloco de fundação contínuo na projeção da barragem em concreto ciclópico, a uma profundidade de 1,20 m aproximadamente, no traço 1:6 (cimento : areia) em volume, que servirá de base para os contra-fortes que compõem a barragem.

Todo o entulho da obra será removido para fora do terreno, sendo este cuidadosamente limpo para entrega final dos serviços. Haverá particular quando na remoção de salpicos de argamassa endurecida nas áreas afetadas, dando-se especial atenção a áreas na projeção da barragem.

Execução de Ensecadeira

Deverá ser construída uma ensecadeira à montante, com material argiloso, para conter o fluxo do igarapé e deverá seguir duas etapas distintas:

1º) Execução de uma ensecadeira na projeção da barragem em que se encontra a tomada d'água, para execução da 1ª etapa da barragem de pedra argamassada, inclusive para se testar logo a turbina hidráulica;

2º) Deslocamento deste mesmo material argiloso para outra margem do rio, para se implantar novamente outra ensecadeira com as mesmas características da anterior, e com isso possibilitar a execução da 2ª e última etapa da barragem de pedra argamassada;

Obs: Conforme dados obtidos no local de execução da barragem, na época da execução o nível de igarapé São João se resume a uma pequena lamina d'água, possibilitando com isso a execução das ensecadeiras comentadas.

Características da Microcentral Hidrelétrica Vila Sucupira

Dados Extraídos dos Estudos Topográficos e Hidroenergéticos

Vazão Nominal = 1,8 m³/s

11. Queda líquida = 3,27 m

-
12. Queda bruta = 3,42 m
 13. Altura em relação ao nível do mar = 0 m
 14. Temperatura = 25 °C
 15. Altura do eixo da turbina em relação a jusante = 1.89 m
 16. Prioridade de eficiência para máxima vazão = 5.0
 17. Razão entre a queda de projeto e a queda de eficiência máxima = 0.9

18. Frequência do sistema = 60 Hz
19. Mínima altura líquida = 1,93 m

Resumo dos Resultados Relativos à Turbina-Gerador e sua Energia Anual

Dimensões da turbina e do tubo de sucção

Diâmetro do rotor = 668 mm.

Diâmetro do cubo do rotor = 270 mm.

Diâmetro do anel das pás diretrizes = 844 mm

Comprimento do tubo de sucção = 3,21 m

Rotação da turbina = 450 rpm

Potência

Potência na máxima queda líquida = 55 kw e $\eta = 83,6 \%$

Potência na mínima queda líquida = 26 kw e $\eta = 79,4 \%$

Produção de Energia anual

Energia anual = 287,05 MWH para uma permanência de 73%

2- DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO AMBIENTAL

2.1. ASPECTOS GERAIS

Atualmente há uma grande dificuldade referente a informações e metodologias específicas para análise de microcentrais hidrelétricas nos aspectos hidrológico e ambiental. A região amazônica detém um grande potencial de rios e igarapés que podem ser aproveitados para geração de energia para atendimento de pequenas comunidades. Há informações, ferramentas e metodologias relacionados à grandes centrais hidrelétricas, para o diagnóstico de seus respectivos impactos, entretanto para MCH informações são ainda raras.

Neste sentido é de vital importância a utilização de metodologias para o domínio de técnicas que permitam a avaliação de impactos em microcentrais, para obtenção de resultados que venham contribuir de maneira concreta e sustentável para o desenvolvimento da região Amazônica.

2.2. ASPECTOS ESPECÍFICOS

De forma geral, os impactos ambientais de aproveitamento hidrológicos são classificados em quatro dimensões (Trussart *et al.*, 2002):

- Impactos biológicos, físicos e químicos;
- Impactos sócio-econômicos.

O impacto físico mais comum é a diminuição da correnteza do rio, o que gera uma alteração na dinâmica do ambiente aquático. Com isso a temperatura da água também sofre alterações, tendendo a dividir o lago da represa em dois ambientes: o fundo do lago (onde a temperatura é mais baixa) e a superfície do lago (onde a temperatura é mais alta). Essa diferença de temperatura faz com que haja pouca mistura na água do ambiente represado, criando condições anóxicas e favorecendo a eutroficação do lago. Esse é o principal impacto químico, pois leva a reações que geram compostos nocivos a saúde humana.

Já os impactos biológicos estão relacionados à barreira física introduzida com a implantação da barragem. Eles geram um fator de isolamento para populações e espécies aquáticas que antes viviam em contato e impede ou dificulta a piracema de algumas espécies de peixe. Também altera a dinâmica do rio, bem como as alterações na qualidade da água, afetando tanto a região a montante quanto a jusante da barragem (Trussart *et al.*, 2002).

Esses impactos em geral afetam a biodiversidade do rio e podem causar vários problemas para as populações de mamíferos aquáticos da Amazônia. De cinco espécies de mamíferos aquáticos existentes na região Amazônica, três estão em perigo de extinção: a ariranha, a lontra e o peixe boi (Magalhães et al, 1996). Para efeito de informação, dois botos da Amazônia, o tucuxi e o boto vermelho, são espécies consideradas vulneráveis. No caso de vila Sucupira não há esses mamíferos. O fechamento da barragem provoca uma redução drástica da fonte de alimentos das espécies piscívoras, com a mortandade de peixe pela diminuição do nível de oxigênio na água e o aumento do nível de gás sulfídrico, como ocorreu em Tucuruí 1984 e em Balbina 1987. (Magalhães et al, 1996).

A impossibilidade de desova dos peixes migratórios faz com que essas espécies desapareçam e haja a redução de habitat de várias espécies. A secagem de alguns lagos pela diminuição do volume de água à jusante da barragem destrói importantes áreas de reprodução de peixes. Para alguns mamíferos, tais como o peixe-boi, o pico de nascimento ocorre no período de enchentes, quando plantas aquáticas são mais abundantes e apresentam alto valor nutricional, brotos novos com baixo teor de fibras, e alto teor de carboidratos. Desta forma a fêmea ingere maior quantidade de alimento suprimindo as necessidades até o final da gestação e início da lactação. Com o fechamento das comportas, o volume de água à jusante da barragem torna-se muito baixo podendo secar esses lagos, provocando uma diminuição das plantas aquáticas que servem de alimento e local de proteção para algumas espécies. A montante da barragem o quadro é inverso; há uma proliferação descontrolada de macrófitas aquáticas, aumentando a oferta de alimento, mas reduzindo a penetração de luz e aeração da água (Magalhães et al, 1996).

Em relação aos aspectos sócio-econômicos, os principais impactos da implantação de uma usina hidrelétrica estão relacionados com a área a ser alagada, como a movimentação de populações, a perda de sítios históricos, a perda de áreas economicamente ativas (exemplos de pastos e áreas aráveis) e reservas ambientais (florestas). Também a diminuição da qualidade da água e o possível aumento da incidência de doenças são considerados como impactos sócio-econômicos. Os projetos desenvolvidos na Amazônia são alvos de muita crítica, em função de terem provocado o deslocamento de populações nativas e destruição do meio ambiente. (Darzé, 2002).

2.3. ASPECTOS LEGAIS

De acordo com a legislação brasileira, a classificação dos aproveitamentos hidrelétricos se divide em dois tipos; serviços públicos e uso exclusivo. Os aproveitamentos destinados aos serviços públicos são aqueles cuja energia elétrica gerada, independentemente da potência da usina, se destina ao uso geral, sendo para isso comercializada pelo seu produtor, ou seja, a concessionária de serviços públicos.

Os aproveitamentos destinados ao uso exclusivo são aqueles cuja energia elétrica gerada se destina ao uso exclusivo de seu produtor, que é denominado auto-produtor. Conforme a potência a ser instalada, a implantação depende de uma simples notificação, ou autorização federal, ou ainda de uma concessão federal (DNAEE/ELETROBRÁS 1985) e estabelece as seguintes faixas de potência para tal fim:

- até 50 kW , simples notificação
- de 50 kW até 150 kW, autorização
- acima de 150 kW , concessão

Os aproveitamentos hidrelétricos para uso exclusivo deverão ter a propriedade da área onde será construída a central, inclusive as inundadas pelo eventual reservatório, ou obter uma autorização dos proprietários ribeirinhos.

A notificação de operação referida é feita através de correspondência ao diretor geral da ANEEL, através de formulário padrão disponibilizado para registro de aproveitamento hidrelétrico (conforme "formulário ANEEL" em anexo).

Os aspectos institucionais e legais, de interesse à realização do Projeto Básico deverão ser considerados, desde o registro até a “aprovação do estudo” pela ANEEL e abrangem uma faixa ampla da legislação vigente, tendo como linhas mestras a “Constituição da República Federativa do Brasil”, de 1988, o “Código de Águas” – Decreto nº 24.263, de 10 de julho de 1934, Lei 8.987 de 13 de fevereiro de 1995, Lei 9.427 de 26 de dezembro de 1996 que instituiu a ANEEL e a legislação complementar. Entretanto, as microcentrais hidrelétricas não necessitam de tal aprovação por parte da ANEEL.

De acordo com a Constituição Federal, os potenciais de energia hidráulica constituem bens da União (Capítulo II, art. 20, inciso VIII).

De acordo, ainda, com a Constituição, compete à União explorar diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão, o aproveitamento energético dos cursos d'água, em articulação com os Estados onde se situam os potenciais hidroenergéticos (Capítulo II, art. 21, inciso XII, alínea b).

Do ponto de vista legal e dentro do escopo destas Diretrizes, que contempla usinas hidrelétricas com potência instalada entre 1 MW e 30 MW e com reservatório igual ou inferior a 3 km² (Resolução ANEEL 394/98), o Projeto Básico representa a condição para a obtenção da autorização/concessão para exploração do aproveitamento hidrelétrico. Entretanto, para microcentrais, apenas uma simples notificação é necessária.

A Lei nº 9.648, de 27/05/98, autoriza a dispensa de licitações para empreendimentos hidrelétricos de até 30 MW de potência instalada, para Autoprodutor e Produtor Independente. A concessão será outorgada mediante autorização, até esse limite de potência, desde que os empreendimentos mantenham as características de Pequena Central Hidrelétrica.

Em relação aos aspectos ambientais os procedimentos de licenciamento ambiental atuais são estabelecidos nas Resoluções CONAMA nos 001, de 23 de janeiro de 1986, e 237, de 19 de dezembro de 1997 e, para empreendimentos do setor elétrico, de forma complementar, na Resolução CONAMA nº 006, de 16 de setembro de 1987.

Especificamente para impactos ambientais de pequeno porte, a Resolução CONAMA 279 de 27 de junho de 2001, resolve que os procedimentos e prazos estabelecidos nesta resolução, aplicam-se, em qualquer nível de competência, ao licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental, aí incluídos:

- I - Usinas hidrelétricas e sistemas associados;
- II - Usinas termelétricas e sistemas associados;
- III - Sistemas de transmissão de energia elétrica (linhas de transmissão e subestações).
- IV - Usinas Eólicas e outras fontes alternativas de energia.

Para os fins desta Resolução, são adotadas definições padrão para obtenção da licença ambiental:

I - Relatório Ambiental Simplificado - RAS (segundo modelo CONAMA): os estudos relativos aos aspectos ambientais relacionados à localização, instalação, operação e ampliação de uma atividade, ou empreendimento, apresentados como subsídio para a concessão da licença prévia requerida, que conterá, dentre outras, as informações relativas ao diagnóstico

ambiental da região de inserção do empreendimento, sua caracterização, a identificação dos impactos ambientais e das medidas de controle, de mitigação e de compensação.

II - Relatório de Detalhamento dos Programas Ambientais: é o documento que apresenta, detalhadamente, todas as medidas mitigatórias e compensatórias e os programas ambientais propostos no RAS.

2.4. ANÁLISE DA MICROCENTRAL DE VILA SUCUPIRA

Na região transamazônica, em Vila Sucupira, município de Anapú-Pa, o projeto de implantação de uma Micro Central Hidrelétrica de potência nominal 50 kVA, se enquadra, segundo o Manual de Micro Centrais Hidrelétricas da Eletrobrás, em que se necessita apenas de uma simples notificação para o funcionamento, através de correspondência ao diretor geral da ANEEL, com preenchimento de formulário padrão disponibilizado para registro de aproveitamento hidrelétrico ("formulário ANEEL" em anexo). Vale resaltar que a potência de instalação é 50kW nominal, a maior parte do tempo a Micro Central irá operar com potências inferiores.

A micro central tem com finalidade suprir necessidades energéticas da comunidade, com o benefício de uma fábrica de polpa de frutas. Trata-se de uma micro central a fio d'água, onde a barragem não tem a finalidade de armazenamento de água, ou de regularização de vazão. O seu objetivo é de somente incrementar a altura de queda disponível no local e permitir a implantação da tomada d'água para a turbina. Assim, os impactos proveniente da formação de lagos não são pertinentes no caso do presente projeto.

Por se tratar de uma micro central de baixa potência, com características de baixa queda de aproveitamento, baixa altura de barragem, os impactos referentes a região serão também baixos. Os métodos e critérios para identificação dos possíveis impactos ambientais consistem nos estudos realizados tais como, levantamento da curva de permanência, avaliação expedita da curva chave, levando em consideração os dados pluviométricos históricos, bem como estudos topográficos e simulação das cotas de água para as configurações distintas, com e sem barragem para as respectivas permanências, conforme procedimentos descritos nos relatórios, em anexo, "Estudo "Hidroenergético" e "Análise_área_de_Inundação", partes integrantes do presente relatório.

Foram realizados estudos e metodologias para simulações em 3D das cotas correspondentes as permanências do igarapé, para avaliação e constatação dos mínimos impactos causados pela implantação da pequena barragem de 50kVA a fio d'água na região

transamazônica. A partir de levantamentos topográficos da região, especificamente do local de implantação da barragem (igarapé São João), podemos criar a superfície em 3D (ver figura 5), através do software "Datageosis 2.3".

Para cálculo da área de inundação, foram adicionados no software variáveis correspondentes as cotas de d'água, baseado em estudos realizados ("Estudo Hidroenergético" em anexo) da curva de permanência e curva chave, com isso relacionou-se as cotas d'água com as permanências.

Níveis correspondentes às cotas tais como; casa de máquinas, pequena barragem, tubo de adução foram simulados juntamente com o regime de cota d'água e visualizado em 3D. Foram adicionados no software mais de 4000 pontos manualmente, referentes às variáveis envolvidas.

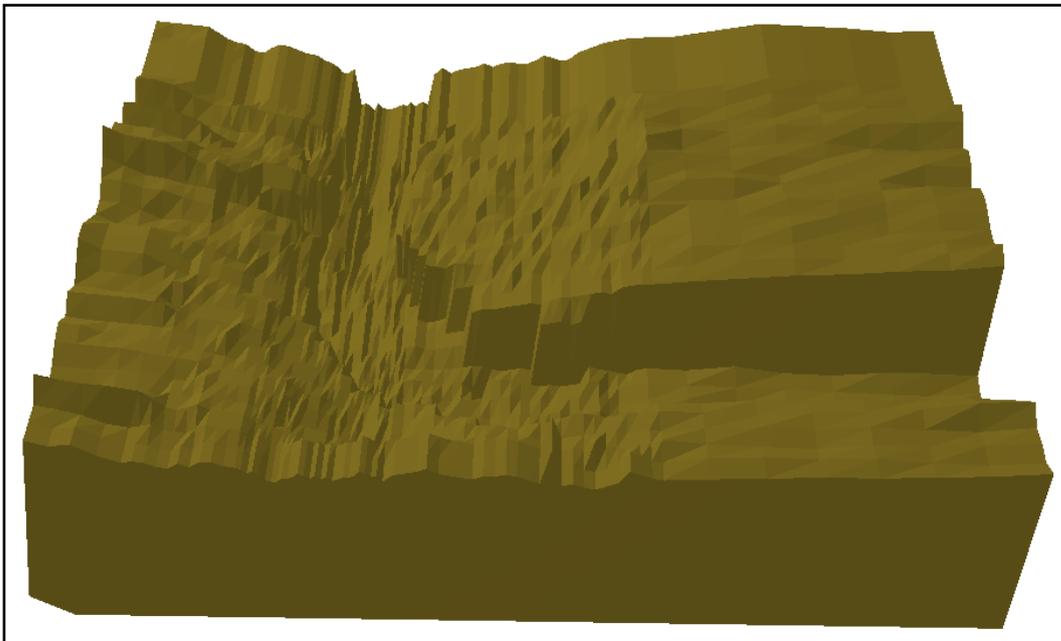


Figura 5. Topografia do Sítio da MCH Vila Sucupira.

Para o cálculo da área de inundação correspondente as permanências foi necessária a simulação do regime do rio "sem barragem" e "com barragem". No regime sem barragem, calculou-se a área de inundação correspondente as permanências com barragem e calculou-se a área correspondente a montante e jusante. Com isso a subtração da área sem barragem e com barragem, nos dá a área inundada do pequeno empreendimento, com isso finalizando a metodologia e partindo para o tratamento dos resultados, conforme ilustrado na figura 6. As áreas de inundação são apresentadas a seguir (detalhes em anexo).

Para 42,62 da Curva de Permanência, $A_i = 427,551 \text{ m}^2$

Para 70 % da Curva de Permanência, $A_i = 175,888 \text{ m}^2$

Para 3.3 % da Curva de Permanência, $A_i = 617,991 \text{ m}^2$

Para cheia máxima, $A_i = 1282,807 \text{ m}^2$

A partir deste estudo, verifica-se que a área inundada pela pequena contenção a ser introduzida no leito do igarapé São João é muito pequena. Para a vazão de projeto, ocorrendo em mais de 9 (nove) meses, o valor desta área é menor que a área de uma piscina olímpica, o que demonstra a sua pouca influência na configuração natural do igarapé.

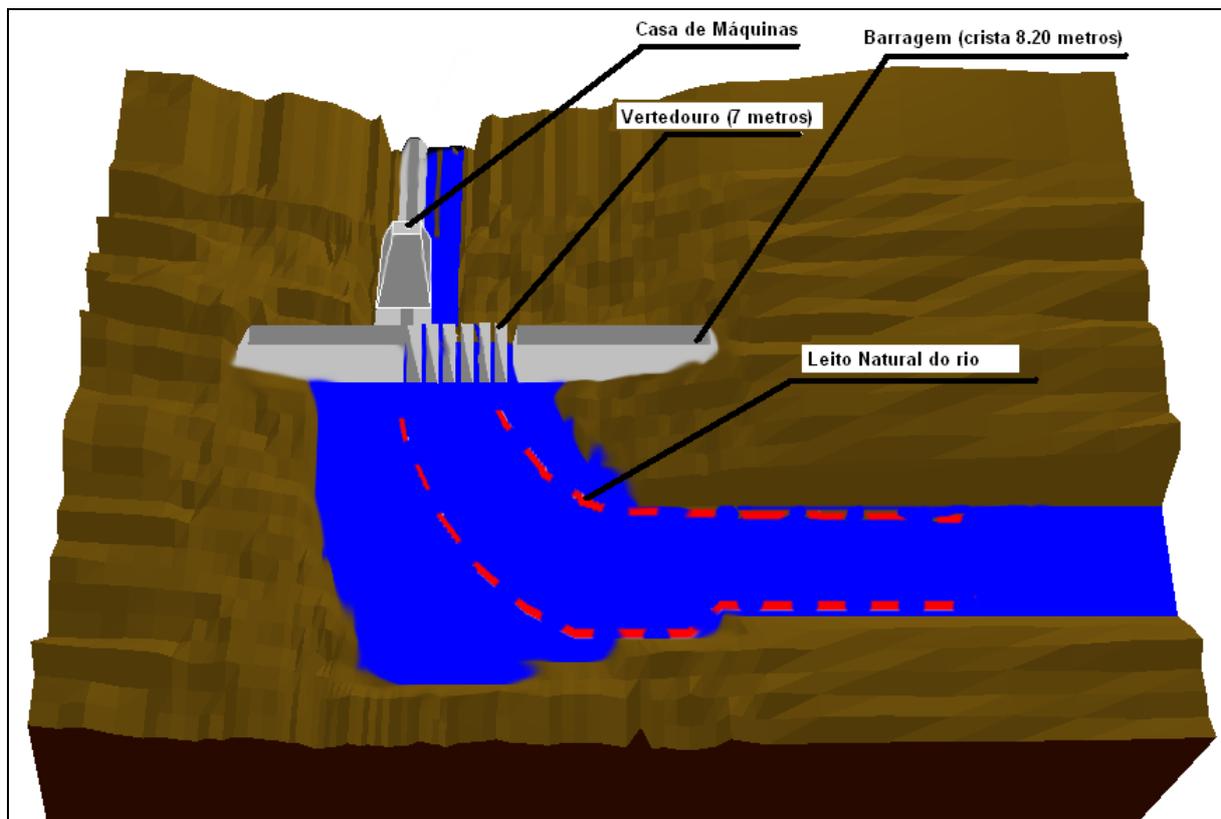


Figura 6. Estudo da área de inundação do Sítio da MCH Vila Sucupira.

Para as maiores vazões, conforme cálculo para 3,3% da curva de permanência, significando uma ocorrência menor do que um mês, a área inundada é somente um pouco maior que a área de uma piscina olímpica.

Portanto, considera-se que a contenção da água do igarapé criada pela MCH Vila Sucupira é desprezível, sendo, assim, não significantes os impactos ambientais associados.

3- MEDIDAS MITIGADORAS E COMPENSATÓRIAS

3.1. ASPECTOS GERAIS

Várias medidas de mitigação são criadas e implementadas por indústrias, dentro do contexto de projetos de aproveitamentos hidrológicos em todo mundo. Vários projetos requerem o compartilhamento das responsabilidades públicas e agentes comunitários locais. Neste contexto categorias de medidas sociais e ambientais de mitigação geralmente estão ligados a projetos de hidroelétricas (Trussart et al, 2002).

- Impactos Biológicos, físicos e químicos
- Impactos Sócio-econômicos

Os impactos biológicos e físicos apresentam medidas de mitigação de sucesso, em relação a vida aquática, temos medidas para o desenvolvimento de comunidades de peixe e pescas em reservatórios:

- Criação de condições para habitat de espécies;
- Criação de espécies comerciais que são bem adaptadas para reservatórios;
- Vias de acesso, rampas e áreas de aterrissagem;
- Implantação de tecnologias de viveiro;
- Sistema de comercialização de peixes (mini-cooperativa).

Em relação a qualidade da água:

A qualidade da água e a redução do nível de oxigênio somente é comprometida de acordo com a escala da área de inundação, e relaciona com a cota de água. A montante com o fechamento da barragem há uma proliferação descontrolada de macrófitas aquáticas, aumentando a oferta de alimento, mas reduzindo a penetração de luz e aeração da água, e a jusante o volume de água torna-se baixo, provocando a diminuição das plantas aquáticas. Um

projeto de Central Hidrelétrica bem realizado reduz significativamente os problemas referente a qualidade da água. (Trussart et al, 2002)

3.2. CASO MCH DE VILA SUCUPIRA

O projeto da MCH Vila Sucupira apresenta uma área inundada muito pequena, conforme estudos realizados (em anexo). As diferenças de níveis de água com barragem e sem barragem para uma permanência de 70% (projeto), são pequenas, e conforme as simulações realizadas, não ultrapassam o nível do leito do rio caracterizado em cheia máxima natural, ou seja sem barragem. Devido as diferenças pequenas de níveis, não teríamos implicações em relação à qualidade da água.

A MCH Vila Sucupira trata-se uma microcentral a fio d'água, onde a barragem não tem a finalidade de armazenamento de água, ou de regularização de vazão. O seu objetivo é de somente incrementar a altura de queda disponível no local e permitir a implantação da tomada d'água para a turbina. Assim, os impactos provenientes da formação de lagos não são pertinente no caso do presente projeto.

Os impactos sócio-econômicos são muito pequenos, de acordo com estudos de cálculo de área inundada. A área de inundação para permanência de 70% , é 175,88 m² , o que não representa de forma alguma deslocamento de populações, e mesmo em cheia máxima, não temos absolutamente nenhum problema referente aos impactos sócio-econômicos.

O igarapé São João apresenta em 30% do seu tempo apresentando NA em torno de 0,6 metros, e apresenta algumas "barreiras" naturais, ou seja um estreitamento do curso de água, impedindo de forma natural, a migração de espécies de peixes. A construção da pequena barragem contribuirá para o desenvolvimento da comunidade, com a criação de peixes , com isso criação de uma cooperativa para comercialização de peixes. Em relação a mamíferos aquáticos relatados no texto, na região de implantação da Micro Central não temos mamíferos tais como peixe boi, boto tucuxi e boto vermelho, entre outros, e mesmo que existissem não teriam condições favoráveis para sua sobrevivência, devido os regimes naturais de cota d'água do igarapé na maior parte do tempo serem extremamente baixos.

Finalmente, a pequena barragem de contenção permitirá, caso a comunidade julgue necessário, a criação de peixes, gerando mais benefícios. Também as atividades de lazer podem ser implementadas nesta área, já que na região, excetuando o futebol e as poucas festas, são poucas oportunidades de entretenimento para a população local.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do presente estudo, considera-se que o impacto da implantação da MCH Vila Sucupira sobre o meio ambiente é muito baixo, sendo que no aspecto sócio-econômico apresenta grandes benefícios para a sociedade local.

Este empreendimento, sendo uma conseqüência do anseio da sociedade, já traz consigo um dos pilares da base do desenvolvimento sustentável, que é a participação comunitária. Aliado com o baixo impacto ambiental e com o impacto econômico positivo sobre a sociedade local, pode-se considerá-lo como um empreendimento adequado para possibilitar o desenvolvimento sócio-econômico, sem prejuízo ao meio ambiente.

Por outro lado, este projeto, sob o ponto de vista tecnológico, é de grande importância para a comunidade científica, pois permite o uso efetivo de tecnologia moderna para pequenas microcentrais axiais de baixa-queda e a sua análise comparativa com o desenvolvimento local de ferramentas para projeto completo de microcentrais desta natureza.

Finalmente, a implantação deste projeto representará um marco para a luta incessante dos pequenos produtores rurais da Amazônia, em especial para as muitas famílias ao longo da transamazônica, onde ainda o império dos grileiros predomina sobre o trabalhador do campo, como sustentava Irmã Dorothy.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TRUSSART, S. , MESSIER, D., ROQUET,V., AKI, S., "*Hidropower Projects: a Review of Most Effective Mitigation Measures*". Energy Policy, v 30, p 1251-1259,

2002
KLIMPT, J.E., RIVERO,C., PURANEN, H., KOCH, F., "*Recommendations for Sustainable Hydroelectric Development*". Energy Policy, v 30, p 1305-1312, 2002.

MAGALHÃES, S.B, BRITO, RC e CASTRO, E.R, "Energia na Amazônia"vol I UFPA/MPEG/UNAMAZ , 1996.

PEREIRA DARZÉ, A.S.S., "*A questão Ambiental como fator de desestímulo ao investimento no setor privado de geração de energia hidrelétrica no Brasil*", Dissertação (mestrado em administração), UFBA/ Universidade Federal da Bahia, Salvador 2002.

SOUZA, W. L. "*Impacto Ambiental de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa de Duas Abordagens*". Dissertação (Mestrado em Ciências). COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

DNAEE / ELETROBRÁS. Manual de Minicentrals Hidrelétricas. Brasília, 1985.

ELETROBRÁS, Diretrizes para projetos de implantação de pequenas centrais hidrelétricas. Rio de Janeiro, 2000.

ANEXO II

***RELATÓRIO DOS TESTES REALIZADOS NO GERADOR DE ENERGIA
ELÉTRICA DO CURSO ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO PARÁ***

BELÉM/2005

INDICE

- 1- Objetivo
- 2- Equipamento Testado
- 3- Instrumento de Medição
- 4- Procedimentos de Teste
- 5 – Teste do Gerador à Vazio
- 6 – Teste do Gerador com Carga
- 6.1 – Carga Utilizada
- 7 – Conclusão

1. Objetivo

O presente relatório tem o objetivo de apresentar os resultados dos testes realizados do gerador de energia elétrica que futuramente será utilizado em uma turbina, movida a queda d'água na cidade de Anapú, estado do Pará.

Os testes se dividiram em duas fases, sendo que na primeira o gerador trabalhou a vazio e na segunda aplicaram-se cargas tanto monofásicas como trifásicas.

No final do relatório conclusões são obtidas com base nos testes realizados no gerador.

2. Equipamento Testado

O gerador testado possui as seguintes características:

Tipo: Síncrono, Brushless

Fabricante: Marathon Electric

Model: 362S1355

Serial: LM-179319-0295

Trifásico

FP: 1

RPM: 1600 Hz

P: 50KW

Q: 50KVA

V: 115V(1 ϕ)/230V(3 ϕ)

A: 145/125A

A figura abaixo mostra o gerador no local de teste



Figura 1 – Gerador submetido à teste

3. Instrumento de Medição

Foi utilizado para a medição das grandezas elétricas o Analisador de Qualidade de Energia do fabricante Fluke, modelo Fluke 43B, monofásico, que admite uma tensão máxima de 600V e uma corrente máxima de 500A. Este equipamento mede tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, potência aparente, harmônicos, em tempo real e disponibiliza os dados através de conexão com o computador a partir de uma conexão serial e software do fabricante.

Na Figura 2 pode-se ver em destaque o Analisador de Qualidade de Energia, Fluke 43B, realizando coleta de dados durante os testes. Ao lado, encontra-se o regulador de tensão (excitatriz) que foi utilizado fornecer a corrente de campo do gerador.



Figura 2 – Conjunto regulador de tensão e Fluke 43B

4. Procedimentos de Teste

Para a realização do teste no gerador, não foi possível acoplar a turbina pois seria necessário um reservatório de água, além de uma queda de água e de um conduto forçado específico para fazer girar a turbina que acionaria o gerador.

Como um teste deste tipo é inviável, optou-se pela substituição da turbina e da queda de água por um motor de grande porte que possuísse um torque capaz de manter o gerador na sua frequência nominal de 1600RPM.

O motor diesel disponibilizado tinha aproximadamente 120KW, atendendo com folga a potência do gerador de 50KW em sua frequência nominal.

No acoplamento entre o gerador e o motor diesel foi utilizado uma luva elástica conforme é mostrado nas figuras abaixo.



Figura 3 – Gerador e motor diesel

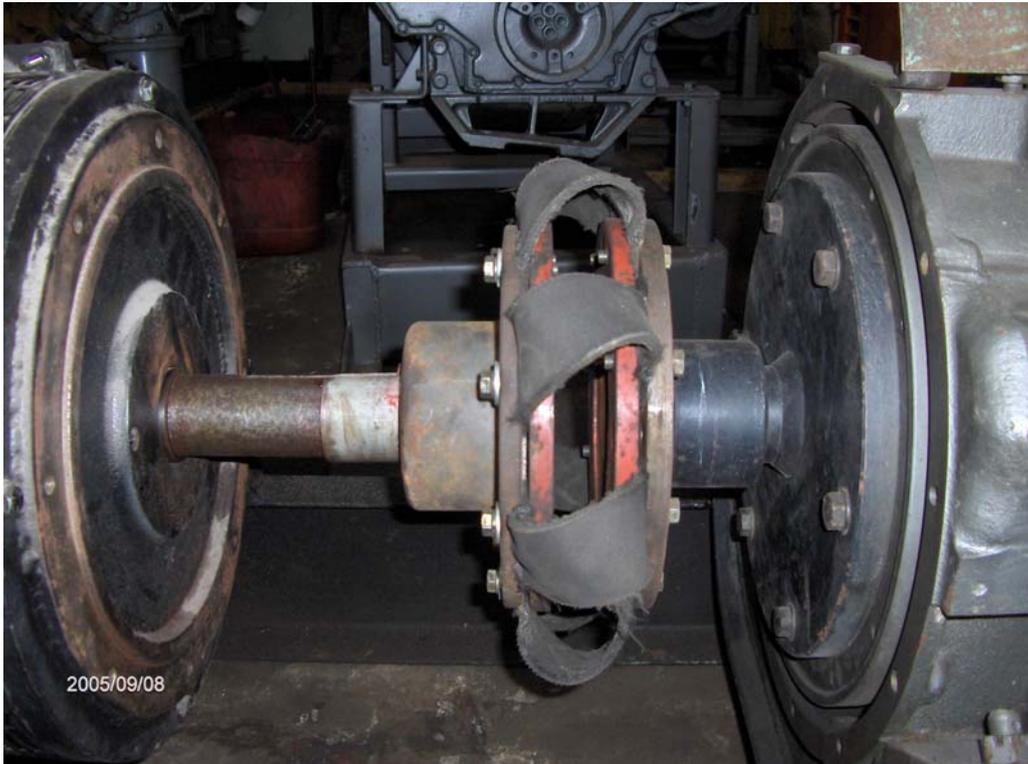


Figura 4 – Acoplamento entre motor diesel e gerador

5. Teste do gerador a vazio

O principal objetivo do teste a vazio é a verificação da forma de onda bem como o valor RMS da tensão entre fases e fase e neutro, com o gerador na sua frequência nominal e sem nenhuma carga acoplada em seus terminais.

Em todas as medidas realizadas entre fases, a forma de onda da tensão possuiu a forma de onda senoidal, conforme é apresentado nas figuras abaixo.

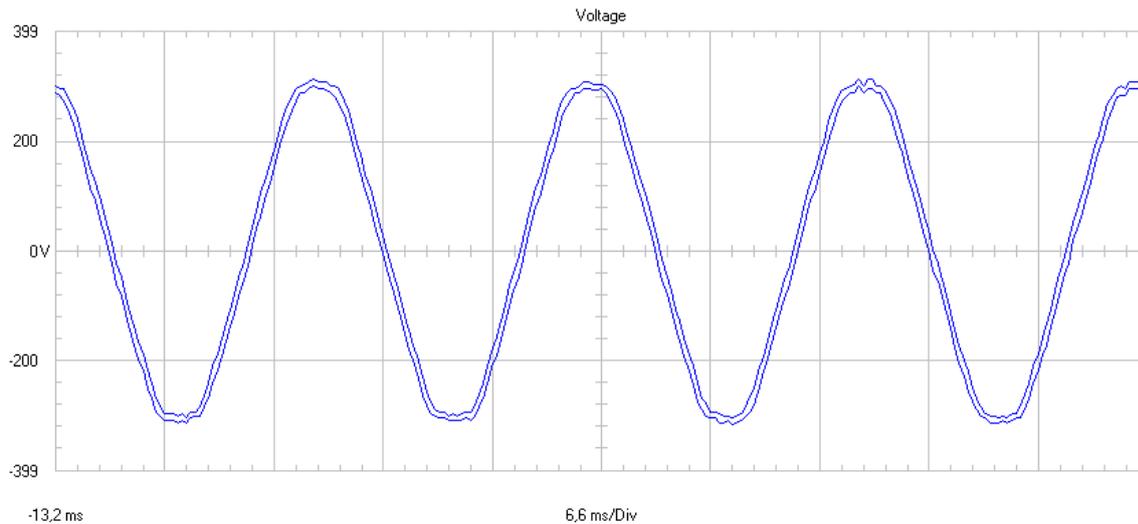


Figura 5 – Forma de onda da tensão entre fases A e B a vazio

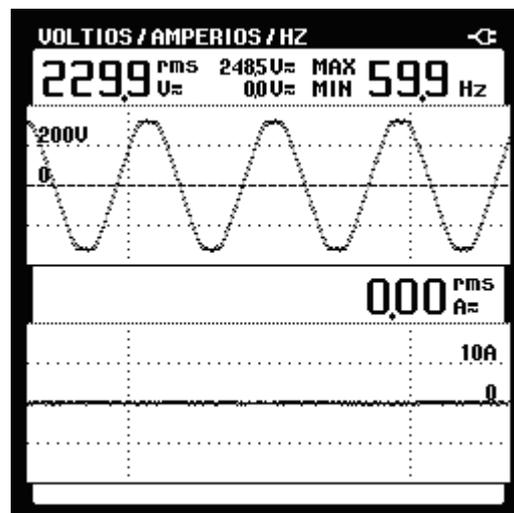


Figura 6 – Tensão entre fases A e C a vazio e frequência da tensão

Na Figura 7 encontra-se o gráfico realizado entre a fase A e o neutro. Já na Figura 8 pode ser visto a forma de onda senoidal, bem como o valor da tensão RMS e a frequência das medições realizadas entre a fase B e o neutro.

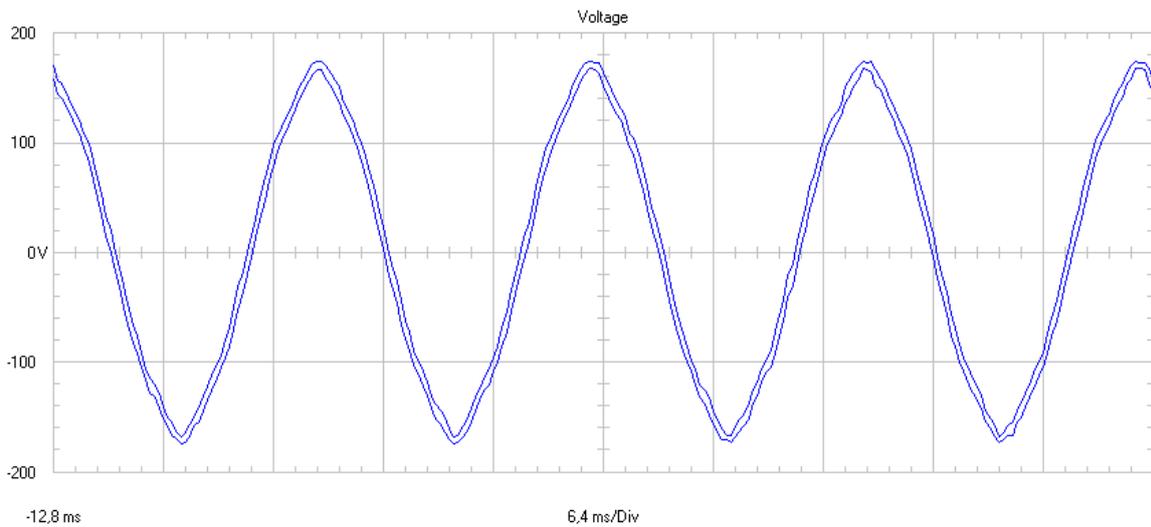


Figura 7 – Forma de onda da tensão entre a fase A e o neutro

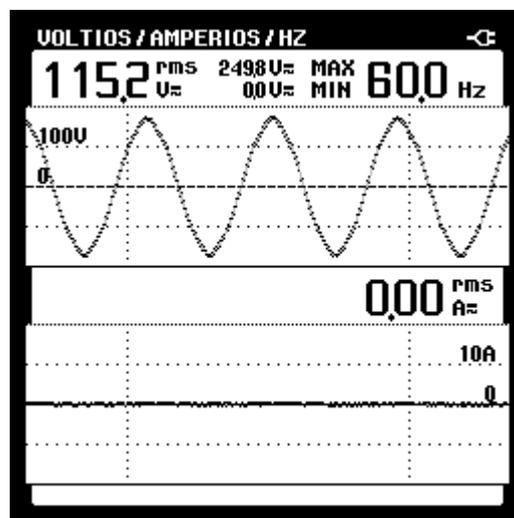


Figura 8 – Tensão entre a fase B e o neutro

6. Teste do gerador com carga

O objetivo do teste do gerador com carga é avaliar as condições de operação em regime permanente do gerador trabalhando nas condições nominais de corrente, tensão e potência. Durante os testes foram analisadas também as temperaturas tanto dos enrolamentos quanto da carcaça do gerador a fim de avaliar possíveis aquecimentos.

Os testes com carga se realizaram em duas etapas. Na primeira, o gerador alimentou uma carga trifásica, sem neutro, que teve por principal objetivo testar o fornecimento de corrente nas três fases ao mesmo tempo.

No segundo teste foi feita simulação de uma carga monofásica para testar o gerador quando submetido à solicitação de carga em apenas uma fase. Este teste também foi importante para se chegar a corrente nominal expressa nos dados de placa.

6.1 Carga utilizada

Foi utilizada como carga uma cuba eletrolítica, que consisti em um tanque de 1000L (mil litros) de água, onde na parte superior foi colocado um suporte contendo três placas de cobre que eram baixadas através de um elevador comandado por manivela. A carga era variada colocando-se sal dentro do tanque, de modo que quanto mais sal era colocado dentro do tanque maior era a corrente de eletrólise da cuba e maior era a corrente solicitada pelo gerador. O esquema utilizado pode ser visto nas figuras abaixo.



Figura 9 – Ponta de cobre da carga eletrolítica



Figura 10 – Manivela de movimentação



Figura 11 – Configuração de carga trifásica

Na figura 12 pode ser visto a forma de onda da tensão, da corrente e da frequência entre as fases A e C em um dos testes realizados utilizando a cuba eletrolítica como carga trifásica. Já na Figura 13 tem-se a forma de onda da tensão entre as fases A e B.

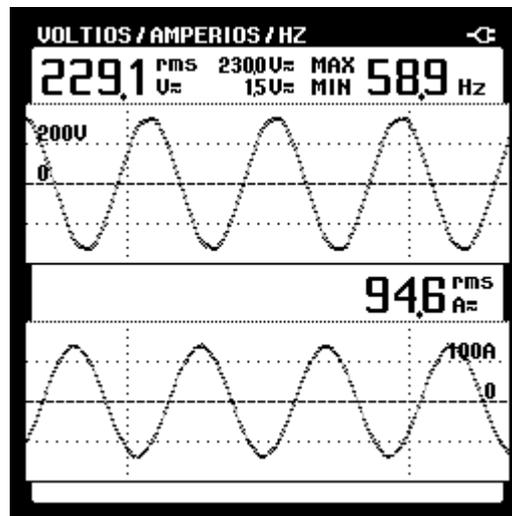


Figura 12 – Forma de onda da tensão e corrente entre as fases A e C com carga

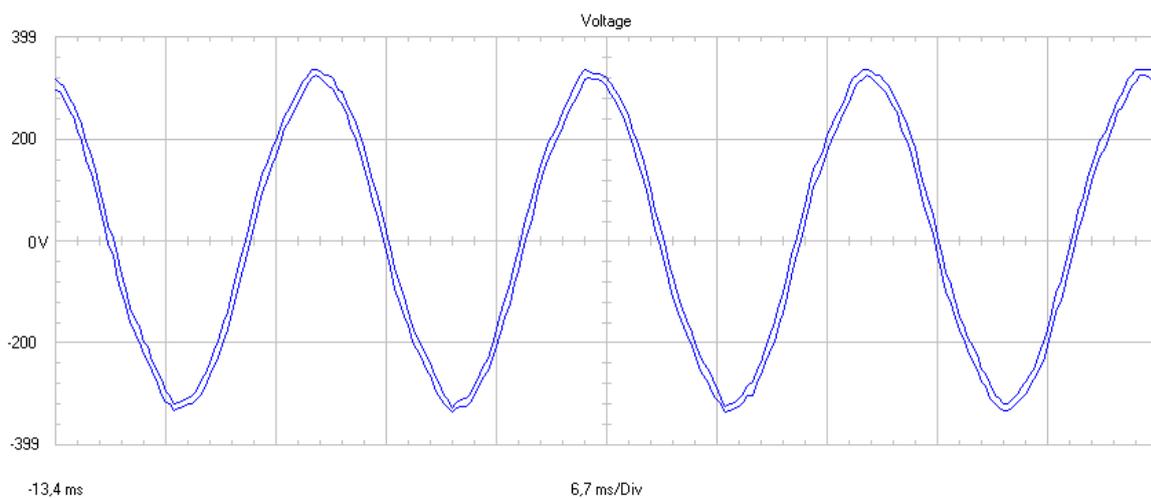


Figura 13 – Forma de onda da tensão entre as fases A e B com carga

Na Figura 14 é observada a variação da tensão, da corrente e da frequência ao longo de 13 minutos e 27 segundos para as fases B e C. Pode-se verificar que a tensão se mantém estável por volta de 230V, durante os acréscimos de carga até o valor nominal de 130A e que a frequência sofreu poucas variações, explicadas pelo fato da carga eletrolítica ser aumentada aos poucos, e que a excitatriz era ajustada manualmente.

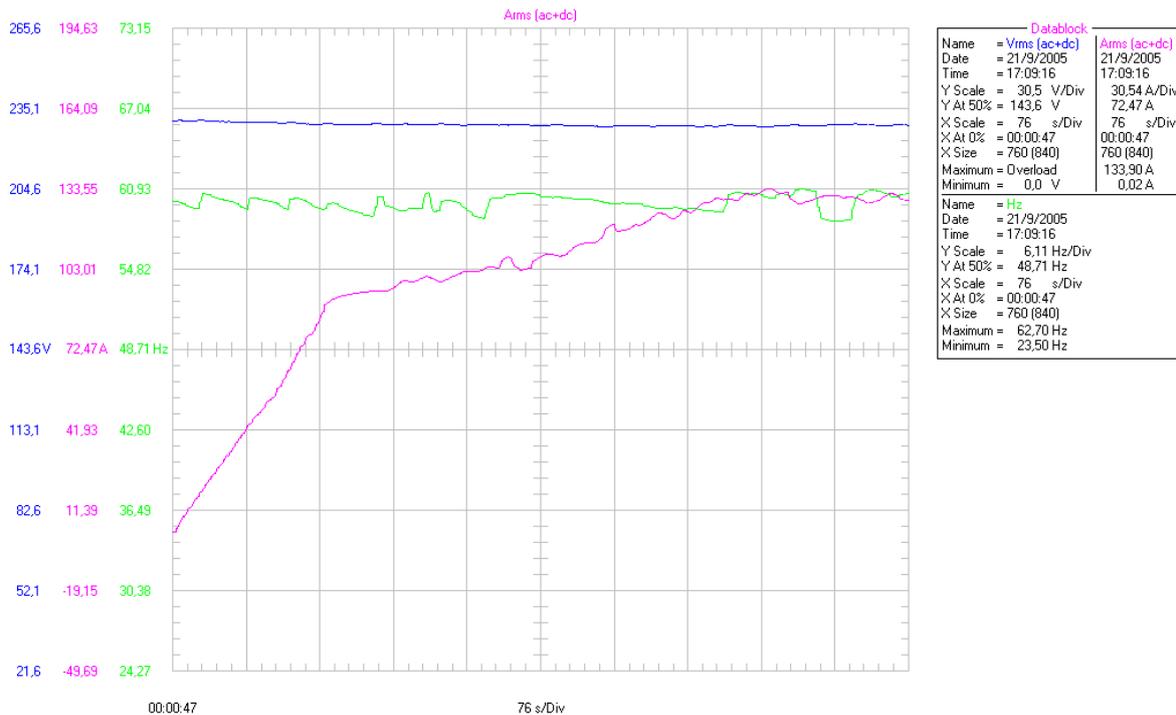


Figura 14 – Medição feita entre as fases B e C

Na segunda parte dos testes foi realizada a simulação de uma carga monofásica. Na figura 15 encontra-se o resultado dos testes realizados, onde pode ser vista a tensão RMS, corrente RMS e frequência ao longo de aproximadamente 20 minutos. A tensão permanece praticamente constante ao longo da simulação por volta de 115V, assim como a frequência que teve pequena variação e ficou em torno de 60Hz. A corrente subiu gradativamente até atingir aproximadamente. É importante salientar que mesmo com a corrente assumindo valores acima de 200A (sobrecarga) os cabos e as conexões do gerador se comportaram muito bem, apresentam um aquecimento suportável. Já o gerador não apresentou nenhum aquecimento expressivo.

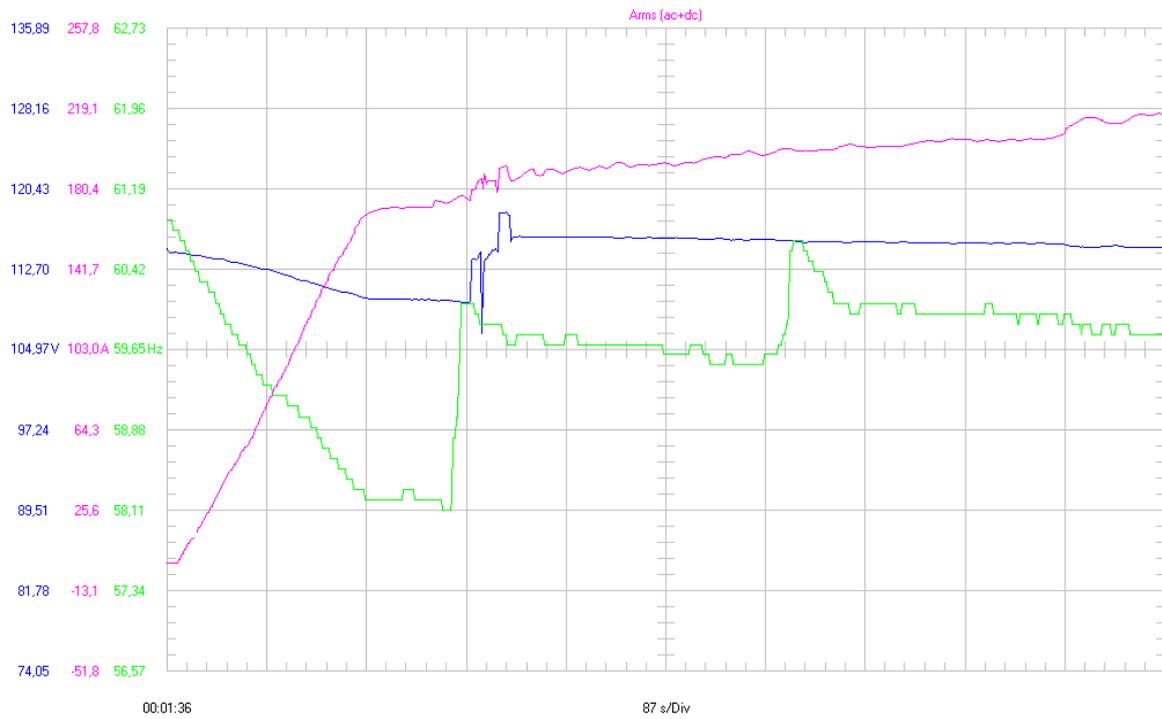


Figura 15 – Medições feitas simulando uma carga monofásica

7. Conclusão

Com relação ao teste a vazio, a tensão no gerador tanto no que diz respeito à forma de onda como o valor RMS, apresentou um desempenho satisfatório, de acordo com os gráficos apresentados.

No que se refere ao teste com carga nominal, o gerador forneceu corrente nominal sem apresentar problemas no que diz respeito a aquecimento, vibração, distorção, etc. As variações de frequência observadas são normais e eram corrigidas durante os testes manualmente.

Pode-se concluir após a análise dos diversos testes realizados no gerador que o mesmo se encontra em perfeito estado, o que o habilita a ser utilizado na geração de energia elétrica por um longo período de tempo como hidrogerador em sua pequena central hidrelétrica ao qual foi destinado.