



Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Recursos Naturais da Amazônia

CONTRIBUIÇÕES PARA A OTIMIZAÇÃO DO USO DE TURBINAS AXIAIS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE BAIXA QUEDA DA AMAZÔNIA

Marco Valério de Albuquerque Vinagre

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientadores: Claudio José Cavalcante Blanco
André Luiz Amarante Mesquita

Belém
Outubro de 2010

CONTRIBUIÇÕES PARA A OTIMIZAÇÃO DO USO DE TURBINAS AXIAIS EM
PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE BAIXA QUEDA DA AMAZÔNIA

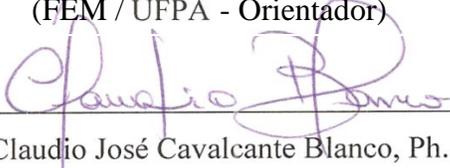
Marco Valério de Albuquerque Vinagre

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA
DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:



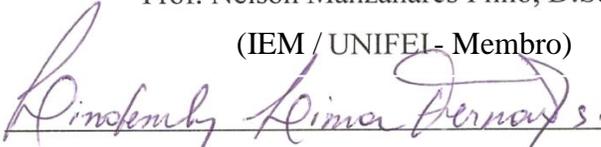
Prof. André Luiz Amarante Mesquita, Dr.Ing.
(FEM / UFPA - Orientador)



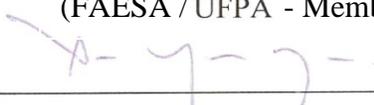
Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph. D.
(FAESA /UFPA - Orientador)



Prof. Nelson Manzanares Filho, D.Sc.
(IEM / UNIFEL- Membro)



Prof. Lindemberg Lima Fernandes, D.Sc.
(FAESA / UFPA - Membro)



Prof. André Augusto Azevedo Montenegro Duarte, D.Sc.
(FEC / UFPA - Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

OUTUBRO DE 2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Instituto de Tecnologia/Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia

Vinagre, Marco Valério de Albuquerque

Contribuições para a otimização do uso de turbinas axiais em pequenas centrais hidrelétrica de baixa queda da Amazônia / Marco Valério de Albuquerque Vinagre; orientador, Claudio José Cavalcante Blanco, André Luiz Amarante Mesquita. _ 2010.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, 2010.

1. Usinas hidrelétricas - Amazônia. 2. Modelagem hidrológica - Amazônia. 3. Recursos naturais. I. Título.

CDD - 22. ed. 621.312134098115

DEDICATÓRIA

A minha querida esposa e filhas, Socorro, Nicole, Natália e Nádia, pela compreensão e apoio. A meus queridos pais Carlos (in memoriam) e Flor, pelo amor e estímulo aos estudos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre abençoar a minha vida.

Aos Profs. Claudio Blanco e André Mesquita, pela amizade e orientação esclarecedora e segura nesses quatro anos de aprendizado e pesquisa.

Ao Prof. Nelson Manzanares pelas sólidas contribuições técnicas.

Aos Profs. André Montenegro e Lindemberg pelas sugestões que resultaram em importantes melhorias de conteúdo da tese.

Ao Prof. Emanuel Negrão pela dedicação ao PRODERNA. Ao Prof. João Nazareno Nonato Quaresma pelas melhorias na revisão.

Aos professores e amigos do PRODERNA e da UFPA, pelo convívio intelectualmente vigoroso e estimulante desses agora saudosos anos.

Muito obrigado.

A inspiração é divina, o labor é humano.

Autor.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFGA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Eng.)

CONTRIBUIÇÕES PARA A OTIMIZAÇÃO DO USO DE TURBINAS AXIAIS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE BAIXA QUEDA DA AMAZÔNIA

Marco Valério de Albuquerque Vinagre

Outubro/2010

Orientadores: Claudio José Cavalcante Blanco e André Luiz Amarante Mesquita

Área de Concentração: Uso de Recursos Naturais

Na presente tese foi desenvolvido um modelo hidrológico não-linear simples com fator de ganho sigmoidal adequado à simulação de curvas de permanência de vazões de pequenas bacias da Amazônia. Tais curvas são necessárias ao desenvolvimento de estudos e projetos de aproveitamentos hidroenergéticos. Estudou-se também a otimização técnico-econômica de pequenas centrais hidrelétricas (PCH) dotadas de duas turbinas axiais operando em paralelo. A partir de uma bacia real, foram simuladas curvas de permanência semelhantes para bacias sintéticas de mesma queda. Com o auxílio do programa TURBNPRO, foi obtida a curva de carga de uma turbina hidráulica axial real, cuja vazão ótima de projeto foi assumida ser igual a $Q_{95\%}$ da bacia sintética. Assim, foram estudadas a influência do tipo de regulagem e a relação das potências das turbinas $P2/P1$ sobre a eficiência energética da PCH. O empreendimento dotado de turbinas com regulagem dupla apresentou eficiência de 80%, com regulagem somente do rotor, 72% e com regulagem apenas do distribuidor, 65%. Também foram estudados três cenários de mercado: desaquecido, neutro e aquecido. Os melhores resultados técnico-econômicos foram obtidos para PCHs com turbinas semi-Kaplan, potência total da ordem de 30MW, relação $P2/P1=1$, mercado desaquecido (custos de implantação 30% menores e deságio de 30% sobre o MWh), resultando os seguintes valores: Período de retorno de três anos e Rentabilidade de 178%.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFGA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

CONTRIBUTIONS FOR THE OPTIMIZATION OF THE USE OF AXIAL TURBINES ON SMALL HYDRO POWER PLANTS OF THE AMAZON

Marco Valério de Albuquerque Vinagre

October/2010

Advisors: Claudio José Cavalcante Blanco and André Luiz Amarante Mesquita

Research Area: Use of Natural Resources

In this thesis, a simple nonlinear deterministic concentrated rainfall-runoff model was developed, with sigmoid-variable gain factor, appropriate to the production of flow duration curves (FDC) of small basins of the Amazon. Such curves are needed to develop studies and projects of hydro-energy exploitations. Technical-economic optimization of small hydropower plants (SHP) equipped with two axial turbines operating in parallel was studied. From a real small basin, FDC for synthetic basins of the same net head were simulated. The load curve of a real turbine was produced with the help of the software TURBNPRO, whose optimum design flow was assumed as $Q_{95\%}$ of the synthetic basin. The influence of turbine regulation and output power ratio $P2/P1$ on SHP energy efficiency was studied. The efficiency of SHP equipped with Kaplan turbines was founded 80%, with semi-Kaplan turbines only 72% and propeller turbines just 65%. Three market scenarios were studied: sluggish, neutral and warm. The best technical and economical results were obtained for SHP with semi-Kaplan turbines, total power of around 30MW, $P2/P1=1$, sluggish market (deployment costs 30% lower and 30% discount on the MWh price) resulting the following values: Return period of three years, Profitability of 178%.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO | 1 |
| 1.2 PROBLEMA ESTUDADO..... | 2 |
| 1.3 REVISÃO DA LITERATURA | 4 |
| 1.3.1 Introdução | 4 |
| 1.3.2 Modelagem hidrológica | 5 |
| 1.3.3 Aspectos tecnológicos | 5 |
| 1.3.4 Aspectos econômico-financeiros | 6 |
| 1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA | 7 |
| 1.4.1 Objetivo Geral | 7 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos | 7 |
| 1.5 METODOLOGIA | 7 |
| 1.5.1 Caracterização básica | 7 |
| 1.5.2 Investigação | 7 |
| 1.5.3 Coleta dos dados | 8 |
| 1.5.4 Tratamento dos dados | 8 |
| 1.5.5 Resultados..... | 8 |
| 1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE | 8 |
| CAPÍTULO 2 - SÍNTESE DA TESE | 11 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 2.2 A IMPORTÂNCIA DAS PCH PARA AS COMUNIDADES ISOLADAS DA AMAZÔNIA | 14 |
| 2.3 CONTRIBUIÇÕES PARA A MODELAGEM HIDROLÓGICA E OTIMIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DO USO DE TURBINAS AXIAIS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE BAIXA QUEDA NA AMAZÔNIA..... | 14 |
| 2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 17 |
| 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 24 |
| CAPÍTULO 3 - A IMPORTÂNCIA DAS CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS PARA A SUSTENTABILIDADE DAS COMUNIDADES ISOLADAS DA AMAZÔNIA | 26 |
| 3.1 POLÍTICA PÚBLICA PARA ENERGIA ELÉTRICA | 26 |
| 3.2 SUSTENTABILIDADE | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO DO MILÊNIO DA ONU | 27 |
| 3.4 O SETOR BRASILEIRO DE ENERGIA ELÉTRICA | 30 |
| 3.5 TÓPICOS SOBRE HIDROLOGIA E TECNOLOGIA DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM PEQUENAS BACIAS DA AMAZÔNIA | 35 |
| 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 37 |
| CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÃO DE CURVAS DE PERMANÊNCIAS DE PEQUENAS BACIAS DA AMAZÔNIA COM O USO DE MODELO CHUVA-VAZÃO NÃO-LINEAR COM FATOR DE GANHO SIGMOIDAL | 39 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 39 |
| 4.2. PEQUENA BACIA TESTE | 40 |
| 4.3 METODOLOGIA | 43 |
| 4.3.1 O modelo chuva vazão linear simples (MLS) | 43 |
| 4.3.2 Modelo de Fator de Ganho Sigmoidealmente Variável (MSV) | 46 |
| 4.3.2.1 Função sigmoideal | 46 |
| 4.3.2.2 Função auxiliar chuva ponderada $z(t)$ | 48 |
| 4.3.2.3 A função auxiliar estado de umidade do solo $u(t)$ | 49 |
| 4.3.2.4 Resposta impulsional | 50 |
| 4.3.2.5 Fluxograma do MSV | 50 |
| 4.3.3 Critérios de desempenho | 51 |
| 4.3.4 Resultados | 52 |
| 4.3.4.1 Calibração do modelo | 52 |
| 4.3.4.2 Validação do modelo | 55 |
| 4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DO MSV COM OS DO MLS | 56 |
| 4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MSV | 58 |
| 4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 61 |
| CAPÍTULO 5 - ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DO USO DE DUAS TURBINAS AXIAIS EM PEQUENAS CENTRAIS DE BAIXA QUEDA NA AMAZÔNIA | 64 |
| 5.1 INTRODUÇÃO | 64 |
| 5.2 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS DE FLUXO AXIAL | 68 |
| 5.2.1 Faixa de aplicação das turbinas hidráulicas segundo a rotação específica | 68 |
| 5.2.2 Tipos de turbinas hidráulicas de fluxo axial | 69 |
| 5.2.3 Triângulos de velocidade | 73 |

| | |
|---|------------|
| 5.2.4 Faixa de operação das turbinas hidráulicas axiais | 75 |
| 5.2.5 Códigos computacionais utilizados para geração das curvas características das turbinas | 77 |
| 5.2.5.1 CARTHA | 77 |
| 5.2.5.2 TURBNPRO | 81 |
| 5.2.6 Princípios de semelhança aplicados a turbinas | 83 |
| 5.2.7 Curvas de permanência de vazões escalonadas | 86 |
| 5.2.8 Cálculo da energia disponível de uma bacia | 87 |
| 5.2.9 Modo de operação das duas turbinas | 88 |
| 5.2.10 Eficiência energética da PCH | 89 |
| 5.3 MÉTODO E MATERIAIS | 92 |
| 5.3.1 Método | 92 |
| 5.3.2 Materiais | 94 |
| 5.4 APLICAÇÃO | 94 |
| 5.4.1 Entrada de dados no TURBNPRO | 94 |
| 5.4.2 Resultados do TURBNPRO | 98 |
| 5.4.2.1 Turbina Kaplan | 98 |
| 5.4.2.2 Turbina semi-Kaplan..... | 103 |
| 5.4.2.3 Turbina Hélice | 106 |
| 5.4.3 Bacias sintéticas | 111 |
| 5.4.4 Cálculo da energia disponível | 114 |
| 5.4.5 Eficiência energética da PCH | 115 |
| 5.4.6 Custos de implantação | 120 |
| 5.4.7 Análise econômica | 121 |
| 5.4.8 Cenários | 127 |
| 5.4.9 Considerações finais | 130 |
| CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E PESQUISA FUTURAS | 134 |
| 6.1 CONCLUSÕES | 134 |
| 6.2 PESQUISAS FUTURAS | 135 |
| REFERÊNCIAS | 137 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 2.1 | Mapa do sistema nacional de transmissão de energia | 13 |
| Figura 2.2 | Fluxograma do modelo chuva-vazão desenvolvido e gráfico da função sigmoidal | 15 |
| Figura 2.3 | Metodologia para otimização técnico-econômica do uso de duas turbinas axiais em PCHs de baixa queda | 16 |
| Figura 2.4 | Curvas de permanência observadas e simuladas pelo MSV e MLS e erros relativos percentuais | 18 |
| Figura 2.5 | Curvas de permanência observadas e simuladas e erros para períodos de calibração de 6,5 e 1,5 anos | 19 |
| Figura 2.6 | Modo de operação de duas turbinas em função da curva de permanência | 20 |
| Figura 2.7 | Curvas de permanência de vazões, de energia disponível e de energia gerada por duas turbinas iguais semi-Kaplan para uma pequena bacia | 21 |
| Figura 2.8 | Rentabilidade em função da potencia da PCH e do tipo de regulagem | 23 |
| Figura 3.1 | Consumo primário de energia ‘per capita’ mundial, ano de 2006 | 28 |
| Figura 3.2 | Consumo de energia primária ‘per capita’ de países segundo IDH | 29 |
| Figura 3.3 | Evolução da taxa de eletrificação brasileira | 31 |
| Figura 3.4 | Mapa do sistema nacional de transmissão de energia elétrica | 34 |
| Figura 3.5 | Esquema típico de central geradora hidrelétrica | 36 |
| Figura 4.1 | Localização da pequena bacia hidrográfica – PBH | 41 |
| Figura 4.2 | Curvas de permanência de vazões bruta e suavizada | 42 |
| Figura 4.3 | Gráfico da função sigmoidal | 47 |
| Figura 4.4 | Fluxograma representando a aplicação do MSV | 51 |
| Figura 4.5 | Memória do sistema otimizada para 7 anos | 53 |
| Figura 4.6 | Curvas de permanência das vazões observadas, simuladas e erros no período de calibração da PBH | 54 |
| Figura 4.7 | Vazões de permanência observadas, simuladas e erros no período de validação da PBH | 55 |
| Figura 4.8 | Vazões de permanência observadas e simuladas pelo MSV e MLS, e erros para o período de calibração | 57 |
| Figura 4.9 | Memória do sistema otimizada para 1,5 anos | 59 |
| Figura 4.10 | Vazões simuladas e erros para períodos de calibração de 6,5 e 1,5 anos | 60 |

| | | |
|----------------------|--|----|
| Figura 5.1 | Tipos de turbina em função da rotação específica e da altura de queda..... | 69 |
| Figura 5.2.a | Central hidrelétrica de baixa queda com turbina hélice do tipo tubular-S | 70 |
| Figura 5.2.b | Central hidrelétrica de baixa queda com turbina Kaplan de eixo vertical | 70 |
| Figura 5.2.c | Turbina bulbo | 70 |
| Figura 5.2.d | Turbina Sifão | 70 |
| Figura 5.2.e | Turbinas tipo “S” | 70 |
| Figura 5.2.f | Turbina Straflo..... | 70 |
| Figura 5.3.a | Turbina hélice - Laboratório de Turbomáquinas da UFPA | 71 |
| Figura 5.3.b | Turbina hélice - Laboratório de Turbomáquinas da UFPA | 71 |
| Figura 5.3.c | Modelo reduzido de turbina hélice do tipo tubular, com tubo de sucção desmontado para visualização do rotor (LHPCH - UNIFEI) | 72 |
| Figura 5.3d | Rotor hélice (LHPCH - UNIFEI) | 72 |
| Figura 5.4 | Corte esquemático de turbina hidráulica axial mostrando distribuidor e rotor | 73 |
| Figura 5.5 | Fluxo e convenção de pontos na seção meridional de uma turbina hidráulica axial | 74 |
| Figura 5.6 | Linhas de corrente, componentes e triângulos de velocidade no distribuidor e rotor de uma turbina hidráulica axial | 74 |
| Figura 5.7 | Eficiência de tipos de turbina em função da carga | 76 |
| Figura 5.8 | Fluxograma do código computacional CARTHA na sua versão atual | 80 |
| Figura 5.9 | Esquema de sequência típica de cálculos no TURBNPRO | 81 |
| Figura 5.10.a | Curvas de rendimento e de carga da turbina | 85 |
| Figura 5.10.b | Curvas de rendimento e de carga da turbina normalizadas pela vazão ótima de projeto Q_0 | 85 |
| Figura 5.11.a | Curva de permanência de vazões de pequena bacia real | 87 |
| Figura 5.11.b | Curva de permanência de vazões simulada com fator de escala $F_e = 0,3711$ | 87 |
| Figura 5.12 | Energia disponível da bacia | 88 |
| Figura 5.13 | Vazões de permanência do modo de operação das duas turbinas | 89 |
| Figura 5.14 | Curva de permanência de vazões de pequena bacia da Grécia | 90 |
| Figura 5.15 | Impacto da potência das turbinas sobre a eficiência energética da PCH | 90 |

| | | |
|--------------------|---|-----|
| Figura 5.16 | Eficiência energética de uma PCH com o uso de duas turbinas Francis | 91 |
| Figura 5.17 | Metodologia para otimização técnico-econômica de arranjos de duas turbinas axiais em PCHs de baixa queda | 93 |
| Figura 5.18 | Tela do TURBNPRO para seleção do tipo de turbina | 95 |
| Figura 5.19 | Tela do TURBNPRO para entrada de dados da turbina | 96 |
| Figura 5.20 | Tela do TURBNPRO para seleção da possibilidade de solução | 97 |
| Figura 5.21 | Tela do TURBNPRO para configuração da turbina | 97 |
| Figura 5.22 | Tela do TURBNPRO com o resumo dos dados de entrada | 98 |
| Figura 5.23 | Tela do TURBNPRO com a página 1 do resumo da solução | 99 |
| Figura 5.24 | Tela do TURBNPRO com a página 2 do resumo da solução | 99 |
| Figura 5.25 | Tela do TURBNPRO com a seção do distribuidor | 100 |
| Figura 5.26 | Tela do TURBNPRO com a seção longitudinal da passagem do fluxo | 100 |
| Figura 5.27 | Tela do TURBNPRO contendo o arranjo do conjunto turbina-gerador | 101 |
| Figura 5.28 | Tela do TURBNPRO com a curva de colina da turbina | 101 |
| Figura 5.29 | Tela do TURBNPRO com a curva de rendimento da turbina | 102 |
| Figura 5.30 | Tela contendo as curvas de rendimento e de carga da turbina fornecidas pelo TURBNPRO | 103 |
| Figura 5.31 | Eficiência e potência segundo vazões na turbina Semi-Kaplan | 103 |
| Figura 5.32 | Dimensões da turbina Semi-Kaplan | 104 |
| Figura 5.33 | Curva de colina da turbina Semi-Kaplan | 104 |
| Figura 5.34 | Curva de rendimento da turbina Semi-Kaplan | 105 |
| Figura 5.35 | Valores de eficiência e potência segundo as vazões da turbina Semi-Kaplan | 105 |
| Figura 5.36 | Dimensões da turbina Hélice | 106 |
| Figura 5.37 | Curva de colina da turbina Hélice | 106 |
| Figura 5.38 | Curva de rendimento da turbina Hélice | 107 |
| Figura 5.39 | Valores de eficiência e potência da turbina Hélice | 107 |
| Figura 5.40 | Curvas de rendimento e de carga das turbinas Kaplan, Semi-Kaplan e Hélice | 108 |
| Figura 5.41 | 64 - Curvas de rendimento e de potência das turbinas Kaplan, Semi-Kaplan e Hélice normalizadas pela vazão ótima de projeto Qo | 108 |

| | | |
|----------------------|---|-----|
| Figura 5.42 | Potência de saída da turbina Kaplan normalizada pela vazão ótima de projeto | 110 |
| Figura 5.43 | Potência de saída da turbina Semi-Kaplan normalizada pela vazão ótima de projeto | 110 |
| Figura 5.44 | Potência de saída da turbina Hélice normalizada pela vazão ótima de projeto | 111 |
| Figura 5.45 | 68 - Localização da pequena bacia hidrográfica PBH | 112 |
| Figura 5.46 | Curva de permanência da PBH para o período de 01/01/1993 a 31/12/1999 | 113 |
| Figura 5.47 | Curva de permanência de vazões da bacia sintética B1 | 114 |
| Figura 5.48 | Energia disponível da bacia sintética B1 | 115 |
| Figura 5.49.a | Eficiência energética da PCH provida de turbinas Kaplan | 116 |
| Figura 5.49.b | Eficiência energética da PCH provida de turbinas semi-Kaplan | 116 |
| Figura 5.49.c | Eficiência energética da PCH provida de turbinas Hélice | 116 |
| Figura 5.50 | Eficiência energética de PCH segundo o modo de regulação e relação de potências P2/P1 das turbinas | 118 |
| Figura 5.51 | Curvas de permanência de vazões, de energia disponível e de energia gerada por duas turbinas iguais semi-Kaplan para a bacia B1 | 119 |
| Figura 5.52 | Custos de implantação de PCHs em função da potência (kW) | 120 |
| Figura 5.53 | Período de retorno em função da potência da PCH e do tipo de regulação | 123 |
| Figura 5.54 | Rentabilidade em função da potência da PCH e do tipo de regulação | 125 |
| Figura 5.55 | Custos unitários de energia da PCH em função da potência | 126 |
| Figura 5.56 | Resultado líquido operacional anual em função da potência e do tipo de regulação das turbinas | 127 |
| Figura 5.57 | Custos específicos de implantação de PCHs em função da potência e do aquecimento do mercado | 128 |
| Figura 5.58 | Rentabilidade de PCHs dotadas de turbinas semi-Kaplan em função da potência e do aquecimento do mercado | 129 |
| Figura 5.59 | Período de retorno de PCHs dotadas de turbinas semi-Kaplan em função da potência de saída e do aquecimento do mercado | 130 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Tabela 2.1 | Eficiência energética da PCH segundo o tipo de regulagem e uso de uma ou duas turbinas iguais | 22 |
| Tabela 3.1 | Tipos de geração de energia elétrica no Brasil | 32 |
| Tabela 3.2 | Consumo de energia elétrica por grandes regiões do Brasil | 33 |
| Tabela 4.1 | Critérios de desempenho do MSV para a PBH | 56 |
| Tabela 4.2 | Desempenho do MSV e MLS, período de 1993 a 1999 | 58 |
| Tabela 4.3 | Critérios de desempenho para a análise de sensibilidade | 59 |
| Tabela 5.1 | Classificação das PCHs quanto à potência e queda de projeto | 64 |
| Tabela 5.2 | Faixa de operação das turbinas Kaplan, semi-Kaplan e hélice | 76 |
| Tabela 5.3 | Características básicas da turbina axial em estudo | 95 |
| Tabela 5.4 | Características das bacias sintéticas B1 a B6 | 113 |
| Tabela 5.5 | Eficiência energética da PCH em função do modo de regulagem e relação de potência das turbinas | 117 |
| Tabela 5.6 | Dados considerados na formulação da análise técnico-econômica das usinas | 122 |

NOMENCLATURA

CAPÍTULO 1

Siglas

CGH - Central Geradora Hidrelétrica

ONU - Organização das Nações Unidas

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

UFPA - Universidade Federal do Pará

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

CAPÍTULO 2

Siglas

BEN - Balanço Energético Nacional

ELETRONBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

MLS - Modelo Linear Simples

MSV - Modelo de Fator de Ganho Sigmoidalmente Variável

TEP - Tonelada Equivalente de Petróleo

CAPÍTULO 3

Siglas

OIE - Oferta Interna de Energia

ODM - Objetivos de Desenvolvimento do Milênio da ONU

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PIB - Produto Interno Bruto

CAPÍTULO 4

Siglas

PBH - Pequena Bacia Hidrográfica

Simbologia

A - área da bacia (km^2)

e - número de Euler

G - fator de ganho

G_o - fator de ganho observado

G_s - fator de ganho simulado

g - aceleração da gravidade (m/s^2)

H - altura líquida de queda (m)

I_1 - investimento no primeiro ano do projeto

$h(\tau)$ - função resposta impulsional unitária normalizada

F_o - fator vazão efetiva observada / chuva ponderada

F_s - fator vazão efetiva estimada / chuva ponderada

P - potência de saída no eixo da turbina (kW)

Q - vazão turbinada (m^3/s)

Q_b - vazão de base (m^3/s)

Q_o - vazão observada (m^3/s)

Q_s - vazão simulada (m^3/s)

R^2 - coeficiente de Nash

R - rentabilidade (%)

$u(\tau)$ - função resposta impulsional unitária do sistema

$x(t)$ - chuva diária da bacia (mm/dia)

$y(t)$ - vazão efetiva na foz da bacia decorrente da precipitação (mm/dia)

t - instante de tempo (dia)

$u(t)$ - função umidade

w_j - peso para função chuva ponderada

$z(t)$ - função chuva ponderada

Símbolos gregos

$\varepsilon(t)$ - termo de erro

η - rendimento global da central (%)

ρ - massa específica da água (kg/m^3)

τ - intervalo de tempo

CAPÍTULO 5

Siglas

LHPCH - Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas

Simbologia

$Y_{pá}$ é o trabalho específico das pás;

c_{u4} é a velocidade circunferencial (ou de condução) das pás na entrada do rotor;

c_{u5} é a velocidade circunferencial (ou de condução) das pás na saída do rotor;

u é a velocidade circunferencial (ou de condução) das pás.

P_t é a potência de saída no eixo da turbina real (W);

P_m é a potência de saída no eixo da turbina modelo (W);

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

Q_t é a vazão da turbina real (m^3/s);

Q_m é a vazão da turbina modelo (m^3/s);

H_t é a queda real (m);

H_m é a queda do modelo (m);

E_i é a energia gerada pela PCH no i -ésimo intervalo (kWh);

P_i é a soma das potência das turbinas da PCH no i -ésimo intervalo (kW);

VPL é o valor presente líquido (R\$);

n é o número total de períodos (anos);

VFL é o valor futuro líquido (R\$);

j é o período em que ocorre o valor;

i é a taxa de desconto (% a.a.);

R é a rentabilidade do projeto (%);

VPL_a é o valor presente líquido acumulado (R\$);

I_1 é o investimento no primeiro ano do projeto.

Símbolos gregos

Δt_i é a duração do i-ésimo intervalo de tempo (h);

η_t é o rendimento da turbina real, adimensional;

η_m é o rendimento da turbina modelo, adimensional;

ρ é a massa específica da água (kg/m³);

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Os assentamentos humanos são a mais forte característica de nossa espécie. A evolução da humanidade como sociedade, em sua permanente busca de melhorias, apresenta como um dos seus fatores fundamentais a necessidade de energia para viabilizar sua infraestrutura, possibilitando a existência e o funcionamento de hospitais, escolas, meios de comunicação, estrutura político-econômica, dentre outros.

Assim, a comunidade, urbana ou rural, constitui-se em organismo sócio-espacial, com seu espaço físico, suas edificações, sua rede de serviços e infraestrutura urbana ou rural, e seus habitantes distribuídos em suas classes sociais. Tal entidade, à semelhança dos organismos biológicos, interage com o meio ambiente, tendo como necessidade metabólica, todos os materiais, serviços e comodidades indispensáveis a seus habitantes no lar, no trabalho e no lazer, sob a forma de insumos e/ou dejetos (WOLMAN, 1977).

Dentre essas necessidades metabólicas, citam-se como agudas, entre outras, a necessidade de energia. Sem energia, pode ocorrer a degradação das condições de sustentabilidade dos assentamentos humanos, e até mesmo a situação sanitária pode se degradar, já que a distribuição de água e o tratamento de esgoto dependem da disponibilidade de energia. Sendo assim, a infraestrutura de energia é vital à comunidade. Sua viabilização pode depender fundamentalmente do administrador local, e o sucesso em sua resolução, é reflexo fundamentalmente das Políticas Públicas e da Gestão.

Por outro lado, o desenvolvimento tecnológico foi um fator fundamental para a viabilização da sociedade moderna, cuja característica na era industrial, é o uso intensivo de

tecnologias e fontes de energia, tendo o desenvolvimento da ciência e tecnologia permitido dotar as cidades de infraestrutura energética compatível com densidades demográficas crescentes.

O presente trabalho apresenta como justificativa e motivação iniciais os princípios da política pública de energia elétrica, os quais deveriam estar contidos na política pública de energia para a Amazônia Brasileira. Em seguida, foi analisado e aplicado um modelo hidrológico concentrado determinístico não linear simples que contribuiu para a melhoria da simulação de curvas de permanência de vazões de pequenas bacias amazônicas. A partir destas curvas, são dimensionadas as hidrelétricas, dotadas de turbinas, geradores e a infraestrutura necessária para o aproveitamento energético dessas bacias para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), com a correspondente análise técnico-econômica desses empreendimentos. Este estudo busca também contribuir para a solução do problema energético de comunidades isoladas da Amazônia pela disponibilização de ferramenta de análise e otimização de viabilidade técnico-econômica da implantação dessas centrais hidrelétricas em localidades desprovidas de energia elétrica.

1.2 PROBLEMA ESTUDADO

Consistiu em estudar três aspectos essenciais aos aproveitamentos hidrelétricos de pequenas bacias da Amazônia: a modelagem hidrológica, a tecnologia de pequenas turbinas hidráulicas para baixa queda; e a análise econômico-financeira dos empreendimentos hidrelétricos de pequeno porte.

Os aspectos hidrológicos objetivaram analisar os parâmetros hidrológicos necessários ao dimensionamento da produção de energia hidrelétrica, em especial a curva de permanência de vazões. A análise de tais parâmetros passa obrigatoriamente pela obtenção de dados de vazão, entretanto, as pequenas bacias amazônicas, na maioria dos

casos, são desprovidas de dados. Assim, pretendeu-se, neste estudo, contribuir para a melhoria da simulação de curvas de permanência de vazões para pequenas bacias da Amazônia, as quais são utilizadas para o dimensionamento de pequenas centrais hidrelétricas. Para esta finalidade, foi desenvolvido um modelo chuva-vazão, não linear, dotado de fator de ganho sigmoidal para simulação de vazões de pequenas bacias hidrográficas de baixa queda da Amazônia.

No desenvolvimento dos aspectos tecnológicos e econômicos de turbinas hidráulicas de fluxo axial, adequadas às centrais hidrelétricas de baixa queda, foi estudado o dimensionamento dessas turbomáquinas com o auxílio de ferramentas computacionais, mais especificamente os códigos computacionais CARTHA - desenvolvido em um convênio entre a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e a Universidade Federal do Pará (UFPA), utilizado para prever as características de turbinas axiais de baixa queda, justificáveis por serem máquinas ideais para utilização na região Amazônica, devido às características do relevo, o qual é pouco acidentado em grande parte; e o software comercial TURBNPRO.

Além disso, a investigação dos aspectos da viabilidade técnico-econômica das pequenas centrais hidrelétricas também foi desenvolvida no presente trabalho, cuja principal contribuição consistiu em analisar os parâmetros técnicos e econômico-financeiros de empreendimentos de PCHs para aproveitamentos hidrelétricos de pequenas bacias de baixa queda da Amazônia, com vistas à otimização desses aproveitamentos hidrelétricos.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

1.3.1 Introdução

BLANCO *et al.* (2008) estudaram e propuseram uma metodologia adequada à geração sustentável de energia por centrais geradoras hidrelétricas (CGHs) em pequenas bacias da Amazônia, que se constituem em fonte renovável de energia, compatível com a demanda constituída por pequenas comunidades amazônicas. Essas comunidades não dispõem de energia elétrica devido aos custos da ampliação das linhas de transmissão, bem como do rebaixamento de altas para baixas tensões e assim não apresentam atratividade às concessionárias que distribuem energia a partir de geração de grandes centrais hidrelétricas e termoelétricas.

1.3.2 Modelagem hidrológica

O modelo hidrológico desenvolvido por BLANCO *et al.* (2005) obteve êxito na simulação de curvas de permanência de vazões, particularmente na estimação de $Q_{95\%}$, tendo apresentado melhores resultados em estimativas de estiagens do que de cheias. Os Autores indicaram a necessidade de pesquisas complementares referentes à hidrologia das pequenas bacias da Amazônia, considerando necessário o estudo de modelos hidrológicos que permitissem aprimorar a estimação de curvas de permanência. Tais modelos deveriam considerar a não linearidade caracterizada principalmente pela infiltração e a variabilidade temporal das vazões em relação às chuvas, permitindo melhorar a simulação de todo o hidrograma, e conseqüentemente, de toda a curva de permanência.

O modelo chuva-vazão é uma importante ferramenta na previsão e operação de reservatórios destinados a hidrelétricas e outras finalidades (KACHROO, 1992). Contudo, há que se considerar o problema da super parametrização desses modelos, tema que tem

ocupado vários pesquisadores, havendo casos investigados em que treze parâmetros foram eficientemente substituídos por apenas quatro (JAKEMAN e HORNBERGER, 1993).

A escolha de um modelo chuva-vazão consiste, basicamente, em se dispor de dados necessários com qualidade, em detrimento de outros dados além de chuvas e vazões; no conhecimento detalhado da região de estudo e da estrutura do modelo escolhido; do desempenho do processo de calibração e validação do modelo e na aplicação do modelo a sua finalidade. Durante a escolha de um modelo apropriado à solução do problema proposto, as dificuldades que podem surgir são múltiplas. O objetivo é adequar um modelo específico ao sistema, de modo a se obter resultado, o mais próximo possível do sistema real (BARP, 2005).

Neste contexto, BLANCO *et al.* (2005) observaram que os dados comumente disponíveis para as pequenas bacias da Amazônia são as chuvas, tendo investigado uma relação linear de causa e efeito chuva-vazão, para o que aplicaram modelo linear chuva-vazão, o qual foi calibrado, validado e transposto para duas pequenas bacias amazônicas. Além disso, simularam os hidrogramas e as curvas de permanência necessárias aos estudos hidroenergéticos dessas bacias, com resultados satisfatórios, obtendo singular exatidão para as curvas de permanência, com erros menores que 9% na faixa entre $Q_{10\%}$ e $Q_{95\%}$. Entretanto, representadas em percentagens, as cheias foram subestimadas e as estiagens superestimadas.

1.3.3 Aspectos tecnológicos

Turbinas hidráulicas são equipamentos capazes de converter energia hidráulica em energia mecânica, na forma de trabalho de eixo. Dividem-se em dois tipos: ação e reação. No primeiro caso, a energia hidráulica disponível é inicialmente convertida em energia cinética e depois, já nas pás do rotor da turbina, em energia mecânica, sob pressão

atmosférica. No caso da turbina de reação, tem-se a submersão total do rotor, ocorrendo no fluxo da água diminuição de pressão entre entrada e saída do rotor (ARNDT, 1998). Ou seja, essas turbomáquinas convertem energia hidráulica para trabalho de eixo, o qual, através de gerador elétrico é transformado em energia elétrica.

1.3.4 Aspectos econômico-financeiros

Devido à escassez dos aproveitamentos com quedas moderadas e altas, conjugadas à necessidade de estudos de impactos ambientais cada vez mais exigentes, as configurações de turbinas tipo bulbo e tubular vêm sendo preferidas em relação às Kaplan de eixo vertical, por possibilitarem aproveitamentos de quedas inferiores a 15 m, as quais apresentavam baixa viabilidade técnico-econômica, e assim surgem como importante alternativa para a expansão da matriz energética (HINDLEY, 1996).

O potencial hidrelétrico brasileiro é de aproximadamente 260 GW, enquanto que a potência instalada em nossas hidrelétricas é de cerca de 80 GW, ou seja, menos de um terço do total (CERPCH, 2009). Há, portanto, bastante espaço ainda para a geração hídrica de energia no Brasil, com oportunidade relevante na Amazônia brasileira, que apresenta muitas pequenas bacias com baixas e baixíssimas quedas, as quais podem ter aproveitamentos energéticos técnica, econômica e financeiramente viáveis, com a utilização de turbinas axiais tecnologicamente adequadas a esses aproveitamentos hidrelétricos. Por outro lado, as turbinas axiais para PCHs apresentam-se com tecnologia cada vez mais otimizada, não só do ponto de vista da turbomáquina, como também do arranjo geométrico (ALBUQUERQUE, 2006).

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.4.1 Objetivo Geral

Contribuir para os estudos hidroenergéticos de pequenas bacias amazônicas, a partir de modelos hidrológicos, tecnológicos e econômicos adequados ao uso racional dos recursos hídricos.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Contribuir para a modelagem hidrológica da geração de energia hidrelétrica a partir de pequenas bacias amazônicas, através do desenvolvimento de modelo chuva-vazão não linear para a simulação de curvas de permanência de vazões;

2. Contribuir para o uso de tecnologias adequadas aos aproveitamentos dos potenciais hidráulicos de pequenas bacias da Amazônia de baixas quedas para geração de energia hidrelétrica, considerando aspectos econômicos relevantes.

1.5 METODOLOGIA

1.5.1 Caracterização Básica

A base lógica da dinâmica da pesquisa foi dividida em quatro fases identificadas e descritas com suas técnicas.

1.5.2 Investigação

A metodologia investigativa a ser utilizada na elaboração do presente trabalho consiste na identificação e leitura de literatura correlata à modelagem das atividades de geração hidrelétrica, considerando o uso sustentável dos recursos naturais inerentes, enfocando conceitos e discussões correntes no meio técnico e científico, em mídia impressa ou eletrônica, com consulta aos sítios da rede mundial de computadores. Nesta fase, foram selecionados os modelos hidrológicos investigados e/ou desenvolvidos.

1.5.3 Coleta dos dados

Após a fase de investigação da literatura e sua completa assimilação, inicia-se a fase de coleta dos dados selecionados pelo pesquisador, visando à adequação dos modelos hidrológicos estudados às pequenas bacias amazônicas, como também, os relativos à tecnologia e análise econômico-financeira dos empreendimentos de PCHs para geração hidrelétrica.

1.5.4 Tratamento dos dados

A estratégia mais adequada para o tratamento dos dados coletados e selecionados para esta pesquisa foi determinada conforme as características do estudo, às vezes foram necessárias a utilização de técnicas matemáticas, estatísticas, computacionais ou outras. No mais, foi feito um estudo dos modelos alimentados com dados, coeficientes e parâmetros regionais e locais, adequados ao uso dos recursos hídricos na geração de energia hidrelétrica em pequenas bacias de baixa queda da Amazônia.

1.5.5 Resultados

Após a seleção e tratamento dos dados, os mesmos foram aplicados aos modelos desenvolvidos neste trabalho, sendo que os resultados obtidos, sua discussão e análise contribuíram para os estudos de geração de energia hidrelétrica em pequenas bacias de baixa queda da Amazônia.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O presente trabalho está distribuído em cinco capítulos.

O capítulo 1 apresenta a parte introdutória, objetivos e revisão de literatura da pesquisa, discorrendo sobre a modelagem hidrológica, aspectos tecnológicos e aspectos econômico-financeiros. Traz ainda, a metodologia da pesquisa, com sua caracterização, coleta e tratamento dos dados, além da organização da Tese.

O capítulo 2 apresenta a síntese da Tese, e tem por finalidade permitir ao leitor um melhor entendimento e concatenação dos capítulos seguintes. Constitui-se em introdução, materiais e métodos, resultados e discussão e considerações finais.

O capítulo 3 contém a justificativa e a motivação para o desenvolvimento da presente pesquisa, trazendo como título “A importância das centrais geradoras hidrelétricas para a sustentabilidade das comunidades isoladas da Amazônia”. Discute aspectos da política pública brasileira e do setor brasileiro de energia elétrica, apresenta objetivos de desenvolvimento do milênio da ONU, bem como tópicos sobre hidrologia e tecnologia da geração hidrelétrica em pequenas bacias, ressaltando a importância para a Amazônia das pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), as quais se constituem em fontes alternativas e renováveis de energia.

O capítulo 4, que estuda a “Simulação de curvas de permanência de pequenas bacias da Amazônia com o uso de modelo chuva-vazão não linear com fator de ganho sigmoidal”, tem o propósito de contribuir para o dimensionamento da geração de energia de pequenas centrais hidrelétricas. Apresenta o modelo de fator de ganho sigmoidalmente variável, o qual utiliza a função sigmoidal, além de duas funções auxiliares, quais sejam, a chuva diária ponderada e o estado de umidade do solo, aplicado a pequena bacia hidrológica da Amazônia, a qual foi utilizada para teste do modelo. Apresenta, ainda, a metodologia da pesquisa, os critérios de desempenho, os resultados de calibração e validação, bem como a análise de sensibilidade do modelo.

O capítulo 5 denomina-se “Estudo da otimização técnico-econômica do uso de duas turbinas hidráulicas axiais em pequenas centrais hidrelétricas de baixa queda na Amazônia”, e para isso estuda arranjos de duas turbinas hidráulicas de fluxo axial operando em paralelo, de potências P1 e P2, em função do tipo de regulagem das turbinas, da vazão

$Q_{95\%}$, da potência de saída da PCH, da relação P2/P1. Esse capítulo mostra ainda, aspectos tecnológicos de turbinas hidráulicas de fluxo axial, faixa de aplicação das turbinas hidráulicas segundo velocidade específica, modelos de turbinas hidráulicas de fluxo axial e os tipos de regulação para as mesmas, sendo do distribuidor (turbina hélice), do rotor (turbina semi-Kaplan) e dupla (turbina Kaplan). Apresenta também, os triângulos de velocidade, a faixa de operação das turbinas hidráulicas axiais em função da vazão ótima de projeto, e os códigos computacionais CARTHA e TURBNPRO utilizados para geração das curvas características das turbinas. E finalmente, mostra os princípios de semelhança aplicados a turbinas, e o cálculo da energia potencial de PCHs providas de duas turbinas hidráulicas axiais operando em paralelo. Estuda os custos de implantação, desenvolvendo análise técnico-econômica e elaborando três cenários para o mercado: aquecido, neutro e desaquecido.

O capítulo 6 apresenta as conclusões da pesquisa e as sugestões para estudos futuros.

Encerrando o trabalho, vem a Bibliografia, com todas as referências utilizadas na presente pesquisa.

CAPÍTULO 2

SÍNTESE DA TESE

2.1 INTRODUÇÃO

A investigação dos aspectos da viabilidade técnico-econômica das pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) de baixa queda da Amazônia foi desenvolvida no presente trabalho, com vistas ao uso racional dos recursos hídricos da Amazônia.

Esse problema é particularmente importante, pois a provisão de energia é vital para a sustentabilidade das pequenas comunidades isoladas do interior da região (BLANCO *et al.* 2008), viabilizando o funcionamento de hospitais, escolas, delegacias, indústrias, além das atividades domésticas e de lazer. A provisão mencionada, representa um importante marco na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos brasileiros que vivem nessas comunidades. MESQUITA *et al.* (1999), noticiaram que a queda média dos sítios visitados em pequenas comunidades da Amazônia é de 5 m, indicando o uso de turbinas hidráulicas axiais, as quais são mais adequadas a essas baixíssimas quedas.

Para isso, foram estudados aspectos relevantes do problema: 1º) a importância das PCHs para as comunidades isoladas da Amazônia; 2º) contribuições para a modelagem hidrológica de pequenas bacias de baixa queda da Amazônia, para o que foi desenvolvido um modelo chuva-vazão não linear para simulação de curvas de permanência de vazões; 3º) contribuições para a otimização técnico-econômica do uso de duas turbinas axiais em pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) de baixas quedas.

2.2 A IMPORTÂNCIA DAS PCHS PARA AS COMUNIDADES ISOLADAS DA AMAZÔNIA

Para a Organização das Nações Unidas (ONU), “Garantir a sustentabilidade ambiental” é uma importante Meta dentre seus Objetivos de Desenvolvimento do Milênio, sendo considerado como referencial necessário a essa indispensável mudança social, o cumprimento dessa Meta, que seria, o limite mínimo de energia com o valor de uma tonelada equivalente de petróleo (tep) ‘per capita’ (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003). O coeficiente de equivalência utilizado no Balanço Energético Nacional Brasileiro, determinado pela equivalência da energia potencial da água (energia mecânica) em calor (EPE, 2006), é de 1 kWh para cada 860 kcal. Para a oferta e demanda de energia hidráulica e eletricidade, é utilizado o fator de equivalência de 0,29 tep/MWh, resultado da razão entre o consumo médio de óleo combustível em kcal/kWh nas termelétricas brasileiras e o poder calorífico superior do petróleo (3132/10800) (PATUSCO, 1998).

Os dados do Banco Mundial mostram que há uma tendência de aumento do consumo per capita de energia à medida que cresce o índice de desenvolvimento humano (IDH) dos países. No ano de 2007, o Brasil, com IDH de 0,77, apresentava consumo de 1,07 toneladas equivalentes de petróleo por habitante (tep/hab) (WDI, 2007). A Região Norte, na qual está localizada a maior parte da Amazônia Brasileira, apresenta IDH de 0,7, inferior à média nacional, portanto necessitando da aplicação de políticas públicas de diminuição das desigualdades regionais, conforme preconizado na Constituição Federal do Brasil (CF, 1988).

No Brasil, cerca de 92% dos domicílios são providos de eletricidade, entretanto na Região Norte e na Amazônia, essa provisão é inferior a 80%, enquanto nas regiões Sul e Sudeste, são atendidos mais de 95% (IBGE, 2000), caracterizando a má distribuição dos benefícios do setor elétrico no Brasil, desenvolvido com a contribuição de toda a sociedade

brasileira, e criando o paradoxo de regiões que têm expressiva contribuição à geração mostrarem-se desprovidas de energia elétrica.

A Figura 2.1 mostra o mapa do sistema nacional de transmissão de energia elétrica, explicitando a má distribuição anteriormente discutida.

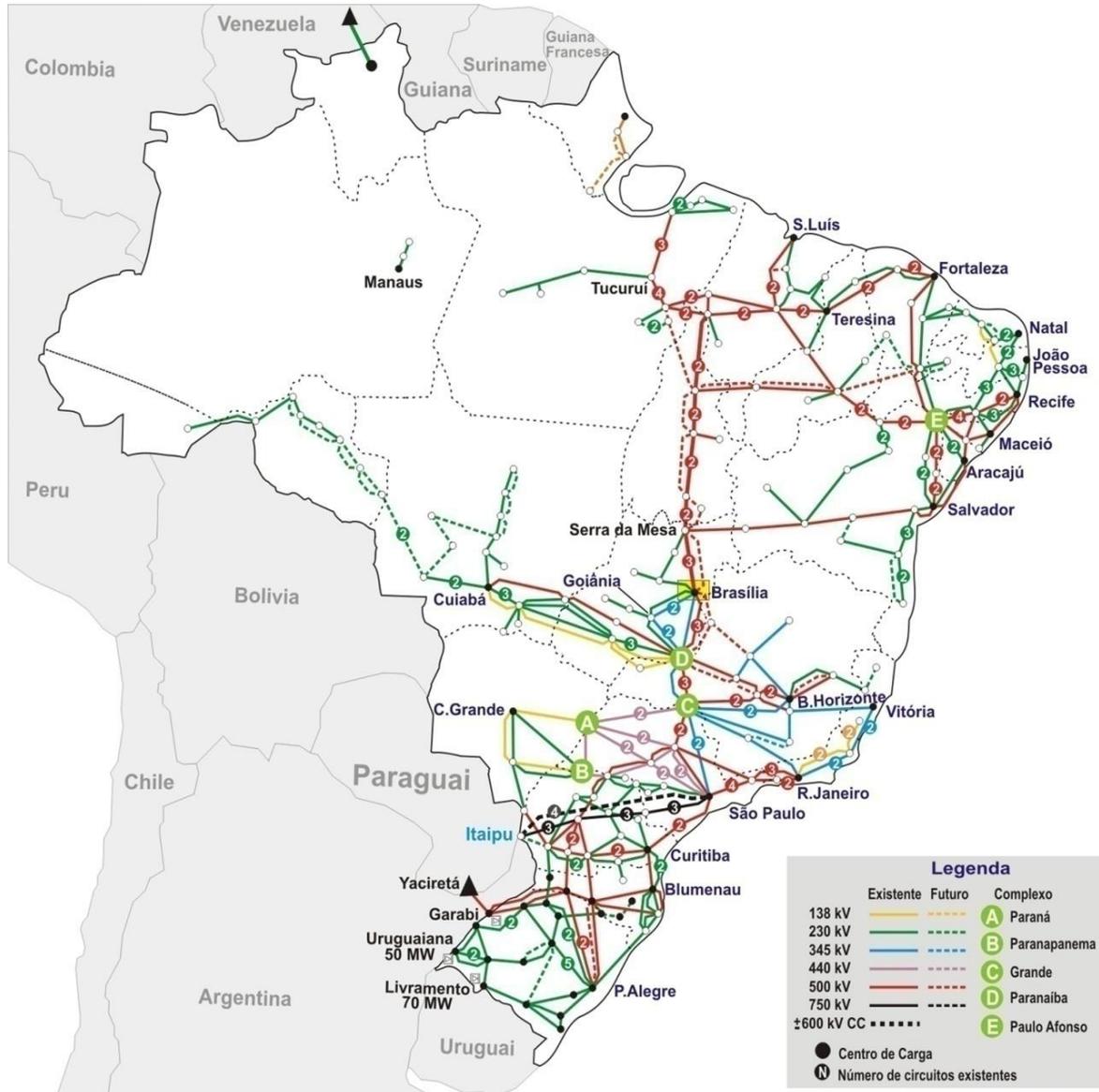


Figura 2.1 - Mapa do sistema nacional de transmissão de energia elétrica.

Fonte: ONS (2007).

É claramente visível nesse mapa, que a deficiência do atendimento elétrico brasileiro está concentrada principalmente na região Norte e, portanto na Amazônia. Essa carência é maior nas áreas rurais, notadamente nas pequenas comunidades, tendo DUARTE *et al.* (2010) estudado a geração local de energia elétrica para atendimento de comunidades isoladas da Amazônia, sendo que os pesquisadores concluíram que tal provisão de eletricidade não é e nem tende a ser feita pelo sistema interligado nacional, pois devido ao baixo consumo dessas comunidades, elas não são elegíveis técnica, econômica e financeiramente pelas concessionárias.

Entretanto, essas populações necessitam de energia para melhoria de sua qualidade de vida e das perspectivas sociais e profissionais, devendo ser consideradas alternativas compatíveis com o Protocolo de Kyoto para essa geração, como é o caso das Pequenas Centrais Hidrelétricas (DUARTE *et al.* 2010).

As usinas hidrelétricas com potência instalada entre 1 MW e 30 MW e com reservatório igual ou inferior a 3 km² são denominadas de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Quando se apresentam com potências inferiores a 1MW, denominam-se Centrais Geradoras Hidrelétricas (ANEEL, 1998).

2.3 CONTRIBUIÇÕES PARA A MODELAGEM HIDROLÓGICA E OTIMIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DO USO DE TURBINAS AXIAIS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE BAIXA QUEDA NA AMAZÔNIA

Os estudos hidrológicos, inclusive a curva de permanência de vazões, constituem a base do dimensionamento da geração hidrelétrica, sendo que, as pequenas bacias amazônicas, na maioria dos casos, são desprovidas de dados hidrológicos, o que dificulta esse dimensionamento. Assim, no presente trabalho, foi desenvolvido um modelo

hidrológico, o mais simples possível, que utilize os dados disponíveis, e que apresente resultados aplicáveis a esses dimensionamentos.

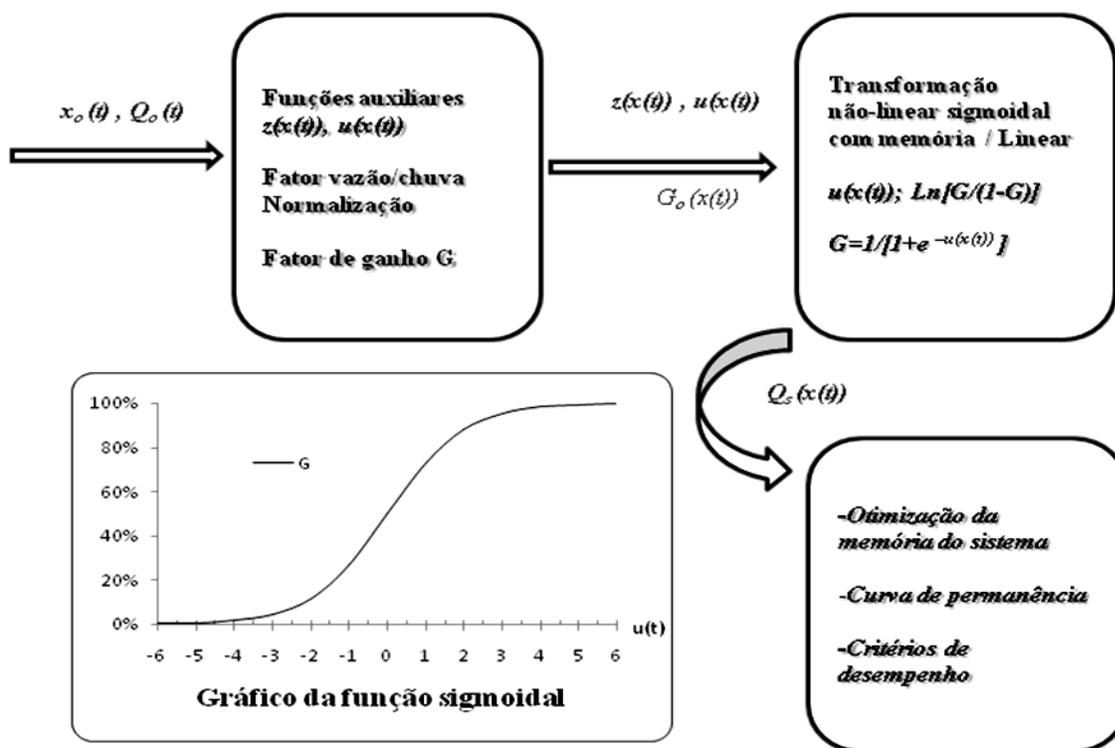


Figura 2.2 - Fluxograma do modelo chuva-vazão desenvolvido e gráfico da função sigmoidal.

A Figura 2.2 mostra o fluxograma do modelo chuva-vazão com fator de ganho variável segundo a função sigmoidal, o qual foi desenvolvido na presente tese. O índice o representa valores observados, e o índice s valores simulados, como por exemplo, na vazão observada Q_o e simulada Q_s .

Para a análise técnica das PCHs, determinou-se a energia potencial hidráulica disponível e calculou-se a energia gerada pelas turbinas a partir de suas curvas de carga. Para a análise econômica, foram considerados dados econômicos como preço da energia, vida útil, taxa de juros e outros, calculando-se o período de retorno e a rentabilidade. Além

disso, foram formulados três cenários contemplando variáveis de mercado relacionadas a esses empreendimentos.

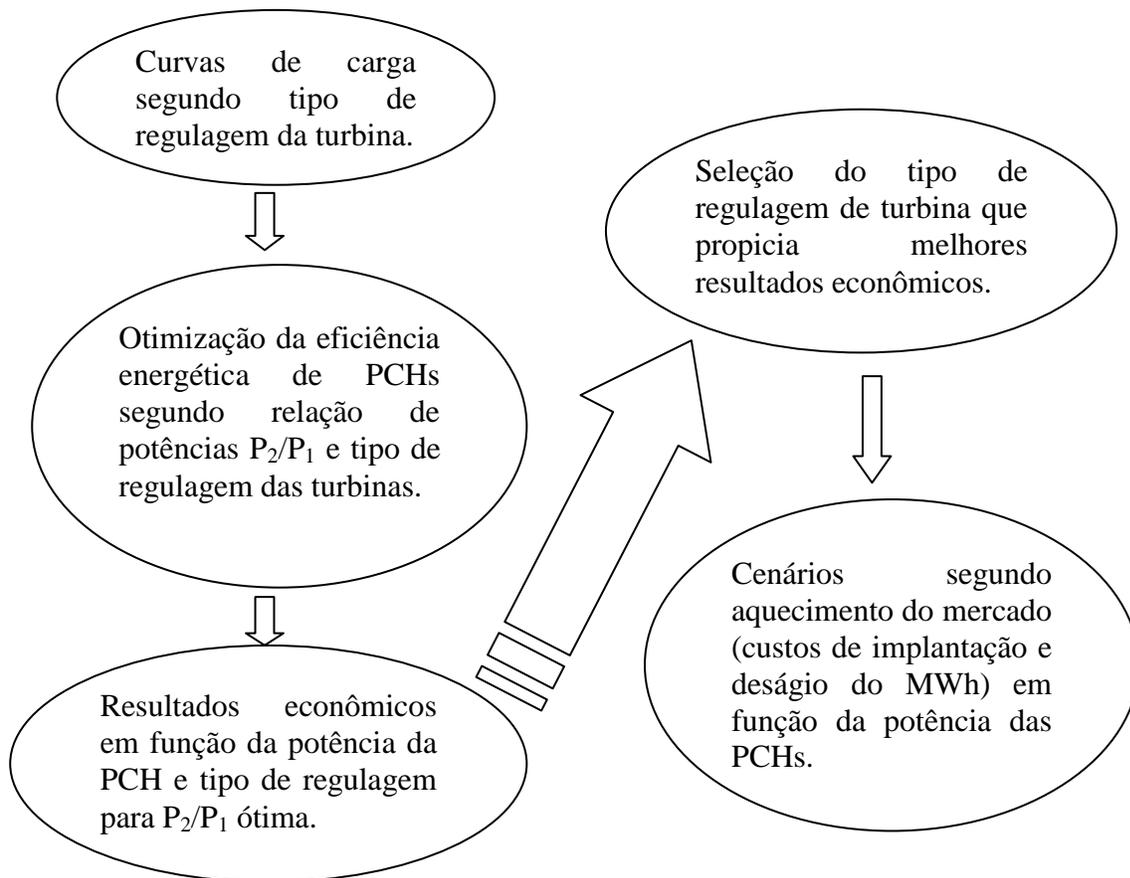


Figura 2.3 - Metodologia para otimização técnico-econômica do uso de duas turbinas axiais em PCHs de baixa queda.

Também, foi analisado o uso de duas turbinas axiais de potências P_1 e P_2 , operando em paralelo, sendo característica de P_1 , que sua vazão do ponto de máximo rendimento para regulagem do rotor corresponde à vazão $Q_{95\%}$. A seleção da potência P_2 ocorrerá segundo melhorias técnico-econômicas desejadas. A Figura 2.3 mostra a metodologia utilizada neste trabalho para otimização técnico-econômica do uso de duas turbinas axiais em PCHs de baixa queda.

Conforme os procedimentos da Figura 2.3, com o uso do código computacional TURBNPRO, foram obtidas curvas de carga das turbinas para os três modos de regulagem:

distribuidor, rotor e dupla, para uma turbina estudada, a qual serviu de base para todas as demais curvas de carga semelhantes. Em seguida, as curvas de carga das turbinas de potência P_1 e P_2 foram acopladas às curvas de permanência de vazões da bacia, produzindo as curvas de geração de energia para os três modos de regulação, segundo a relação de potências P_2/P_1 . Isto permitiu a seleção da regulação e da relação P_2/P_1 ótimas. Utilizando-se dados como rendimento dos geradores elétricos, preço de venda de energia, vida útil, custos de implantação dos empreendimentos, e outros. Foram calculados: o resultado operacional líquido anual, o período de retorno, a taxa de retorno, o valor presente líquido, o Custo Unitário de Energia, dentre outros. Assim, foram simuladas curvas de permanência com mesma altura de queda, providas de arranjos de duas turbinas axiais de potências P_1 e P_2 . A partir desses dados, efetuaram-se simulações que permitiram a análise da influência da potência da PCH sobre os resultados técnico-econômicos, utilizando-se cenários segundo o comportamento do mercado.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo chuva-vazão com fator de ganho sigmoidalmente variável (MSV) foi aplicado a uma pequena bacia hidrológica da Amazônia, com área de drenagem de 82 km², tendo os dados de vazão sido obtidos a partir da estação fluviométrica 31600000F, denominada Marambaia, latitude -01° 39' 06" e longitude -47° 07' 03", e os dados de chuva da estação pluviométrica 00147016P, latitude -1° 33' 02" e longitude -47° 07' 01", sendo esta a mesma bacia analisada por BLANCO *et al.* (2005). Os dados analisados são do período entre 1993 e 1999.

A Figura 4 mostra as vazões de permanência observadas e simuladas pelo Modelo desenvolvido (MSV) bem como pelo Modelo Linear Simples (MLS) analisado por

BLANCO *et al.* (2005). A figura mostra também os erros relativos percentuais entre as vazões de permanência observadas e simuladas pelos dois modelos.

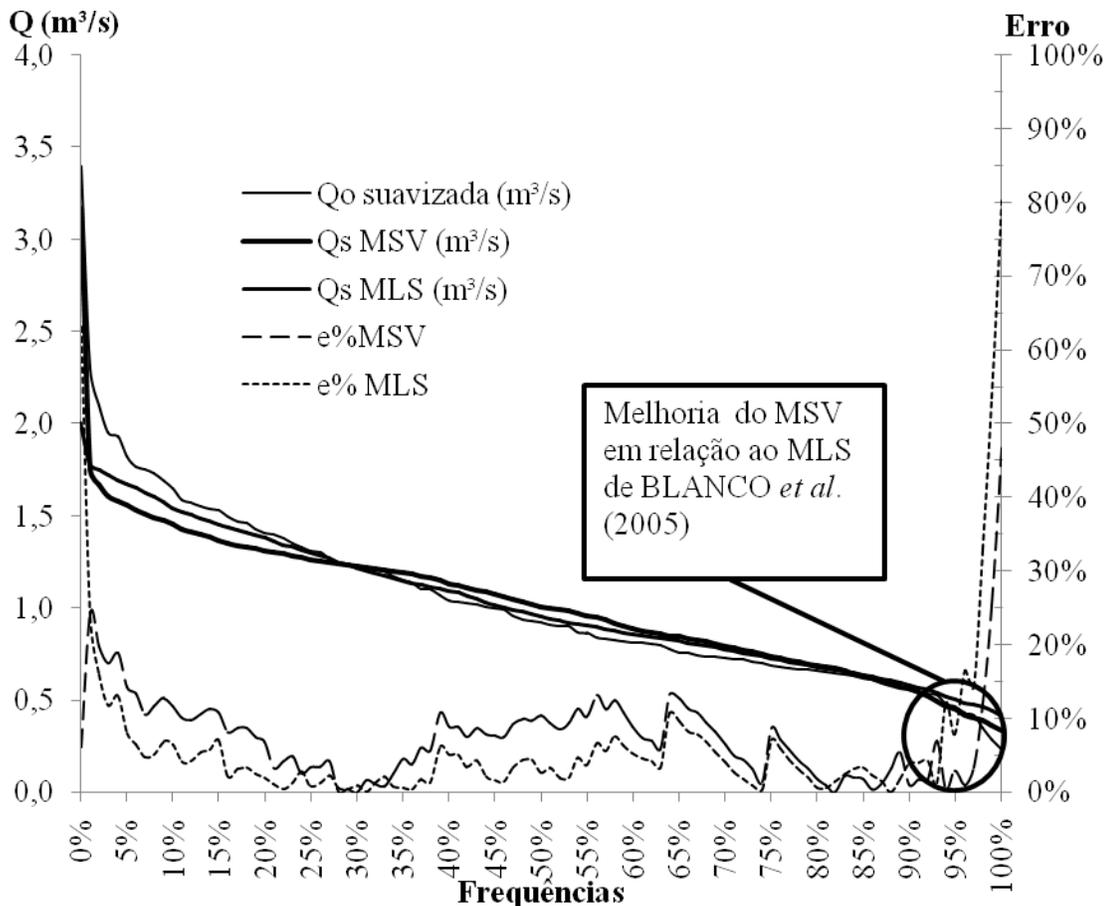


Figura 2.4 - Curvas permanência observadas e simuladas pelo MSV e MLS e erros relativos percentuais.

Observa-se na Figura 2.4, que o modelo chuva-vazão com fator de ganho sigmoidal (MSV) desenvolvido no presente trabalho, apresentou melhorias em relação ao modelo linear simples (MLS) de BLANCO *et al.* (2005) nas altas frequências da curva de permanência, notadamente na faixa de $Q_{95\%}$ a $Q_{100\%}$, faixa esta utilizada para o dimensionamento das pequenas centrais hidrelétricas (ELETROBRAS, 2002). Nas demais faixas, houve desempenho semelhante entre os modelos.

Conforme anteriormente mencionado, há carência de dados hidrológicos para as pequenas bacias da Amazônia. Assim, um importante ponto deste trabalho, foi o de estabelecer para o modelo sigmoidal desenvolvido, qual o mínimo período de dados necessário para sua aplicação.

A Figura 5 mostra as curvas de permanência de vazões simuladas com períodos de calibração de 6,5 anos e 1,5 anos.

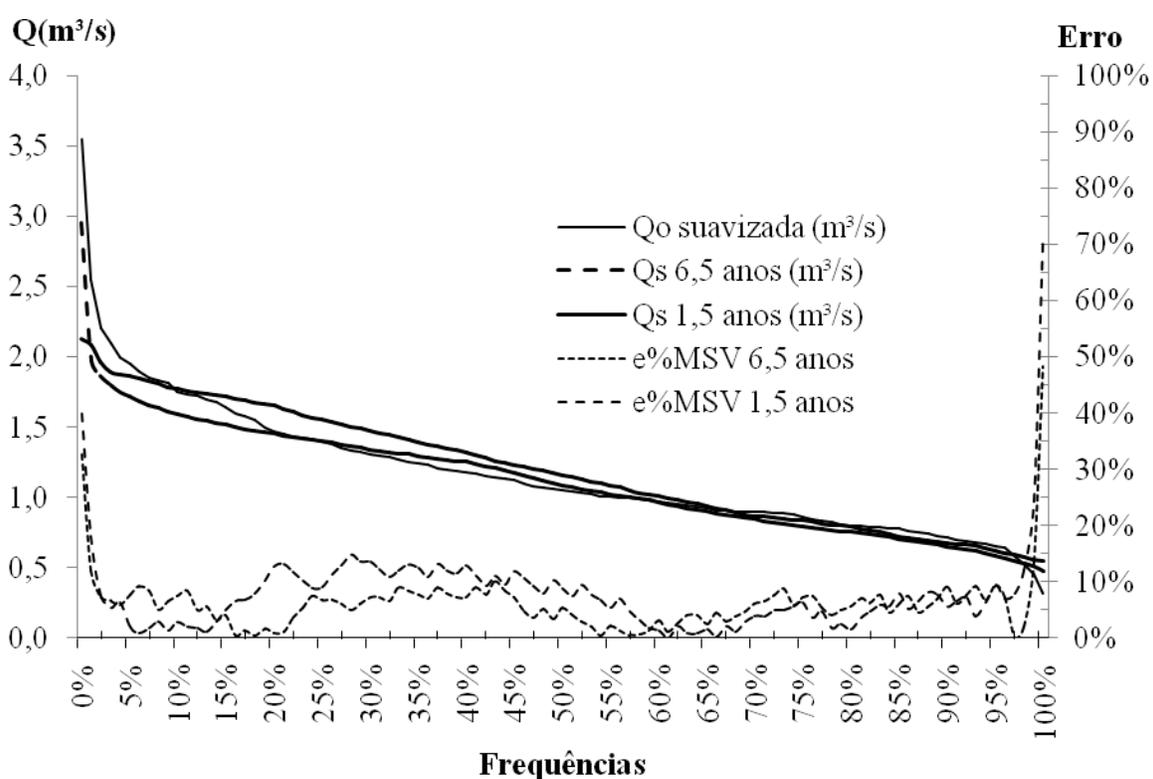


Figura 2.5 - Curvas de permanência observadas e simuladas e erros para períodos de calibração de 6,5 e 1,5 anos.

A Figura 2.5 mostra que os resultados obtidos para períodos de calibração de 6,5 e 1,5 anos têm erros de mesma ordem de grandeza. Assim, conclui-se que para a aplicação do Modelo com Fator de Ganho Sigmoidalmente Variável (MSV), uma amostra de dados de chuva e vazão de 1,5 anos, é suficiente.

Um importante conceito para o dimensionamento dos aproveitamentos hidráulicos é o da Eficiência Energética da PCH, calculada pela relação entre a energia total gerada e a energia potencial total disponível, durante o período de um ano.

ELETRONBRAS (2002) recomenda para PCHs o uso de uma turbina com vazão ótima de projeto igual a $Q_{95\%}$. Entretanto, analisando um estudo de caso, ANAGNOSTOPOULOS e PAPANTONIS (2007), foi verificado que a inclusão de uma segunda turbina em uma PCH, eleva a eficiência energética consideravelmente, tendo atingido um máximo de 80%.

A Figura 2.6 ilustra o modo de operação de duas turbinas hidráulicas axiais em uma PCH. Nesse caso, a turbina de potência P_1 opera sozinha na faixa de vazões de permanência de $Q_{100\%}$ a $Q_{60\%}$. As turbinas P_1 e P_2 funcionam simultaneamente de $Q_{60\%}$ até $Q_{0\%}$, sendo a vazão ótima da turbina P_1 igual a $Q_{95\%}$. A turbina P_2 terá sua potência definida em função da otimização da geração de energia.

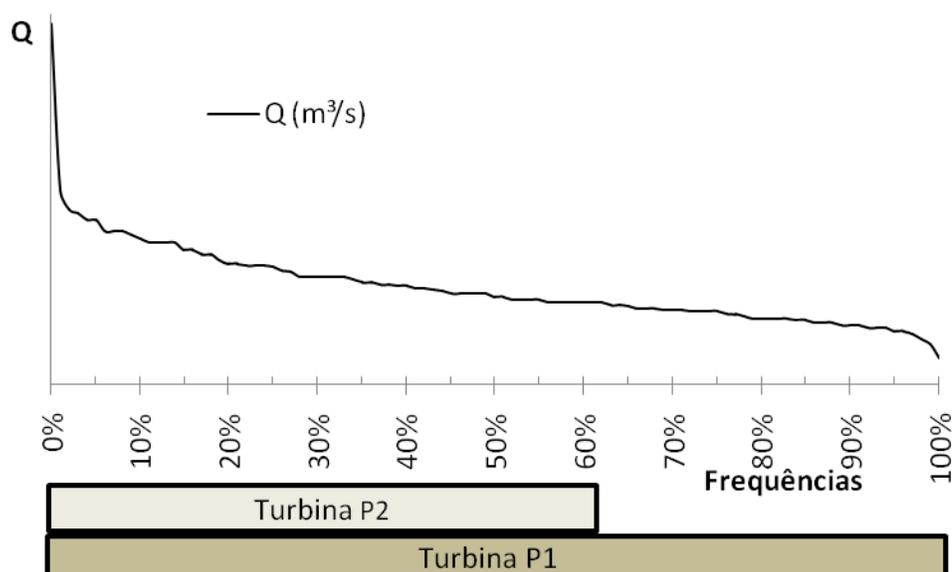


Figura 2.6 - Modo de operação de duas turbinas em função da curva de permanência.

A Figura 2.7 mostra as curvas de permanência de vazões, de energia disponível e de energia gerada por duas turbinas iguais semi-Kaplan para uma PCH de uma pequena bacia da Amazônia.

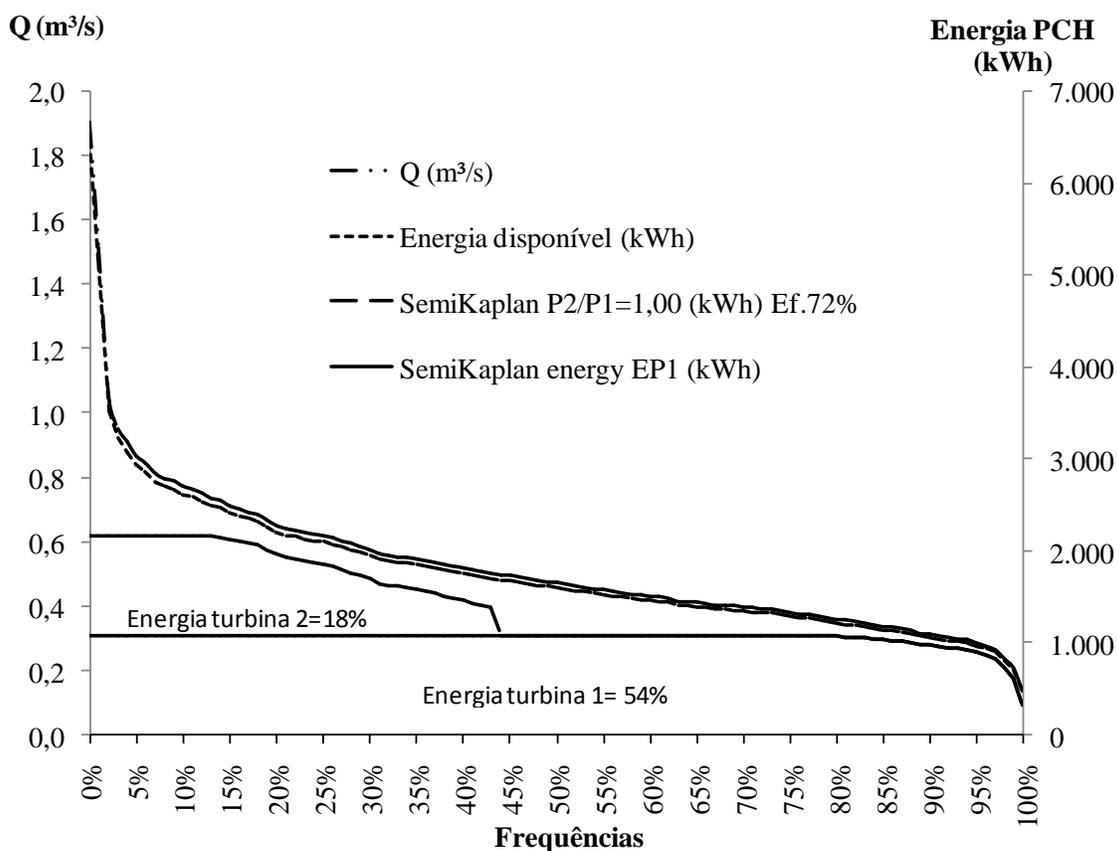


Figura 2.7 - Curvas de permanência de vazões, de energia disponível e de energia gerada por duas turbinas iguais semi-Kaplan para uma pequena bacia.

Observa-se na Figura 2.7, que a turbina 1 gera 54% da energia da PCH, operando durante 100% do tempo, enquanto que a turbina 2 gera 18% da energia da PCH, operando durante 45% do tempo. No eixo das vazões podem ser lidas as vazões mínima e máxima da turbina 1 e por subtração desta última, as da turbina 2. Os 28% de energia não aproveitada correspondem à área abaixo da curva de energia disponível, porém superior às áreas de energia das turbinas 1 e 2.

A generalização da análise a partir do raciocínio mostrado na Figura 2.7 permite ampliar as variáveis a serem consideradas no estudo técnico-econômico das PCHs, podendo, dessa maneira, serem estudados casos com queda variando segundo curvas-chave e uso de diversas turbinas, com diferentes curvas de rendimento e de carga. A maximização da eficiência energética da PCH corresponde à minimização da energia não aproveitada, correspondente à área situada entre as curvas de energia disponível e de energia gerada pelas turbinas. Uma importante observação, é que as curvas de energia gerada pelas turbinas são função de suas características mecânicas e das instalações civis e elétricas.

A Tabela 2.1 mostra a Eficiência energética da PCH segundo o tipo de regulagem e o uso de uma ou duas turbinas iguais, na qual se vê o acréscimo de eficiência energética que ocorre com o uso de uma segunda turbina igual à primeira. A potência da segunda turbina foi determinada a partir da otimização da eficiência energética da PCH.

Tabela 2.1 - Eficiência energética da PCH segundo o tipo de regulagem e o uso de uma ou duas turbinas iguais.

| Tipo de regulagem (turbina) | Eficiência energética da PCH | | |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|-----------|
| | Com uma turbina | Com duas turbinas iguais | Acréscimo |
| Dupla (Kaplan) | 65% | 80% | 15% |
| Rotor (Semi-Kaplan) | 54% | 72% | 18% |
| Distribuidor (Hélice) | 49% | 65% | 11% |

Vê-se na Tabela 2.1, que o uso de duas turbinas aumenta consideravelmente a eficiência energética da PCH para os três tipos de regulagem.

Um importante indicador para a análise econômica é a rentabilidade do empreendimento.

Para a análise econômica, elaborada com base em DUARTE *et al.* (2009), foram considerados o preço de venda do kWh, a um valor específico de R\$155,00/MWh, preço-teto aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para PCHs em agosto/2010, bem como as orientações contidas em ELETROBRAS (2002). Embora houvesse referências de PAISH (2000) e KALDELLIS *et al.* (2005), os custos de implantação da PCH foram calculados em função de sua potência conforme os estudos de BALARIM *et al.* (2000).

A Figura 2.8 mostra a rentabilidade em função da potência de saída da PCH.

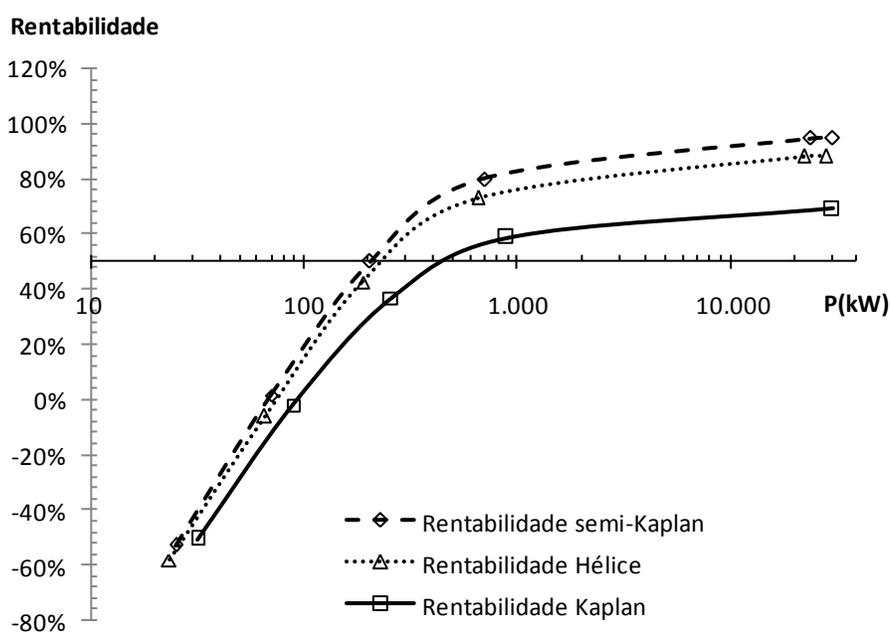


Figura 2.8 - Rentabilidade em função da potência da PCH e do tipo de regulagem.

Na Figura 2.8, observa-se o aumento da rentabilidade com o crescimento da potência de saída da PCH e sua estabilização para potências superiores a 1MW. Nessa

figura verifica-se que a rentabilidade é maior para turbinas semi-Kaplan, de rotor regulável, intermediária para turbinas hélice, de distribuidor regulável, e menor para turbinas Kaplan, de regulagem dupla.

No caso estudado, turbinas semi-Kaplan são preferíveis por maximizar a rentabilidade, particularmente para potências superiores a 120 kW, a partir dos quais a rentabilidade supera 50%, tornando o empreendimento atraente, mesmo se considerado de longa duração (HIRSCHFELD, 1989).

Foram analisados três cenários, denominados de mercado aquecido, com custos de implantação elevados em 30% e sem deságio no preço do MWh; mercado neutro, sem elevação dos custos de implantação e sem deságio no preço do MWh; e mercado desaquecido, com redução de 30% nos custos de implantação e deságio de 30% no preço do MWh.

Após os cálculos, verificou-se que a máxima rentabilidade, de 178%, ocorre para PCHs com potência de 30MW, em um mercado aquecido, com o uso de turbinas iguais, do tipo semi-Kaplan, correspondendo ao período de retorno mínimo, de três anos.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante lembrar que, o estudo desenvolvido é pertinente a uma região do Brasil diferenciada devido a sua imensa extensão territorial e baixa densidade demográfica, quando comparada com outras grandes regiões do Brasil. Assim, é necessária a consideração de outros fatores de influência tais como: a demanda por energia característica das populações das comunidades isoladas com suas ocupações típicas e sazonais; e os custos associados à implantação das PCHs.

O autor sugere que para estudar a aplicação prática das inovações resultantes da presente pesquisa, sejam superpostos os dados hidrológicos, quedas disponíveis e a

demografia dos sítios referentes às pequenas comunidades da Amazônia, de maneira a se elegerem comunidades para essa aplicação. Também se constitui em foco de interesse, a investigação dos custos de implantação de PCHs na Amazônia.

CAPÍTULO 3

A IMPORTÂNCIA DAS CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS PARA A SUSTENTABILIDADE DAS COMUNIDADES ISOLADAS DA AMAZÔNIA

3.1 POLÍTICA PÚBLICA PARA ENERGIA ELÉTRICA

A gestão da política pública de energia elétrica, se bem feita, beneficiaria diretamente parcela da população mais desprovida e mais necessitada. Os serviços de eletricidade são essenciais e devem visar exclusivamente aos interesses da população, e a interrupção destes ou a inexistência da prestação dos mesmos, depõem contra a qualidade de vida das comunidades.

3.2 SUSTENTABILIDADE

Em estudos para definição de critérios para a avaliação da sustentabilidade de sistemas de energia, quatro aspectos são relevantes: recursos naturais, ambiental, econômico e social (Agenda 21).

O capital produzido (em USD) por kWh, o ganho de Produto Interno Bruto (PIB) por kWh, são alguns indicadores econômico-sociais a serem considerados (AFGAN *et al.*, 2000).

As notáveis diferenças sócio-econômicas percebidas entre as grandes regiões geográficas brasileiras refletem-se na estrutura de uso e das fontes de energia. O balanço de energia nacional, por exemplo, mostra que um cidadão do Norte tem um menor consumo per capita do que um habitante do Sudeste do país, relação análoga à comparação do consumo per capita brasileiro ao de países desenvolvidos. Assim, a distribuição e o acesso desiguais da energia no Brasil são estruturais e conduzem a uma discussão que permeia relevantes questões éticas dentre as quais se cita o direito de acesso à eletricidade; o

balanço entre fontes renováveis e não-renováveis; a consideração dos subsídios, e custos externos, ambientais e sociais; a avaliação do impacto de políticas públicas de energia sobre o meio ambiente e as implicações das políticas públicas de energia para as gerações futuras.

3.3 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO DO MILÊNIO DA ONU (ODM)

“Garantir a sustentabilidade ambiental” é uma importante Meta dos ODM. Considera-se como referencial necessário a essa indispensável mudança social e o cumprimento dessa Meta, o limite mínimo de energia com o valor de uma tonelada equivalente de petróleo (tep) ‘per capita’ (GOLDEMBERG e VILLANUEVA, 2003).

Para se contabilizar energia hidrelétrica, em tonelada equivalente de petróleo (tep), o critério utilizado para a conversão em tep é a base teórica do primeiro princípio da termodinâmica, onde $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$. Este é o coeficiente de equivalência utilizado no Balanço Energético Brasileiro, determinado pela equivalência da energia potencial da água (energia mecânica) em calor (EPE, 2006). Para a oferta e demanda de energia hidráulica e eletricidade, é utilizado o fator de equivalência de 0,29 tep/MWh, resultado da razão entre o consumo médio de óleo combustível em kcal/kWh nas termelétricas brasileiras e o poder calorífico superior do petróleo (3132/10800) (PATUSCO, 1998).

A Figura 3.1 mostra o consumo primário de energia ‘per capita’ mundial, ano de 2006. O Brasil e a Amazônia têm consumo ‘per capita’ inferior a 1,50 tep/habitante, a menor classe de consumo. O maior consumo ‘per capita’ pertence aos países mais ricos, a maior parte situada no hemisfério Norte.

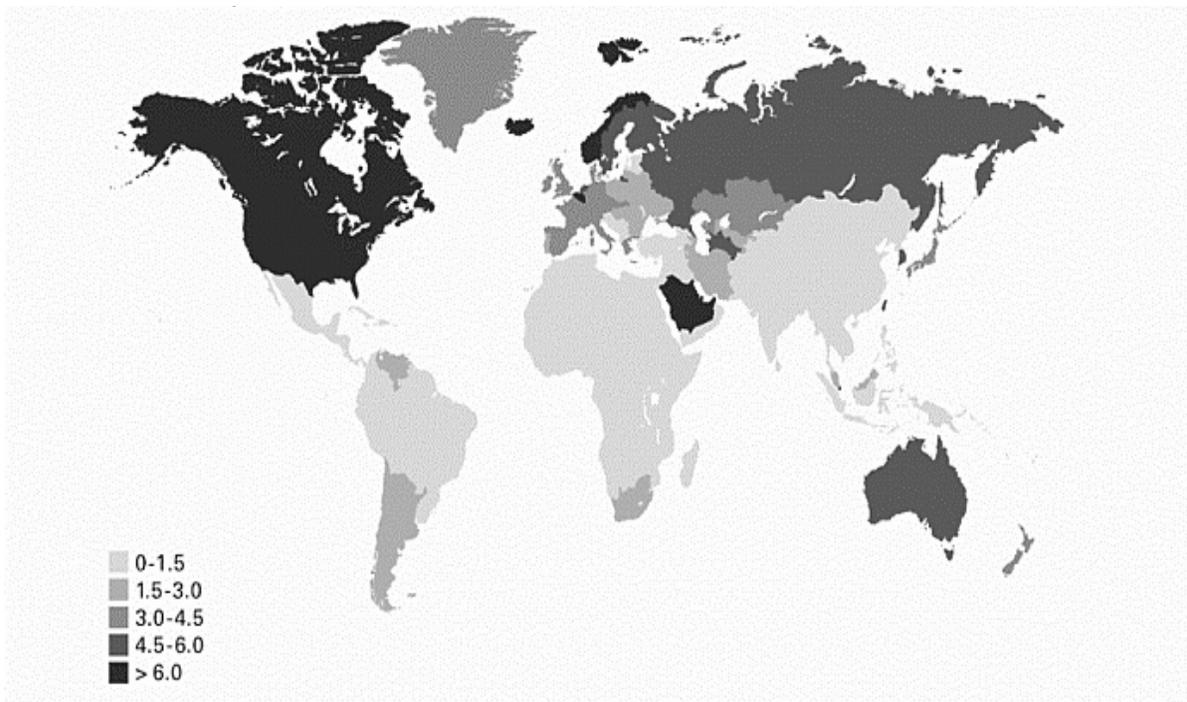


Figura 3.1 - Consumo primário de energia ‘per capita’ mundial, ano de 2006 (tep/habitante).

Fonte: Adaptado de BP Statistical Review, 2007.

A Figura 3.2, compilada com dados de UN, 2007 e EIA, 2007, mostra que países de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) médio, isto é, maior do que 0,5, consomem entre 0,14 e 5 tep/hab, sendo que só os produtores de petróleo têm consumo maior do que 3,1 tep/hab. Os países com IDH baixo consomem de 0,2 a 0,8 tep/hab. Países com consumo per capita acima de 1 tep/hab apresentam IDH superior a 0,7. O Brasil é um destes países, com IDH de 0,77, consumindo 1,07 tep/hab (WORLD BANK, 2007).

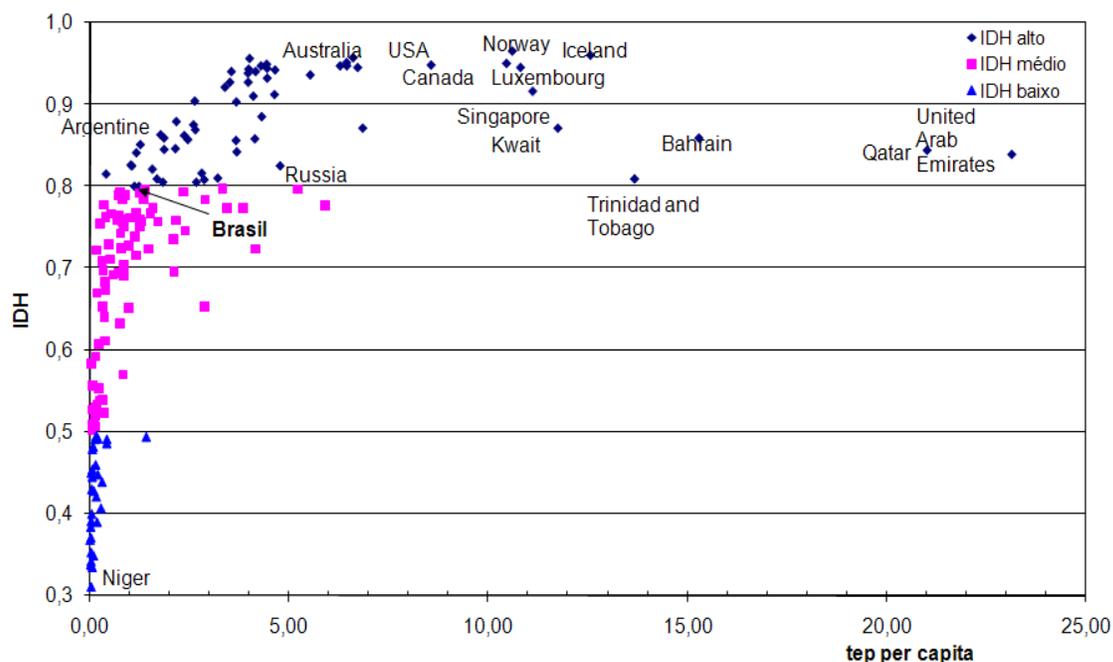


Figura 3.2 - Consumo de energia primária ‘per capita’ de países segundo IDH.

Fonte: Adaptada de EIA, 2007

No Balanço Energético Nacional (BEN), a menos de eventuais ajustes estatísticos, a soma do consumo final de energia, das perdas no transporte, na distribuição e na armazenagem, e das perdas nos processos de transformação; recebe a denominação de Oferta Interna de Energia (OIE), também costumeiramente denominada de Matriz Energética ou de demanda total de energia. O Brasil apresentou no ano de 2005 uma OIE per capita de 1,19 tep, abaixo da média mundial (1,77 tep/habitante no ano de 2004), abaixo da Argentina (1,66) e significativamente abaixo dos USA (7,91) (EPE, 2006).

Se analisada a relação OIE/PIB, a brasileira, de 0,31 tep/mil US\$ (ano de 2000) é maior que a Argentina (0,22), USA (0,22) e Japão (0,11). Esse fato demonstra que tais países consomem menos energia do que o Brasil para produzir o mesmo valor em PIB, compreensível devido o Brasil ser exportador de aço, alumínio, ferroligas, celulose, açúcar

e outros produtos de baixo valor agregado, apresentando estrutura produtiva intensiva em energia e capital, características que explicam parte dessa discrepância (EPE, 2006).

3.4 O SETOR BRASILEIRO DE ENERGIA ELÉTRICA

Ao se analisarem os índices de consumo de energia elétrica, verificam-se grandes disparidades regionais, sendo que a região Sudeste, com apenas 11% do território nacional e 43% da população brasileira consome 60% da energia elétrica do País, e as regiões Norte e Centro-Oeste, que ocupam 64% do país, com 14,5% da população, consomem apenas 10% da eletricidade. Deve-se observar que, do potencial hidrelétrico brasileiro conhecido, cerca de 50% está em uso. O restante está, grande parte, situado na Amazônia em bacias hidrográficas distantes dos grandes centros consumidores, apresentando distribuição demográfica irregular, sendo fácil constatar que as regiões não atendidas pelo “Sistema Interligado de Energia Elétrica” são isoladas, de reduzida população e com reduzidas atividades econômicas (HARGREAVES, 2004).

A Figura 3.3 apresenta a evolução das taxas de eletrificação rural, urbana e total dos domicílios brasileiros no período entre 1970 e 2000. Nela, torna-se claro, que a principal demanda atual pelo atendimento com serviços de energia elétrica está fortemente concentrada na área rural.

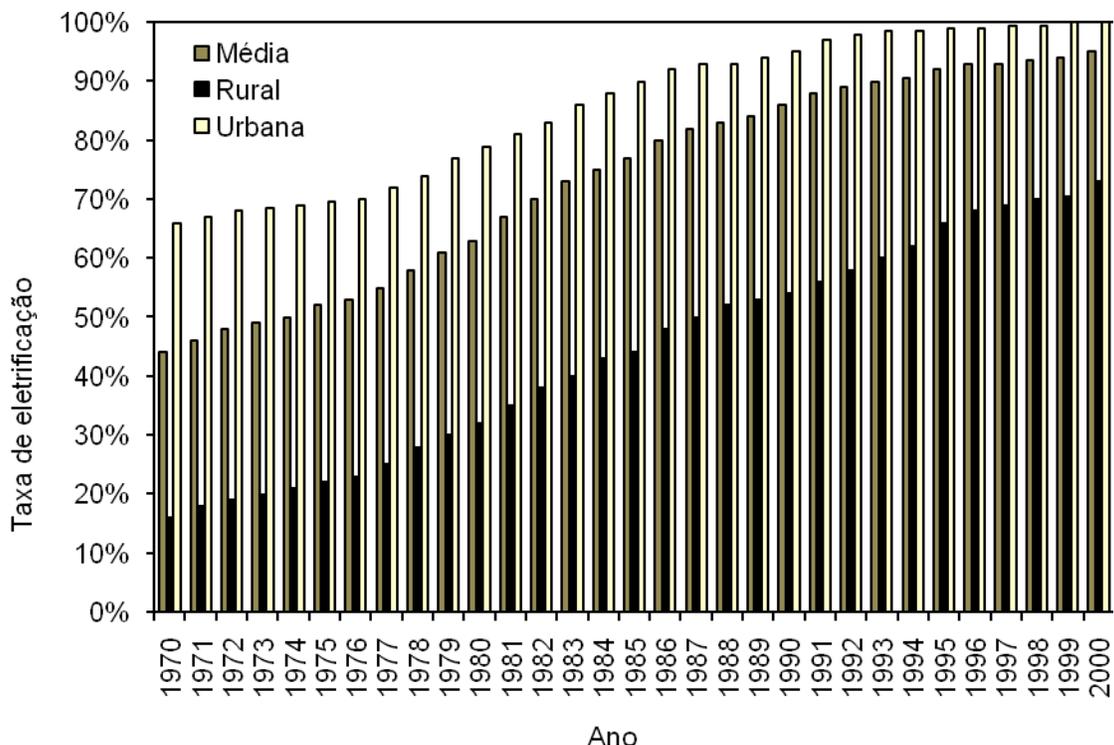


Figura 3.3 - Evolução da taxa de eletrificação brasileira.

Fonte: ANEEL, 2007.

Durante o período de 2004 a 2007, diversos programas de políticas públicas ambientais foram priorizados, com destaque para a construção da Agenda 21 Brasileira; a conservação de mananciais hídricos; a gestão integrada e o desenvolvimento sustentável dos recursos naturais da Amazônia. Em 2004, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que contemplava a contratação de 3.300 MW de energias renováveis, sendo 1.100 MW para cada fonte: eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa (IPEA, 2005).

A Tabela 3.1 mostra a geração de energia elétrica no Brasil. Observa-se que a participação de PCHs, inclusive CGHs, é de apenas 1%, muito pequena, perante os 77% das grandes hidrelétricas. Sugere-se aqui, que a Política Pública de energia elétrica

brasileira deveria buscar uma melhor distribuição nessa matriz, ampliando a participação das PCHs e CGHs.

Tabela 3.1 - Tipos de geração de energia elétrica no Brasil.

| Tipo de geração | Quantidade | Potência de saída (kW) | Energia comercial gerada (kWh) | % |
|-----------------|------------|------------------------|--------------------------------|-------|
| Hidráulica | 154 | 107.956 | 86.598 | 0,10 |
| Eólica | 9 | 22.075 | 22.025 | 0,03 |
| PCH | 208 | 882.822 | 871.345 | 1,05 |
| Hidrelétricas | 138 | 69.161.534 | 64.592.632 | 77,62 |
| Termelétricas | 724 | 18.934.117 | 15.631.972 | 18,79 |
| Nucleares | 2 | 2.007.000 | 2.007.000 | 2,41 |
| Total | 1.235 | 91.115.504 | 83.211.572 | 100 |

Fonte: ANEEL, 2003b.

O consumo de energia elétrica no Brasil tem um perfil distributivo completamente desigual entre as grandes regiões do Brasil. Aproximadamente 12% da população não possui acesso à eletricidade, sendo ampla maioria deste total, principalmente rural. A Tabela 3.2 mostra os níveis do consumo das grandes regiões brasileiras e suas respectivas populações.

Tabela 3.2 - Consumo de energia elétrica por grandes regiões do Brasil.

| Regiões | Consumo elétrico (GWh) | | | Participação no consumo | População |
|--------------|------------------------|---------|---------|----------------------------|-----------|
| | Ano | | | | |
| | 1983 | 1993 | 2000 | % | % |
| Norte | 3161 | 11.459 | 15.765 | 5,1 | 5,9 |
| Nordeste | 20.292 | 38.266 | 49.582 | 16,2 | 28,5 |
| Sudeste | 95.422 | 145.075 | 175.074 | 57,4 | 43,5 |
| Sul | 18.887 | 35.156 | 49.438 | 16,1 | 15,3 |
| Centro-Oeste | 4.858 | 10.638 | 16.346 | 5,4 | 6,8 |
| Brasil | 142.620 | 240.594 | 306.207 | 100 | 100 |

Fonte: EPE, 2006.

O setor residencial brasileiro responde por 25% do consumo total de eletricidade, atendendo cerca de 42 milhões de unidades consumidoras. No setor urbano, os níveis de cobertura são elevados, mas nas áreas rurais, os dados oficiais mostram que 20 milhões de brasileiros não têm eletricidade. No país inteiro, 92% dos domicílios têm eletricidade, porém no Norte, onde está situada a Amazônia, o atendimento é inferior a 80% das residências, enquanto no Sudeste e Sul, o serviço atende mais de 95% dos domicílios. O perfil de consumo brasileiro de energia elétrica por faixa de renda permite visualizar os efeitos da concentração de renda sobre a população atendida. Os dados apresentados mostram a má distribuição dos benefícios do setor elétrico no Brasil, desenvolvido com a contribuição de toda a sociedade brasileira, já que o governo Federal e os estaduais promoveram a implantação e a expansão do sistema (IBGE, 2000).

A Figura 3.4 contém o mapa do sistema nacional de transmissão de energia elétrica, corroborando as observações anteriores.

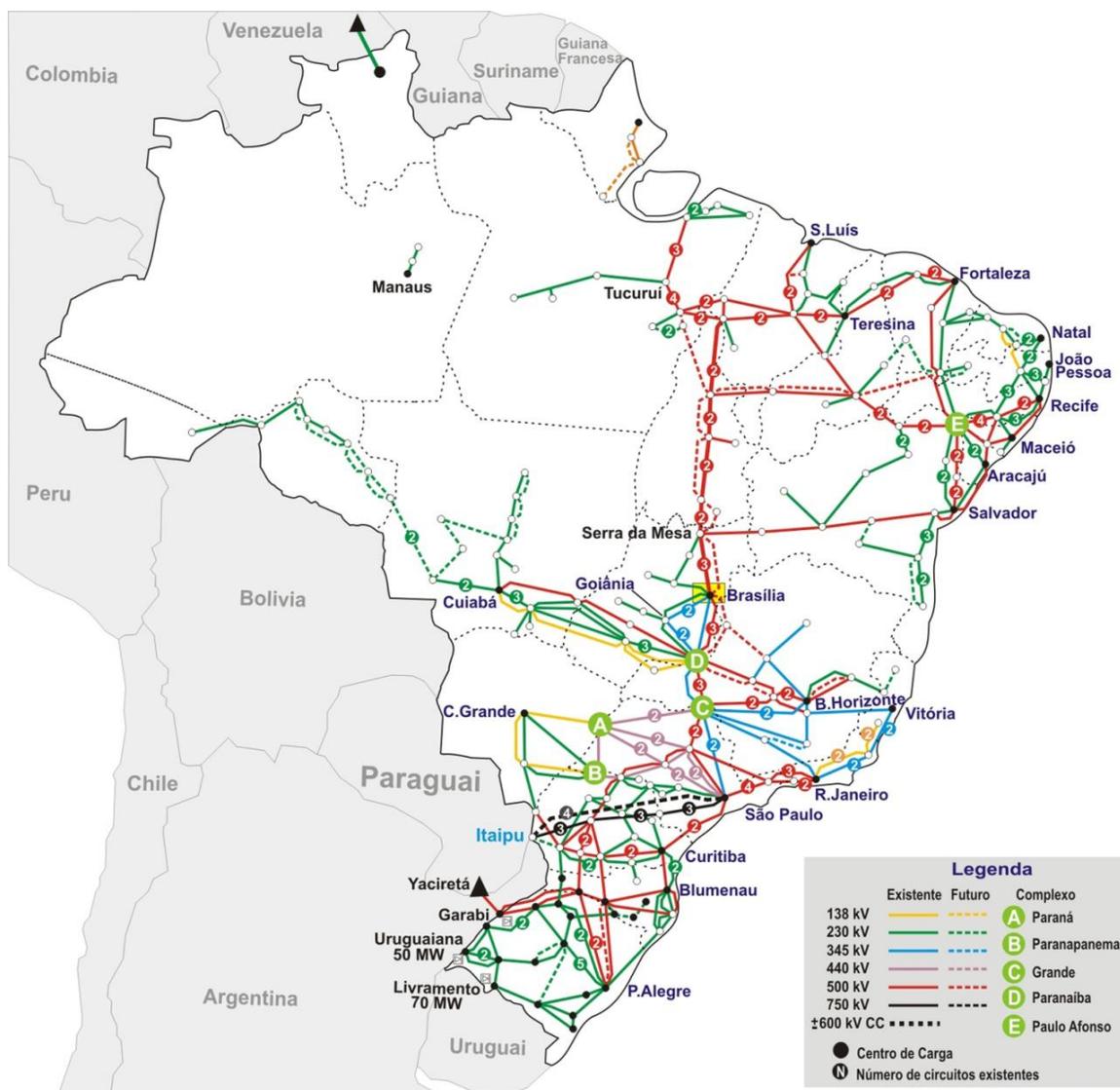


Figura 3.4 - Mapa do sistema nacional de transmissão de energia elétrica.

Fonte: ONS, 2007.

É claramente visível nesse mapa, que a deficiência do atendimento elétrico brasileiro está concentrada principalmente na área rural da região Norte. Cerca de 2,8 milhões de domicílios, que correspondem à cerca de 11 milhões de pessoas, considerando uma média de 4 pessoas por domicílio, não tinham acesso à energia elétrica no ano de

2000. As grandes diferenças ficam evidenciadas nas estatísticas que mostram 9,7 milhões de pessoas carentes de eletricidade na área rural (IBGE, 2000).

3.5 TÓPICOS SOBRE HIDROLOGIA E TECNOLOGIA DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM PEQUENAS BACIAS DA AMAZÔNIA

A geração hidrelétrica, em grande ou pequena escala, representa a mais importante das fontes renováveis de energia, provendo 19% da energia elétrica de nosso planeta. A geração em pequena escala, ocorre na maioria dos casos em pequenas centrais a “fio d’água”, sendo as barragens desnecessárias ou mínimas, as quais geralmente são utilizadas para o desvio da água, e, além disso, para um ganho no aumento da queda natural do curso d’água; e produzindo mínimas áreas alagadas (BEZERRA, 2007). A geração através de CGHs consiste em fonte de energia renovável muito mais concentrada que a solar ou eólica, previsível, em valor e no tempo, com pouca necessidade de manutenção, de longa vida útil, e com mínimos impactos ambientais (PAISH, 2002).

Para se buscar a sustentabilidade da geração de energia hidrelétrica em pequenas bacias da Amazônia, é necessário que o processo de tomada de decisão para a priorização e viabilização desses projetos combata o privilégio do discurso econômico, incorporando aspectos ambientais e sociais, enfrentando simultaneamente os problemas inerentes à pobreza com os relativos à degradação ambiental (PAZ *et al.*, 2007).

As CGHs têm provado ser uma ferramenta muito útil no melhoramento da situação econômica e da qualidade de vida das comunidades rurais isoladas, fornecendo energia para atividades econômicas produtivas, hospitais, escolas e outros fins domésticos (FULFORD *et al.*, 2000).

A tecnologia atual de aproveitamento da energia hidráulica consiste na conversão de energia hidráulica do fluxo de água em energia cinética no eixo da turbina, por sua vez convertida em eletricidade através de gerador. A equação geral para esse processo é:

$$P = \eta \rho g Q H \quad (3.1)$$

onde:

P é a potência da central em Watts;

η é o rendimento global da central, adimensional;

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

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

Q é a vazão turbinada em m^3/s ;

H é a altura líquida de queda.

A Figura 3.5 ilustra um esquema típico de CGH. A água é desviada do rio por uma tomada d'água, a qual direciona o fluxo através de um duto forçado até a turbina.

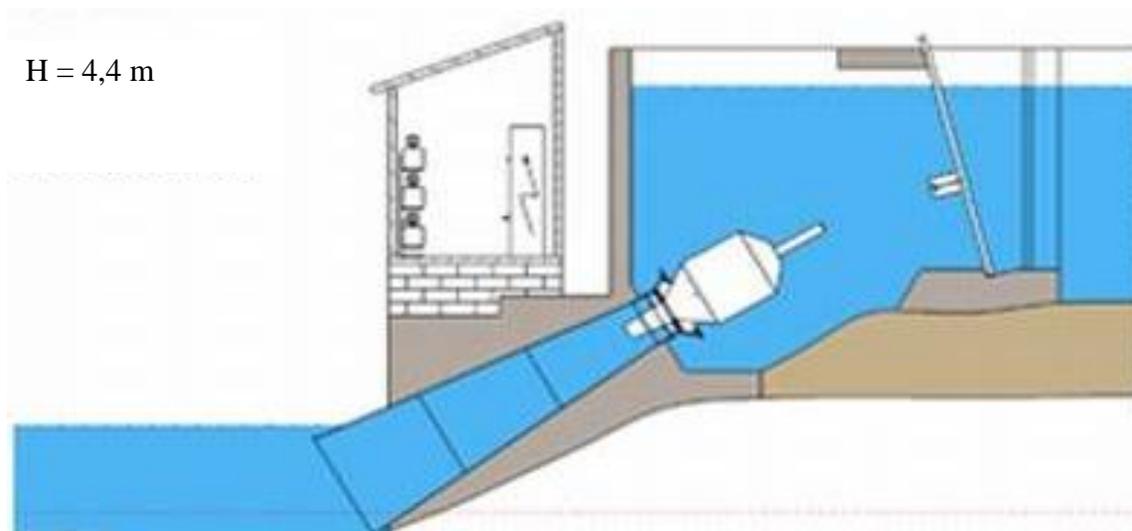


Figura 3.5 - Esquema típico de central geradora hidrelétrica.

Fonte: Adaptado de Energy & Enviro, 2005.

BLANCO *et al.*, 2008, estudaram e propuseram uma metodologia adequada à geração sustentável de energia por CGHs em pequenas bacias da Amazônia, que se constituem em fonte renovável de energia, compatível com a demanda constituída por pequenas comunidades amazônicas. Essas comunidades não dispõem de energia elétrica devido aos elevados custos da ampliação das linhas de transmissão, bem como do rebaixamento de altas para baixas tensões, que não apresentam atratividade às concessionárias que distribuem energia a partir de geração de grandes centrais hidrelétricas. Os autores apresentaram estudos referentes à hidrologia das pequenas bacias da Amazônia, os quais permitem a estimação das curvas de permanência, elemento primordial no dimensionamento da produção de energia hidrelétrica. Tal dimensionamento é peça chave em estudos de viabilidade econômica dos projetos de CGHs, as quais podem ser construídas com material e mão-de-obra local. Tais projetos são viáveis, quando comparados economicamente, a outras fontes de energia, entretanto, muito mais importante que serem viáveis economicamente, tais projetos devem ser viáveis social e ambientalmente de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se que o indicador das Metas dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio da ONU para garantir a sustentabilidade ambiental, ou seja, a relação Oferta Interna de Energia (OIE) / PIB, é mais relevante do ponto de vista econômico, ao passo que a relação OIE per capita tem maior significância sob o enfoque social, permitindo visualizar o atendimento ao cidadão.

O crescimento econômico gera oportunidades a inovações úteis a serem criadas e difundidas. Entretanto, o processo inverso pode também ser valioso. Os investimentos em tecnologia dotam as comunidades de melhores ferramentas, podendo torná-las mais

produtivas e prósperas, oportunizando aos cidadãos mais desenvolvimento e qualidade de vida com justiça social.

O modelo atual de desenvolvimento econômico tem provado que não é capaz de conseguir permear toda a sociedade com seus benefícios, pois as comunidades do entorno das grandes barragens foram prejudicadas em seu habitat territorial em nome de um desenvolvimento que lhes negou, na maioria das vezes, o direito à eletricidade. Estes contra exemplos devem servir para nortear a construção de um futuro com mais justiça social.

A Tabela 3.1 mostra que a participação de PCHs, incluindo nestas as CGHs, é de apenas 1% na geração de energia no Brasil, muito pequena perante os 77% das grandes hidrelétricas. A Figura 3.4, com o mapa do sistema nacional de transmissão de energia elétrica do Brasil, mostra a deficiência do atendimento na Amazônia, que aliada à Figura 3.3, taxa de eletrificação brasileira, urbana e rural, demonstram visualmente a carência de atendimento na zona rural. Tal cenário justifica a conclusão de que, as PCHs e CGHs representam importante alternativa energética para a sustentabilidade das comunidades isoladas da Amazônia.

Assim, o estudo e a modelagem da geração hidrelétrica é tema relevante para a sociedade, merecendo a atenção da academia. Portanto, consubstancia-se valiosa e necessária a reflexão na área dos estudos hidrológicos e de energia, a partir da discussão em torno de um conjunto de conceitos e práticas de investigação científica que permitam contribuir positivamente com novos mecanismos e modelos relevantes à geração de energia a partir de recursos hídricos de pequenas bacias amazônicas de baixa queda, com foco nos impactos positivos desejados no uso desses recursos, tanto para o meio ambiente preservado, como para as comunidades existentes.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO DE CURVAS DE PERMANÊNCIA DE PEQUENAS BACIAS DA AMAZÔNIA UTILIZANDO MODELO CHUVA-VAZÃO NÃO LINEAR COM FATOR DE GANHO SIGMOIDAL

4.1 INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos são ferramentas científicas desenvolvidas para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica. Modelos “chuva-vazão” representam a transformação da precipitação em vazão, a qual ocorre no ciclo hidrológico, incluindo os fenômenos de infiltração, percolação, escoamentos subsuperficial e superficial, bem como a evaporação (TUCCI, 2005).

A modelagem chuva-vazão constitui-se importante ferramenta para projetos de reservatórios de hidrelétricas (KACHROO, 1992b). Contudo, há que se considerar o problema da super parametrização de modelos, tema que tem ocupado vários pesquisadores, havendo casos em que treze parâmetros foram eficientemente substituídos por apenas quatro (JAKEMAN e HORNBERGER, 1993).

Segundo experiência adquirida em uma série de seminários de previsão de vazão fluvial, ocorrida na University College Galway, na Irlanda, (KACHROO, 1986 apud AHSAN e O’CONNOR, 1994) utilizando componentes lineares com fatores de ganho constante, foi demonstrado que a eficiência do modelo é mais sensível à magnitude do fator de ganho do que a real forma da função resposta impulsional. Além disso, de longa data, a não linearidade do processo chuva-vazão já é reconhecida, devido, entre outros fatores, à infiltração, dependente do estado de umidade do solo; e à evapotranspiração (JUN, 2001).

A Amazônia apresenta problemas com respeito à obtenção de dados para a realização adequada da modelagem hidrológica e para avaliação quantitativa dos principais componentes do ciclo hidrológico. Associada à escassez de dados, outro fator complicador da modelagem hidrológica, é a complexidade dos processos hidrológicos da bacia, tais como a evapotranspiração, umidade do solo e geração do escoamento, os quais estão inter-relacionados (RIBEIRO NETO, 2008).

Neste contexto, BLANCO *et al.* (2005) observaram que os dados comumente disponíveis para as pequenas bacias da Amazônia são as chuvas, tendo investigado uma relação de causa e efeito chuva-vazão, para o que aplicaram modelo linear simples, o qual foi calibrado, validado e teve sua sensibilidade analisada sobre pequena bacia hidrográfica amazônica. O modelo foi usado para simular curvas de permanência necessárias aos estudos hidroenergéticos, com resultados satisfatórios, obtendo singular exatidão para as curvas de permanência, com erros menores que 9% na faixa entre $Q_{10\%}$ e $Q_{95\%}$.

O objetivo deste capítulo é contribuir para a simulação de curvas de permanência de vazões de pequenas bacias amazônicas, através de um modelo hidrológico não-linear, calibrado e validado sobre uma pequena bacia hidrográfica da Amazônia, visando o dimensionamento da geração de energia de pequenas centrais hidrelétricas.

4.2 PEQUENA BACIA TESTE

A Figura 4.1 apresenta a bacia teste utilizada para calibrar e validar o modelo hidrológico analisado.

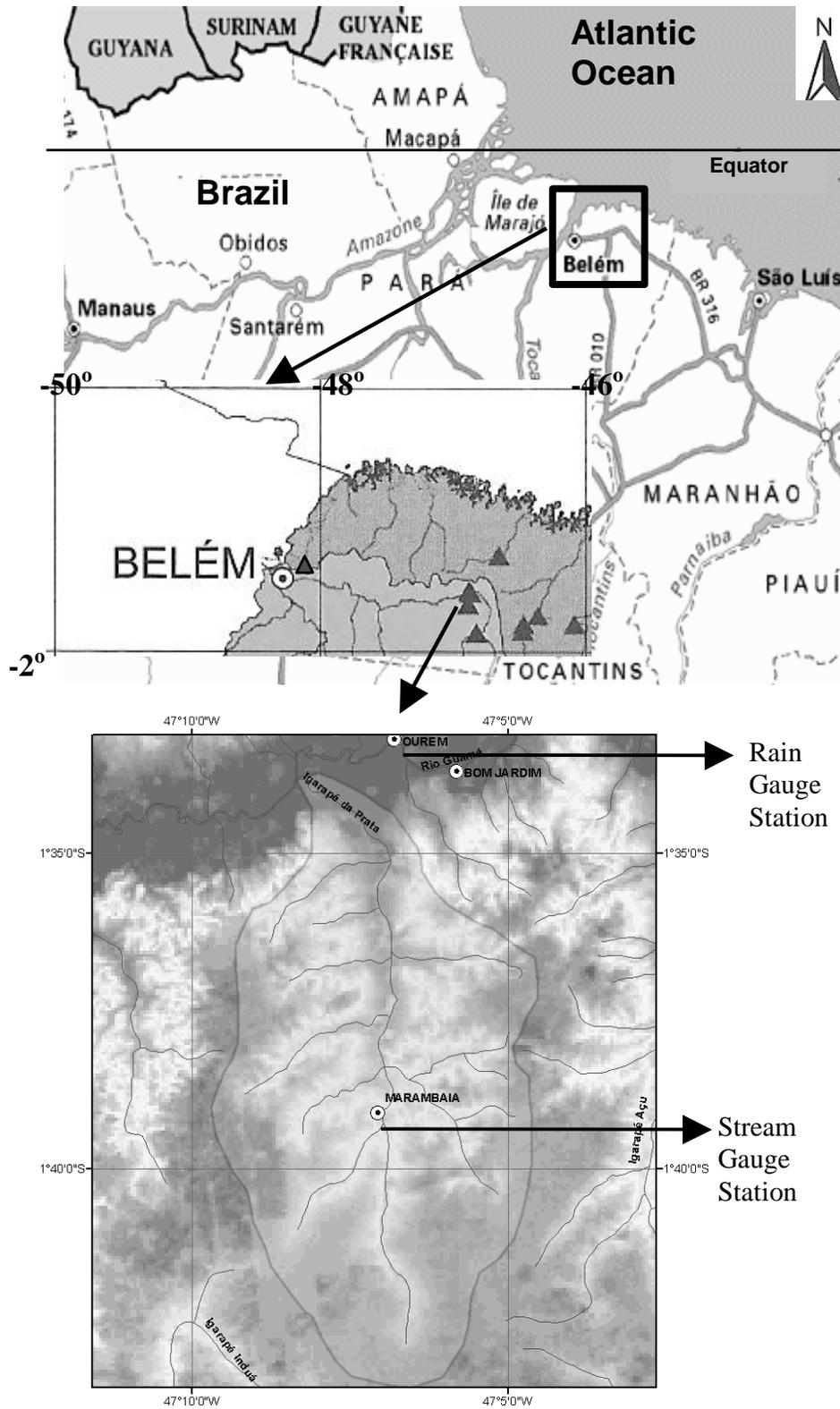


Figura 4.1 - Localização da pequena bacia hidrográfica - PBH.

A PBH da Figura 4.1 está situada a 160 km a leste de Belém, no Estado do Pará, Brasil. Possui área de drenagem de 82 km². A estação fluviométrica 31600000F, denominada Marambaia, nessa bacia, situa-se na latitude -01° 39' 06" e longitude -47° 07' 03", no município de Capitão Poço, sendo a única da região que apresenta longas séries de dados de vazão, porém não dispondo de dados de chuva, para o que se tomou os dados da estação pluviométrica mais próxima, 00147016P, no município de Ourém, latitude -1° 33' 02", longitude -47° 07' 01", que dista 15 km da estação fluviométrica da bacia em estudo, sendo esta a mesma bacia analisada por BLANCO *et al.* (2005). Os autores analisaram a correlação das chuvas da região e concluíram que os dados da estação pluviométrica de Ourém podem ser utilizados como dados da estação fluviométrica Marambaia.

A Figura 4.2 apresenta as curvas de permanência observadas bruta e suavizada da PBH.

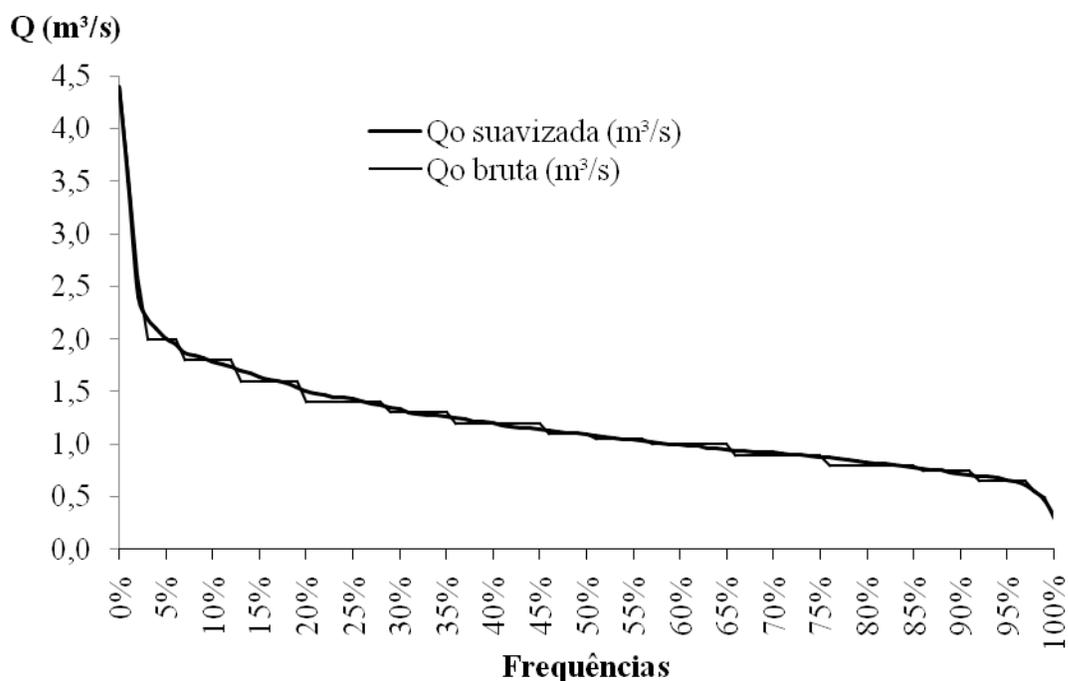


Figura 4.2 - Curvas de permanência de vazões bruta e suavizada.

Observa-se que a curva suavizada representa bem a curva bruta e assim, doravante, a curva suavizada será utilizada na comparação dos resultados de vazões simuladas da PBH.

4.3 METODOLOGIA

4.3.1 Modelo chuva vazão linear simples (MLS)

Desde a introdução da teoria do hidrograma unitário por SHERMAN (1932), a forma não-paramétrica de modelo linear invariante no tempo tem ocupado um nicho singular na história do desenvolvimento dos modelos determinísticos chuva-vazão. No domínio do tempo, a relação entre a entrada $x(t)$ e a saída $y(t)$, de um sistema linear invariante no tempo não-antecipativo contínuo, inicialmente relaxado, é expresso pela integral de convolução da forma,

$$y(t) = \int_0^t u(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (4.1)$$

onde $u(\tau)$ é a função resposta impulsional unitária do sistema. Sendo a variável de entrada $x(t)$ a chuva efetiva da bacia, e a variável dependente de saída $y(t)$ a vazão efetiva decorrente da precipitação, ou seja, a vazão fluvial menos a vazão de base, na foz da bacia. A resposta impulsional do sistema é conceitualmente idêntica ao hidrograma unitário da bacia, como introduzido por CLARK (1945), generalizando a teoria do hidrograma unitário. Por definição, o volume efetivo total de chuva deve igualar o volume do escoamento, portanto o hidrograma unitário instantâneo de uma bacia deve satisfazer a seguinte igualdade

$$\int_0^{\infty} u(\tau)d\tau = 1.0 = \text{volume unitário} \quad (4.2)$$

Contudo, quando um sistema linear é não-conservativo, ou seja, sendo considerada a perda no volume de entrada, devido à infiltração e evaporação, inexistente a igualdade

acima, e a área entre o eixo dos tempos e a função resposta impulsional é frequentemente denominada de fator de ganho de regime permanente do sistema, G , o qual pode ser representado por:

$$G = \int_0^{\infty} u(\tau) d\tau \quad (4.3)$$

ou seja, o Fator de Ganho é menor que a unidade, por incorporar o efeito da infiltração e da evaporação, as quais, no caso de pequenas bacias amazônicas, não são conhecidas, permitindo que o modelo seja aplicável aos dados disponíveis.

Normalizando a função resposta impulsional unitária, com o uso do fator de ganho, como a seguir

$$h(\tau) = u(\tau)/G \quad (4.4)$$

tem-se a partir de (2) que

$$y(t) = G \int_0^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (4.5)$$

sendo a kernel $h(\tau)$ denominada de função resposta impulsional unitária normalizada.

Na modelagem chuva-vazão, a relação explicitada pela equação (4.5) com $G \neq 1$, ocorre quando uma relação linear e invariante no tempo é estabelecida entre a chuva total e a vazão total de uma bacia, em vez de entre a chuva efetiva e a vazão efetiva. O modelo resultante é a forma contínua do Modelo Linear Simples (MLS) (BLANCO *et al.*, 2005). O MLS, embora simples, é um importante ponto de partida na modelagem chuva-vazão, em contraposição à aplicação da teoria do hidrograma unitário, que requer considerável esforço em determinar a chuva efetiva e separar a vazão de base da vazão total, o MLS pode ser aplicado a dados brutos e, como tal, pode servir como verificação expedita da linearidade existente na relação chuva-vazão.

Na ausência de uma relação linear perfeita entre a precipitação (total) $x(t)$ e a vazão (total) $y(t)$, é mais apropriado reescrever a equação (4.5) definindo o MLS com a inclusão de um termo $e(t)$ de erro de saída do modelo, como a seguir

$$y(t) = G \int_0^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau + e(t) \quad (4.6)$$

Assumindo que o termo de erro $e(t)$ tem valor esperado zero e que tanto a entrada $x(t)$ como a saída $y(t)$, apresentam valores esperados não-nulos, verifica-se que o fator de ganho G satisfaz a relação da forma

$$G = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T y(t)dt}{\int_0^T x(t)dt} \quad (4.7)$$

onde, assume-se um sistema matematicamente relaxado no início e no fim. No contexto do MLS, a igualdade acima implica que, para um período suficientemente longo de dados chuva-vazão, o fator de ganho G do MLS é aproximadamente igual à relação entre o volume total de escoamento e o volume total de chuvas acumuladas no período.

No curso do processo de ajuste do MLS utilizando dados reais de chuva-vazão, verifica-se com frequência ser o fator de ganho estimado pela equação (4.3) aproximadamente igual ao coeficiente de escoamento de longo-prazo da bacia considerada, como estimado pela equação (4.6) com T fixado como o período de calibração em vez do infinito (KACHROO e NATALE, 1992a). Isto meramente reflete a linearidade e a invariância no tempo, assumidas e inerentes à formulação do MLS. De todo modo, não é plausível na natureza que a proporção constante de chuva sempre se converta em escoamento. Ao contrário, sabe-se que quanto maior a umidade da bacia, maior a proporção de chuva que se converte em escoamento. Como a formulação do MLS não acomoda este conceito intuitivo, espera-se que a vazão simulada no MLS superestime as vazões de

estiagem e subestime as vazões de cheia, o que é constatado em BLANCO *et al.* (2005) e LABAT e MANGIN (2000).

4.3.2 Modelo de Fator de Ganho Sigmoidalmente Variável (MSV)

Para o modelo proposto é assumida a seguinte relação entrada-saída,

$$y(t) = \int_0^t G(\tau) h(\tau) x(t - \tau) d\tau + e(t) \quad (4.8)$$

onde G é o fator de ganho sigmoidalmente variável.

4.3.2.1 Função sigmoidal

Uma relação entrada-saída da forma dada pela equação (4.8), na qual $G(t)$ apresenta a função de forma sigmoidal doravante será referida como Modelo de Fator de Ganho Sigmoidalmente Variável ou simplesmente MSV, cuja entrada é a chuva total $x(t)$ e a saída é a vazão total $y(t)$.

Embora a notação para o fator de ganho variável $G(t)$ na equação (4.8) e nas equações subsequentes contenham o tempo t como argumento, deve ser entendido que $G(t)$ não pode ser de modo geral expressa na forma paramétrica como uma equação variável no tempo t . Em vez disso, $G(t)$ deve ser vista como uma função do tempo cujo valor instantâneo depende do estado de umidade $u(t)$ do solo da bacia. Esta assertiva abriga o conceito da variabilidade temporal do MSV.

As considerações a seguir são relevantes para a seleção da função adequada para representar o fator de ganho:

i) O fator de ganho varia entre zero e a unidade. Esta condição reflete a equação de conservação da massa, patente na impossibilidade física de geração de escoamento superficial maior que o volume precipitado.

ii) O fator de ganho deve crescer monotonicamente com o aumento da umidade da bacia.

Embora muitas outras funções possam ser consideradas para descrever a variação do fator de ganho com respeito à função umidade estado de umidade do solo da bacia $u(t)$, o presente trabalho concentra-se na função sigmoidal, ou seja,

$$G(u(t)) = \frac{1}{(1+e^{-u(t)})} \quad (4.9)$$

A Figura 4.3 mostra o comportamento da função sigmoidal adotada para o fator de ganho variável do modelo proposto.

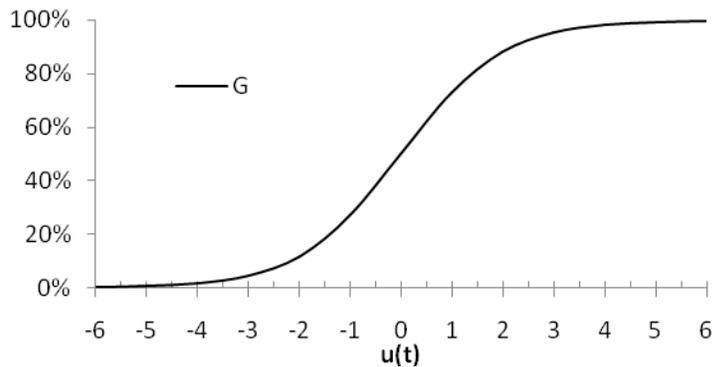


Figura 4.3 - Gráfico da função sigmoidal.

A adoção dessa função leva em consideração o comportamento do fenômeno chuva-vazão na natureza, pois o volume de chuva precipitado divide-se: infiltrando-se no solo, escoando superficialmente e evaporando. Caso o solo se encontre com baixa umidade, a infiltração é facilitada em detrimento às outras duas. À medida que a umidade aumenta, diminui a infiltração e aumenta a parcela que escorre na superfície, percorrendo as depressões naturais do terreno, e expondo o espelho d'água à ação da evaporação.

Observa-se que o fator de ganho $G(u(t))$ na equação (4.9) varia em função do estado de umidade do solo $u(t)$, que pode não ser uma simples função do tempo e que pode depender das entradas e/ou saídas do sistema. Como tal, a equação (9) pode ser considerada

como uma relação entrada-saída não-linear. Assim, a não-linearidade da relação entrada-saída da equação (4.8) é de natureza simples e surge a possibilidade de submeter o MSV a um tratamento linear pela transformação da função fator de ganho conforme a seguir.

Da equação (4.9) segue que,

$$\begin{aligned} (1 + e^{-u(t)}) &= \frac{1}{G(t)} \rightarrow e^{-u(t)} = \frac{1}{G(t)} - 1 \rightarrow e^{-u(t)} = \frac{1-G(t)}{G(t)} \\ \rightarrow e^{u(t)} &= \frac{G(t)}{(1-G(t))} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\text{De onde } u(t) = \text{Ln}\left[\frac{G(t)}{(1-G(t))}\right]$$

(4.11)

Isto equivale à linearização da função sigmoideal pela logaritimização da função (4.9), formada a partir do fator de ganho sigmoidealmente variável $G(t)$, de maneira a simplificar sua utilização na estimação das vazões, como será visto adiante.

4.3.2.2 Função auxiliar chuva diária ponderada $z(t)$

Para KACHROO e LIANG (1992c), a “memória do sistema” consiste no intervalo de tempo entre a ocorrência da precipitação e o instante em que sua influência sobre a vazão cessa. Para a determinação do fator de ganho não linear, variando entre zero e a unidade, é necessário determinar a relação vazão/chuva e em seguida sua normalização, dividindo-a pelo seu máximo no período. Acontece que para dados diários vazão-chuva, podem ocorrer dias sem precipitação, nos quais, portanto, a chuva diária, $x(t)=0$, criaria singularidades que impossibilitariam a determinação da relação vazão-chuva e consequentemente do fator de ganho. Para contornar tal condição, neste estudo adotou-se a função auxiliar $z(t)$, assumida como a chuva ponderada diária para o período formado pelos últimos m dias, os quais representam a “memória do sistema”. A função $z_i=z(t)$ é obtida a partir da convolução dos pesos pelas precipitações diárias, como a seguir,

$$z_i = \frac{1}{d} \cdot \sum_{j=1}^{j=e} (w_j \sum_{k=1}^{k=d} x_{(n=i-j,k+1)}) \quad (4.12)$$

$$\text{onde } \sum_{j=1}^{j=e} w_j = 100\% \quad (4.13)$$

$$\text{e a "memória" é } m = e \cdot d. \quad (4.14)$$

Na equação (4.12), x_n é a precipitação total diária do dia n . Portanto, o período de “memória” com duração de m dias mostrado na equação (4.14) é subdividido em e subintervalos j de d dias, a variação de k de 1 a d varre cada subintervalo, os quais recebem a incidência dos pesos w_j . Tais pesos têm amplitude 0% a 100%, com somatória valendo 100%, conforme a equação (4.13). Após a convolução discreta, dividindo-se por d resulta z_i , que é a chuva ponderada diária dos m dias anteriores ao i -ésimo dia.

4.3.2.3 Função auxiliar estado de umidade do solo $u(t)$

Esta função, de estrutura matemática simples, baseia-se na chuva ponderada diária do dia i , $z_i = z(x(t))$, a partir do pressuposto de que o fator de ganho do dia i depende da função $u_i = u(x(t))$, que representa o estado de umidade do solo no dia. Assim, $G_i = G(u(x(t)))$, e portanto pode-se escrever $G_i = G(u_i)$. Doravante, por simplicidade, chama-se $u_i = u(x(t))$ apenas de umidade.

Sendo os dados de entrada do modelo, pares numéricos chuva-vazão, as entradas da função u_i são os dados de chuva do dia i , x_i , ordenados no tempo, de maneira a prover uma função u_i , cujo domínio e contra-domínio sejam compatíveis com a função sigmoideal adotada para o fator de ganho G do MSV.

Assim, a função $u(x(t)) = u_i$ adotada para representar a umidade do solo da bacia deve incorporar a “memória” do efeito das chuvas recentes e passadas, de modo a fornecer um indicador adequado do estado umidade do solo no dia i . Para isto, assumiu-se a função umidade u_i , dada por

$$u_i = \frac{x_i - z_i}{\bar{x}} \quad (4.15)$$

onde u_i , adimensional, é a função estado de umidade do solo para o dia i ; x_i a precipitação diária do dia i ; z_i a chuva ponderada diária do dia i ; \bar{x} a precipitação média diária para todo o período, seja de calibração ou de validação.

Portanto, o procedimento adotado para estimar u_i e G_i é parcimonioso, sendo estas duas funções dependentes apenas das precipitações que compõem a “memória” do sistema, pois o problema em estudo é o desenvolvimento de um modelo simples chuva-vazão, onde dados de evaporação e componentes explícitos de balanço hídrico não sejam considerados.

4.3.2.4 Resposta impulsional

Após a adoção das funções auxiliares supracitadas, a equação (9) assume a forma

$$y(t) = G[u(x(t))] \cdot z(x(t)) \quad (4.16)$$

Assim, a partir da chuva diária $x(t)$, a qual determina os valores das funções auxiliares $z(x(t))$ e $u(x(t))$, bem como a resposta impulsional $G[u(x(t))]$, tem-se a vazão diária Q_i , que pode simplesmente ser reescrita como,

$$Q_i = G_i \cdot z_i \quad (4.17)$$

ou seja, a vazão diária é igual ao produto do fator de ganho diário pela chuva ponderada diária.

4.3.2.5 Fluxograma do MSV

A Figura 4.4 apresenta o fluxograma do MSV aplicado aos dados de chuva e vazão de uma bacia qualquer. O índice o representa valores observados, e o índice s valores simulados, como por exemplo, na vazão observada Q_o e simulada Q_s .

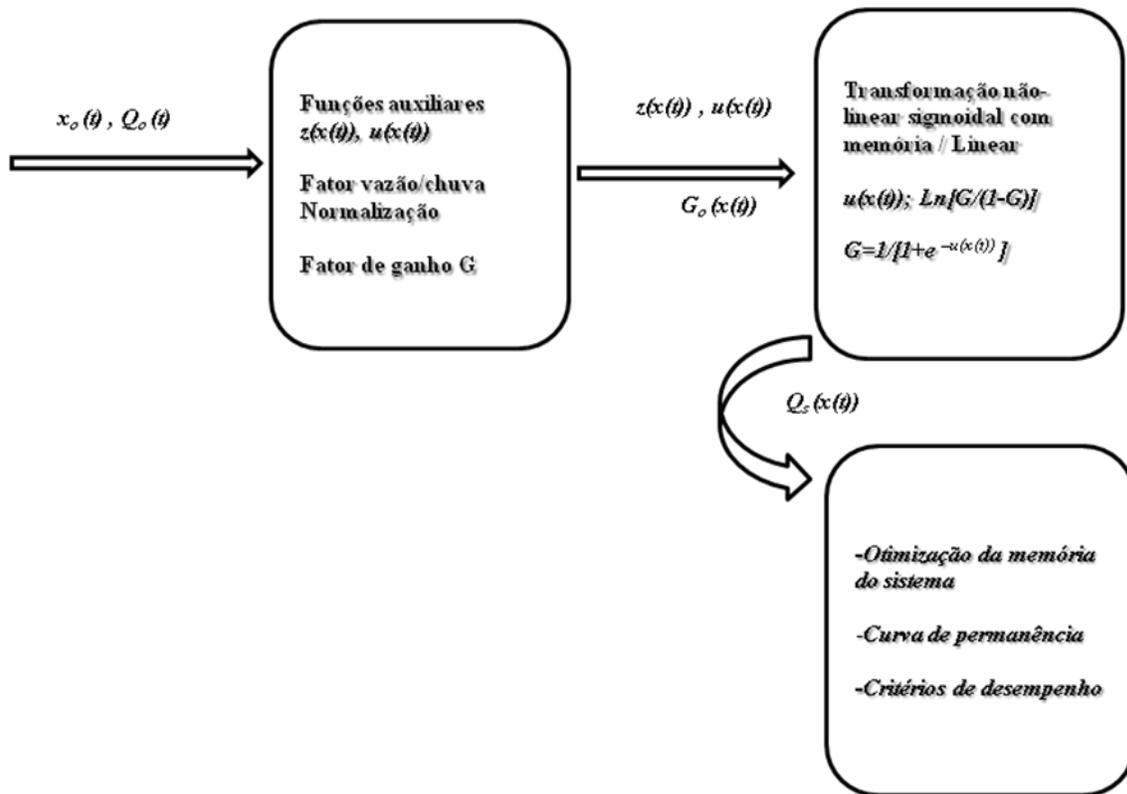


Figura 4.4 - Fluxograma representando a aplicação do MSV.

Observa-se na Figura 4.4, que a partir dos dados de chuva-vazão diários observados, determinam-se os valores das funções auxiliares z e u , assim como do Fator de Ganho G e de $\text{Ln}[G/(1-G)]$. Após isso, utilizando-se a transformação não-linear/linear, através da logaritimização, estima-se u e finalmente os valores de Q_s , a partir dos quais é gerada a curva de permanência de vazões.

4.3.3 Critérios de desempenho

Sendo o objetivo do estudo a simulação de curvas de permanência de vazões, sendo Q_o e Q_s as vazões observadas e simuladas no tempo i , \bar{Q}_o a vazão média observada e n o número total de observações; para avaliação do desempenho do MSV, são sugeridos os seguintes critérios de desempenho:

i) O coeficiente de Nash (R^2), calculado entre as vazões observadas e simuladas, definido por,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (4.18)$$

Quanto mais próximo da unidade, melhor o desempenho.

ii) A raiz quadrada do erro quadrático médio, RMS , calculada entre as vazões observadas e simuladas, dada por,

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}} \quad (4.19)$$

Quanto mais próximo de zero, melhor o desempenho.

iii) Os erros percentuais para a vazão de 95% de permanência, dados por,

$$e_{Q_{95\%}} = \left| \frac{Q_{s95\%} - Q_{o95\%}}{Q_{o95\%}} \right| \cdot 100\% \quad (4.20)$$

Quanto mais próximo de zero, melhor o desempenho.

iv) A média dos erros percentuais no intervalo entre as vazões de $Q_{95\%}$ a $Q_{5\%}$ de permanência, dados por,

$$e_{\text{médio } Q_{5\%} \text{ a } Q_{95\%}} = \frac{\sum_{i=5\%}^{i=95\%} |Q_{si} - Q_{oi}|}{n} \quad (4.21)$$

sendo n o número de valores de Q_i no intervalo. Quanto mais próximo de zero, melhor o desempenho.

4.3.4 Resultados

4.3.4.1 Calibração do modelo

A bacia teste teve seus dados relativos ao período compreendido entre 05/07/1993 e 31/12/1999 utilizados para calibração do modelo. Os seis primeiros meses de 1993 foram utilizados como memória do sistema, simulando-se as curvas de permanência sobre os seis anos e meio restantes das amostras de dados de chuva e vazão, ou seja, entre os anos de

1993 e 1999. Uma das etapas do processo de calibração é a otimização da memória do sistema m , otimizá-la, significa otimizar também e , d e os pesos w (Eqs. 13, 14 e 15). Nesse caso, as funções utilizadas foram o R^2 (Eq. 19) e o RMS (Eq. 20), as quais também foram utilizadas como critérios de desempenho. O método empregado foi o da tentativa e erro. A Figura 4.5 apresenta o valor otimizado de m , maximizando R^2 e minimizando RMS .

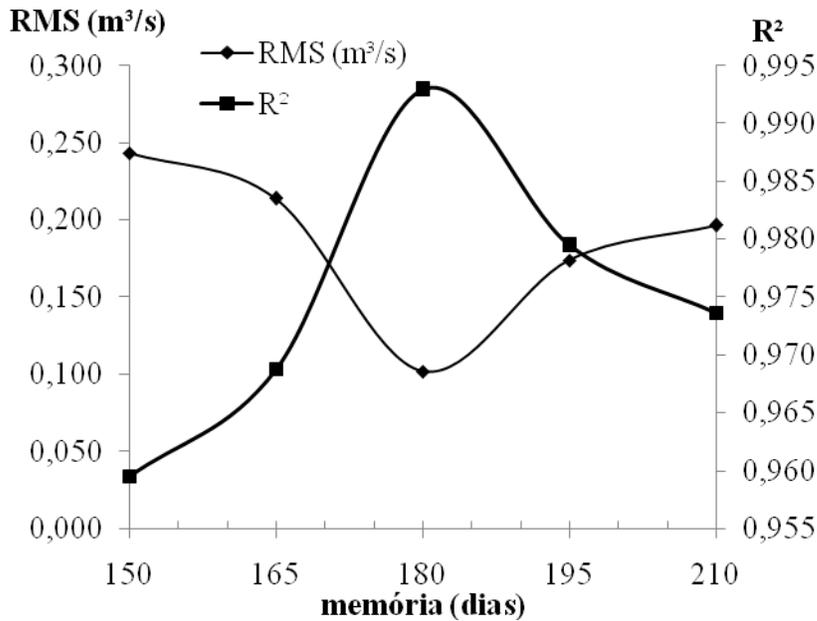


Figura 4.5 - Memória do sistema otimizada para 7 anos.

Assim para $m = 180$, $d = 15$ e $e = 12$, os pesos w são dados pelas Eqs. 23-34.

$$w_1=2,4\%, \text{ para } n=i \text{ até } n=i-14; \quad (4.22)$$

$$w_2=2,4\%, \text{ para } n=i-15 \text{ até } n=i-29; \quad (4.23)$$

$$w_3=4,0\%, \text{ para } n=i-30 \text{ até } n=i-44; \quad (4.24)$$

$$w_4=4,0\%, \text{ para } n=i-45 \text{ até } n=i-59; \quad (4.25)$$

$$w_5=17,5\%, \text{ para } n=i-60 \text{ até } n=i-74; \quad (4.26)$$

$$w_6=17,5\%, \text{ para } n=i-75 \text{ até } n=i-89; \quad (4.27)$$

$$w_7=2,4\%, \text{ para } n=i-90 \text{ até } n=i-104; \quad (4.28)$$

$$w_8=2,4\%, \text{ para } n=i-105 \text{ até } n=i-119; \quad (4.29)$$

$$w_9=17,5\%, \text{ para } n=i-120 \text{ até } n=i-134; \quad (4.30)$$

$$w_{10}=17,5\%, \text{ para } n=i-135 \text{ até } n=i-149; \quad (4.31)$$

$$w_{11}=6,3\%, \text{ para } n=i-150 \text{ até } n=i-164; \quad (4.32)$$

$$w_{12}=6,3\%, \text{ para } n=i-165 \text{ até } n=i-179; \quad (4.33)$$

A Figura 4.6 apresenta as curvas de permanência das vazões observadas, simuladas e o erro entre as mesmas para o período de calibração da PBH.

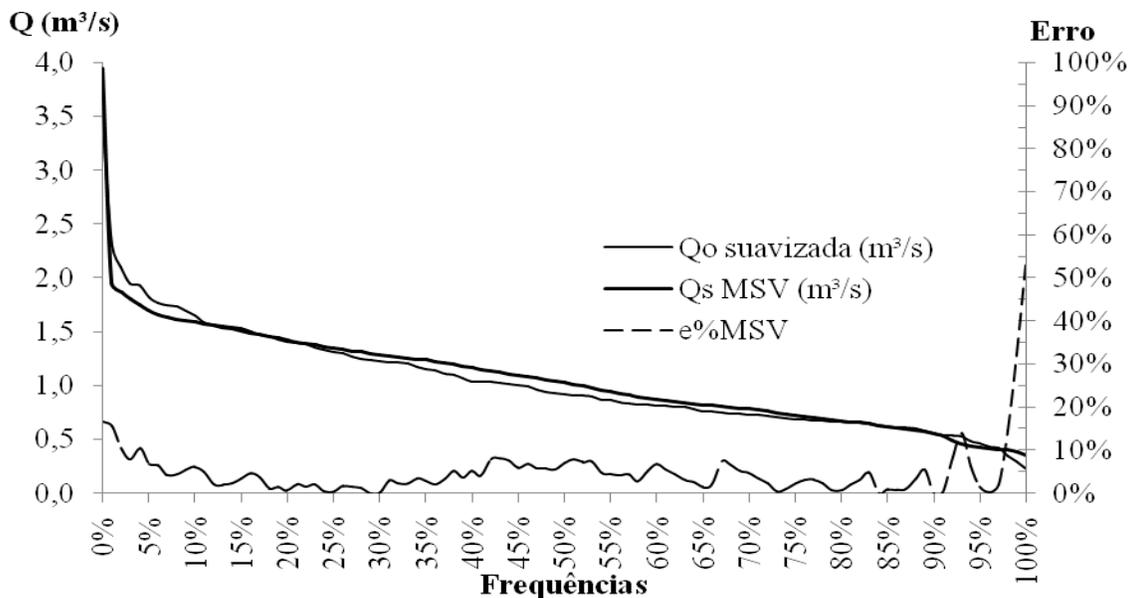


Figura 4.6 - Curvas de permanência das vazões observadas, simuladas e o erro no período de calibração da PBH.

Na Figura 19, verifica-se que para a faixa de frequências entre 5% e 95%, os erros percentuais apresentam valor médio de 6,9%. Nessa Figura, observa-se que para $Q_{95\%}$, as vazões simuladas em relação às observadas, diferem em apenas 0,4%. Observa-se também que nas altas frequências na faixa de $Q_{98\%}$, a $Q_{100\%}$, há um distanciamento das vazões simuladas em relação às observadas, da ordem de 40%. Entretanto, para o objetivo desta

pesquisa, ou seja, dimensionamento de geração de energia, isto não se constitui em obstáculo.

4.3.4.2 Validação do modelo

A PBH teve seus dados relativos ao período compreendido entre 05/07/2000 e 31/12/2006 utilizados para validação do modelo. Observa-se que, com a calibração do modelo e a consequente otimização da memória do sistema, o período da amostra de dados de chuva e vazão é exatamente de 6 anos e 180 dias. Sendo que, os 180 dias do ano de 2000 foram usados como memória otimizada do sistema. A Figura 4.7 apresenta as curvas de permanência das vazões observadas, simuladas e o erro entre as mesmas para o período de validação da PBH. Como o fora na calibração, as curvas de permanência foram simuladas para os seis anos restantes do período de validação, ou seja, do ano de 2000 a 2006.

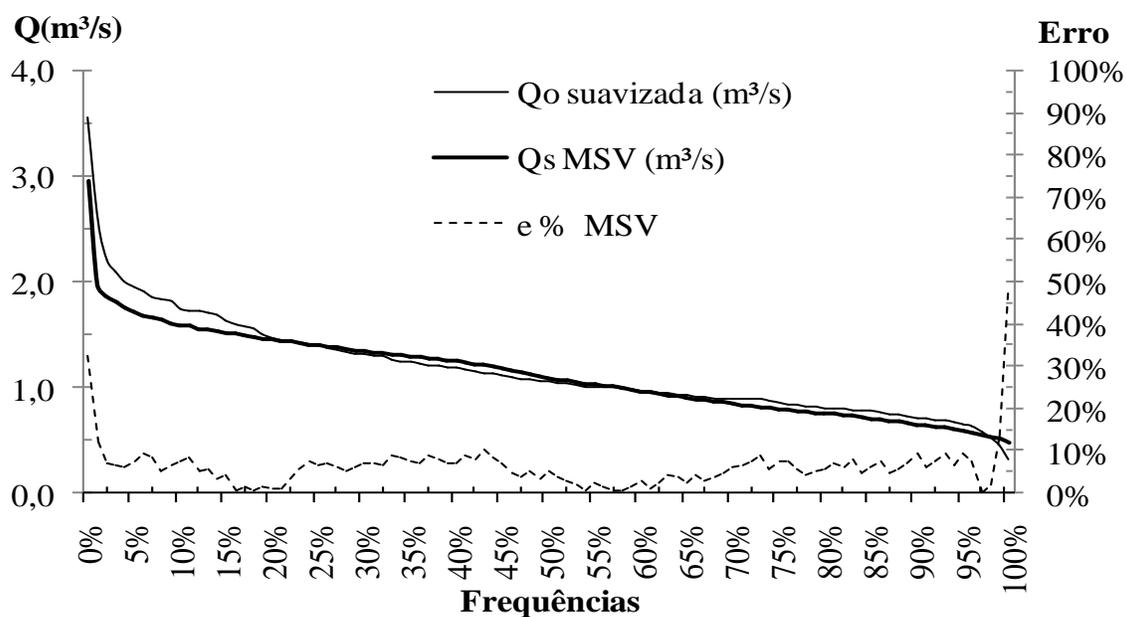


Figura 4.7 - Vazões de permanência observadas, simuladas e erros no período de validação da PBH.

Através da Figura 4.7, verifica-se que na faixa de frequências entre 5% e 95%, os erros percentuais estão limitados a 10%, apresentando valor médio de 6%. Como ocorreu na calibração, também se observa que nas altas frequências na faixa de $Q_{98\%}$ a $Q_{100\%}$, há um distanciamento das vazões simuladas em relação às observadas, da ordem de 40%. A Tabela 4.1 explicita os resultados obtidos para os critérios de desempenho da aplicação do MSV aos dados da PBH.

Tabela 4.1 - Critérios de desempenho do MSV para a PBH.

| Período | Nash | RMS | $e_{Q_{95\%}}$ | $e_{\text{médio}(Q_{95\%}aQ_{5\%})}$ |
|------------|------|------|----------------|--------------------------------------|
| Calibração | 0,97 | 0,08 | 1,7% | 3,9% |
| Validação | 0,99 | 0,10 | 7,7% | 5,5% |

Conforme a Tabela 4.1, as estimativas feitas pelo MSV são significativamente próximas aos valores observados, sendo os erros médios, inferiores a 9,1%, nos intervalos entre $Q_{5\%}$ e $Q_{95\%}$, tanto no período de calibração quanto no de validação.

4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DO MSV COM OS DO MLS

O MSV foi aplicado aos dados do período compreendido entre 01 de janeiro de 1993 e 31 de dezembro de 1999. A Figura 8 apresenta as curvas de permanência das vazões observadas, simuladas e os erros para os modelos MSV e MLS de BLANCO *et al.* 2005.

A Figura 4.8 ilustra as vazões de permanência observadas e simuladas pelo MSV e MLS, bem como os erros.

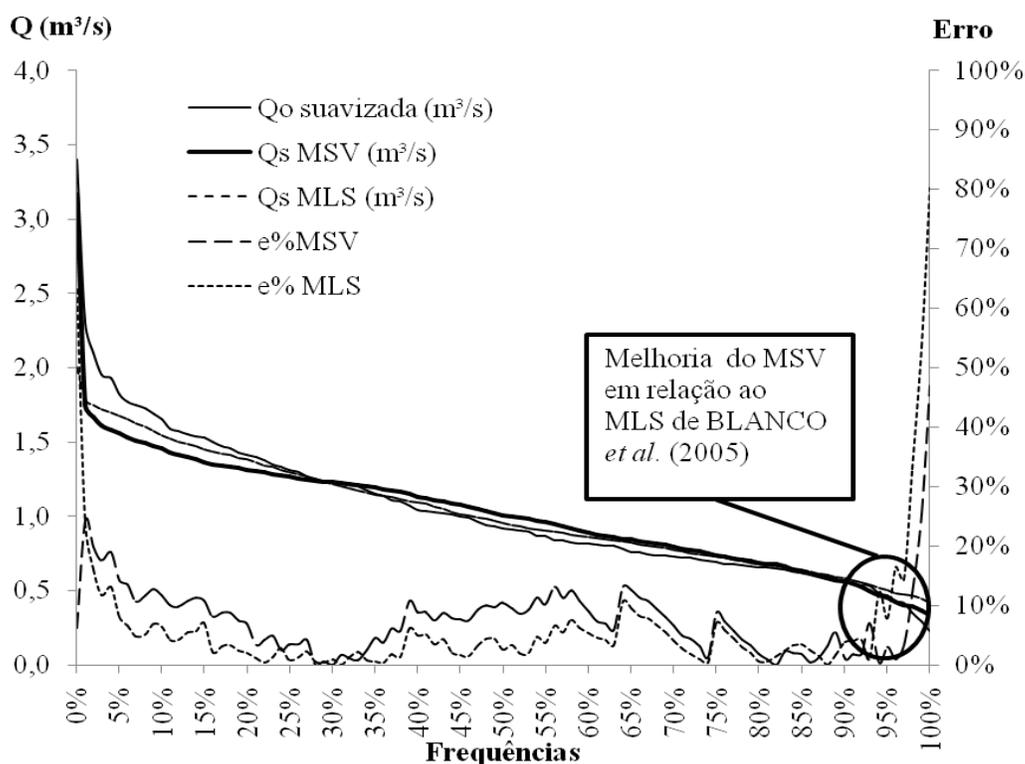


Figura 4.8 - Vazões de permanência observadas e simuladas pelo MSV e MLS, e erros para o período de calibração.

A Figura 4.8 mostra a melhoria das estimativas na faixa de $Q_{90\%}$ a $Q_{100\%}$, do MSV em relação ao MLS. Sendo esta faixa, a que contém os valores de permanência de alta frequência, particularmente $Q_{90\%}$ a $Q_{95\%}$, amplamente utilizados para projeto e dimensionamento dos aproveitamentos hidrelétricos, fica demonstrado, assim, a contribuição da presente pesquisa para a hidrologia das pequenas bacias amazônicas aqui estudadas. Verifica-se, ainda, que o MSV simula melhor as estiagens que o MLS de BLANCO *et al.* (2005). Nas faixas restantes de frequência, o desempenho dos dois modelos foi muito semelhante, com ligeira vantagem do MLS.

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para os critérios de desempenho da aplicação do MSV e MLS aos dados da PBH.

Tabela 4.2 - Desempenho do MSV e MLS, período de 1993 a 1999.

| Modelo | R ² | RMS | e _{Q_{95%}} | e _{médio Q_{95%} a Q_{5%}} |
|--------|----------------|------|------------------------------|---|
| MSV | 0,97 | 0,08 | 1,7% | 3,9% |
| MLS | 0,90 | 0,14 | 9,4% | 3,7% |

Observa-se na Tabela 4.2, novamente, que o MSV simula melhor que o MLS as altas frequências de vazão ($Q_{95\%}$). Em relação ao erro médio no intervalo $Q_{95\%}$ a $Q_{5\%}$, foi menor para o MLS que para o MSV. Explica-se isto, pelo fato do MLS desenvolver sua projeção em torno do valor médio do período, ao passo que o MSV opera considerando as funções chuva diária ponderada $z(t)$ e estado de umidade do solo da bacia $u(t)$.

4.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MSV

Neste trabalho foi efetuada uma análise de sensibilidade do modelo em relação ao tamanho das amostras de chuva e vazão. Para tanto, as curvas de permanência simuladas com as amostras truncadas devem ser similares às curvas da validação. A análise permite estimar o tempo necessário para a aplicação do modelo em pequenas bacias desprovidas de dados fluviométricos. Os dados utilizados na calibração do modelo foram progressivamente reduzidos em 1 ano. A cada redução, a calibração do modelo foi efetuada e aplicada aos 6 anos (2001-2006) de dados de chuva utilizados na validação do modelo para simulação da curva de permanência. A Tabela 4.3 apresenta os valores calculados para os critérios de desempenho segundo a extensão do período de calibração. Analisando-se a tabela, verificou-se que, a qualidade dos critérios de desempenho considerados, diminuiu consideravelmente, quando as séries de dados são reduzidas para 0,5 ano. Assim, concluiu-se que 1,5 anos é a mínima série de dados necessária para a aplicação do modelo analisado.

Tabela 4.3 - Critérios de desempenho para a análise de sensibilidade.

| Período (anos) | Nash | RMS | $e_{Q_{95\%}}$ | $e_{\text{médio}Q_{95\%}aQ_{5\%}}$ |
|----------------|------|------|----------------|------------------------------------|
| 6,5 | 0,99 | 0,10 | 7,7% | 5,5% |
| 5,5 | 0,98 | 0,18 | 2,6% | 5,2% |
| 4,5 | 0,98 | 0,18 | 3,2% | 5,0% |
| 3,5 | 0,99 | 0,15 | 4,5% | 5,7% |
| 2,5 | 0,98 | 0,16 | 5,3% | 5,5% |
| 1,5 | 0,99 | 0,13 | 5,4% | 6,8% |
| 0,5 | 0,47 | 0,88 | 23,1% | 68,5% |

No caso da otimização de m para as séries truncadas, a Figura 4.9 apresenta os resultados da otimização de m relativos à série mínima, ou seja, 1,5 ano, para o período de julho de 1998 a dezembro de 1999. Para as outras séries truncadas de 1,5 ano dentro dos 6,5 anos analisados, os resultados para m também foram iguais a 180 dias.

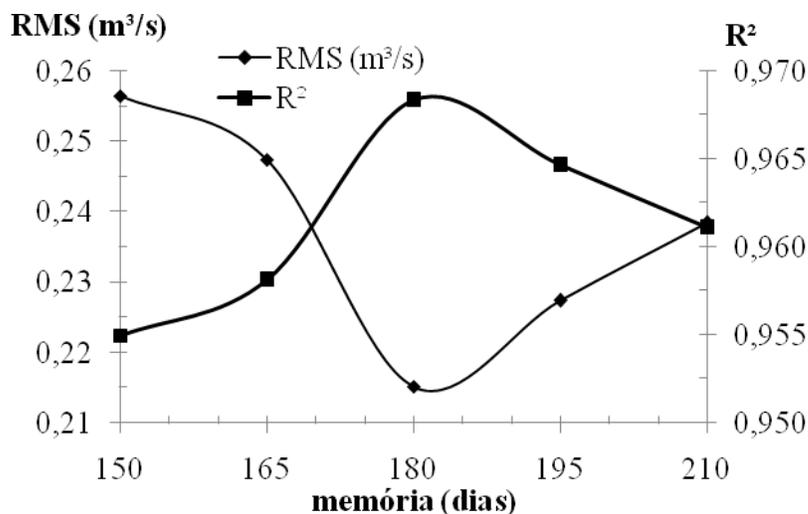


Figura 4.9 - Memória do sistema otimizada para 1,5 anos.

Assim para $m = 180$, $d = 15$ e $e = 12$, os pesos w são dados pelas Eqs. 35-46.

$$w_1=8\%, \text{ para } n=i \text{ até } n=i-14; \quad (4.34)$$

$$w_2=8\%, \text{ para } n=i-15 \text{ até } n=i-29; \quad (4.35)$$

$$w_3=14\%, \text{ para } n=i-30 \text{ até } n=i-44; \quad (4.36)$$

$$w_4=14\%, \text{ para } n=i-45 \text{ até } n=i-59; \quad (4.37)$$

$$w_5=11\%, \text{ para } n=i-60 \text{ até } n=i-74; \quad (4.38)$$

$$w_6=11\%, \text{ para } n=i-75 \text{ até } n=i-89; \quad (4.39)$$

$$w_7=8\%, \text{ para } n=i-90 \text{ até } n=i-104; \quad (4.40)$$

$$w_8=8\%, \text{ para } n=i-105 \text{ até } n=i-119; \quad (4.41)$$

$$w_9=6\%, \text{ para } n=i-120 \text{ até } n=i-134; \quad (4.42)$$

$$w_{10}=6\%, \text{ para } n=i-135 \text{ até } n=i-149; \quad (4.43)$$

$$w_{11}=3\%, \text{ para } n=i-150 \text{ até } n=i-164; \quad (4.44)$$

$$w_{12}=3\%, \text{ para } n=i-165 \text{ até } n=i-179; \quad (4.45)$$

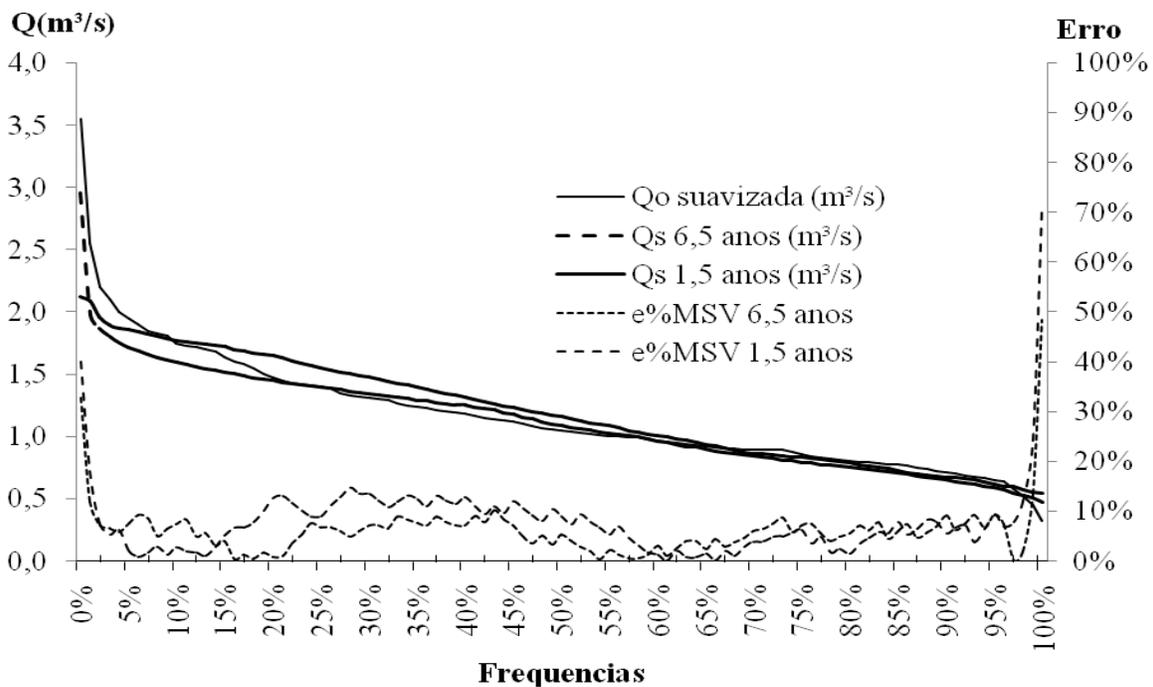


Figura 4.10 - Vazões simuladas e erros para períodos de calibração de 6,5 e 1,5 anos.

A Figura 4.10 compara as curvas de permanência de vazões simuladas com períodos de calibração de 6,5 anos (máximo) e 1,5 ano (mínimo). Nessa figura vê-se que os erros percentuais máximos são inferiores a 15% para as vazões entre $Q_{5\%}$ e $Q_{95\%}$, sendo os erros médios inferiores a 6,8%. Esta comparação mostra que o modelo simula bem, excetuando-se as vazões de cheia, a curva de permanência da PBH, seja com a amostra de 6,5 anos, seja com a de 1,5 ano. Esta análise determinou também, que as curvas de permanência são comparáveis, qualquer que seja o mês de julho tomado como origem no período de 1993-1999. Entretanto, são apresentados, unicamente, os resultados relativos ao período de julho de 1998 a dezembro de 1999. Nesse caso, o presente trabalho estabeleceu dois períodos de estiagem para posicionar as cheias. Já BLANCO *et al.* 2005, estabeleceram dois períodos de cheias para posicionar as estiagens e assim estabelecer a amostra que simula todo o hidrograma. A diferença desses dois resultados está na origem tomada pelos dois modelos: o de BLANCO *et al.* 2005, toma como origem o mês de janeiro; já o modelo do presente trabalho, toma o mês de julho como origem. Entretanto, do ponto de vista hidrológico, os resultados são similares, já que os dois modelos precisam de um ano hidrológico inteiro mais a repetição de um período de cheia ou estiagem para estabelecer a amostra mínima característica da hidrologia da bacia teste.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conceito do Modelo com Fator de Ganho Sigmoidealmente Variável (MSV) adotou o pressuposto fisicamente realista de um fator de ganho variando sigmoidealmente com o estado de umidade predominante do solo da bacia, esta assumida como função das precipitações ponderadas diárias dos cento e oitenta dias antecedentes. O resultado é um modelo não linear simples, o qual representa bem o fenômeno chuva-vazão, contemplando a não linearidade decorrente da infiltração e da evaporação, mostrando-se adequado à

realidade dos dados disponíveis das pequenas bacias da Amazônia, em sua maioria dados de chuva.

Os resultados oriundos da aplicação do modelo começaram pela otimização da memória do sistema, m , a qual teve como funções objetivo RMS e R^2 , que também foram utilizados como critérios de desempenho do modelo, resultando em uma memória otimizada, $m=180$ dias. A otimização da memória $m=180$ dias, iniciando em julho, coincide com o período de estiagem, que ocorre na região de julho a dezembro, fortalecendo, assim, a simulação das vazões de alta frequência.

Com a otimização da memória do sistema, pôde-se aplicar os dados da PBH no MSV, resultando em uma boa simulação da curva de permanência, a qual comparada com a curva de permanência observada, demonstrou erros médios inferiores a 6,9%, nos intervalos entre $Q_{5\%}$ e $Q_{95\%}$, no período de calibração, e menores que 6,0%, no período de validação.

Observa-se também, que o MSV apresenta melhoria de desempenho em relação ao MLS, na faixa de $Q_{90\%}$ a $Q_{100\%}$. Esta faixa contém os valores de permanência de alta frequência, particularmente $Q_{90\%}$ a $Q_{95\%}$, amplamente utilizados para projetos de dimensionamento de aproveitamentos hidrelétricos. Fica demonstrada, assim, a contribuição do presente trabalho para a modelagem hidrológica das pequenas bacias amazônicas aqui estudadas, pelo fato de que o MSV simula melhor as estiagens que o MLS de BLANCO *et al.* (2005) citado. Nas restantes faixas de frequência, o desempenho dos dois modelos foi muito semelhante, com ligeira vantagem para o MLS.

Na análise de sensibilidade, os critérios de desempenho adotados foram o coeficiente de Nash (R^2), o RMS, os erros das vazões de 95% de permanência e os erros médios das vazões de permanência entre 5% e 95%. Observou-se sempre R^2 maior que 98%,

à exceção do período de calibração de 0,5 ano, que foi considerado insatisfatório. Os erros médios são todos inferiores a 6,8%, à exceção do período de calibração de 0,5 ano, que também foi considerado insatisfatório. Logo, 1,5 ano é o tempo mínimo para a aplicação do modelo sobre as pequenas bacias amazônicas sem dados, as quais se localizam em regiões de difícil acesso, o que torna importante a estimação deste tempo para o planejamento das campanhas de medições.

A aplicação do MSV na bacia teste considerada, mostrou que esta abordagem é promissora por apresentar resultados para a curva de permanência de vazões simuladas significativamente próximos aos da curva de vazões de permanência observadas, portanto, fornecendo resultados realísticos para os projetos de dimensionamento de produção hidrelétrica através de PCHs na Amazônia.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DO USO DE DUAS TURBINAS HIDRÁULICAS AXIAIS EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS DE BAIXA QUEDA NA AMAZÔNIA

5.1 INTRODUÇÃO

Uma parte considerável do potencial hidrelétrico brasileiro não utilizado está situado na Amazônia, em bacias hidrográficas distantes dos grandes centros consumidores, em localidades não atendidas pelo “Sistema Interligado de Energia Elétrica”, isoladas, de reduzida população e com reduzidas atividades econômicas (HARGRAEVES, 2004).

BLANCO *et al.* (2008) apontaram como solução ao problema supracitado, a implantação de Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs), além das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Quanto à queda de projeto e potência, essas centrais podem ser classificadas, conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Classificação das PCH quanto à potência e queda de projeto.

| Classificação das centrais | Potência (kW) | Queda de projeto (m) | | |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|------------|
| | | Baixa | Média | Alta |
| CGH | $P < 100$ | $Hd < 15$ | $15 < Hd < 50$ | $Hd > 50$ |
| CGH | $100 < P < 1.000$ | $Hd < 20$ | $20 < Hd < 100$ | $Hd > 100$ |
| PCH | $1.000 < P < 30.000$ | $Hd < 25$ | $25 < Hd < 130$ | $Hd > 130$ |

Fonte: Adaptado de ELETROBRAS, 2002.

As características encontradas em regiões da Amazônia, foram estudadas por MESQUITA *et al.* (1999), os quais sintetizaram esse levantamento e noticiaram que a

queda média dos sítios visitados é de 5 m. Com essas baixíssimas quedas, as centrais hidrelétricas mais apropriadas são as do tipo a fio d'água, que evitam grandes áreas inundadas. Tais centrais utilizam apenas as vazões naturais do rio, dispensando os reservatórios necessários à regularização do volume de água.

Nesse contexto, o presente capítulo visou contribuir para a melhoria de projetos de pequenas centrais hidrelétricas de baixa queda, dotadas de turbinas hidráulicas axiais, procurando melhorias do rendimento energético e econômico dessas usinas em função do tipo de regulação nas turbinas: apenas distribuidor (hélice), somente rotor (semi-Kaplan) ou ambos (Kaplan). Dessa maneira, haverá, conseqüentemente, uma contribuição para o melhor aproveitamento do potencial hidrelétrico da Amazônia, viabilizando, então, o aumento da provisão de energia do interior da região.

Segundo ARNDT (1998), turbinas hidráulicas são equipamentos capazes de converter energia hidráulica, seja cinética ou potencial, em energia mecânica, na forma de trabalho de eixo. Dividem-se em dois tipos: ação e reação. No primeiro caso, a energia hidráulica disponível é inicialmente convertida em energia cinética e depois, já nas pás do rotor da turbina, em energia mecânica. No caso da turbina de reação, tem-se a submersão total do rotor, ocorrendo no fluxo da água diminuição de pressão entre entrada e saída do rotor. Ou seja, há conversão de energia hidráulica para energia cinética sob a forma de rotação de eixo, o qual pode ser transformado em energia elétrica através de um gerador.

A análise dos parâmetros hidráulicos, energéticos e geométricos é essencial no processo de desenvolvimento de turbomáquinas, sendo a correta seleção de turbinas axiais de pequeno porte fator muito importante no desenvolvimento bem sucedido de centrais geradoras hidrelétricas, dotadas de projeto simples e economicamente viável (ARNDT, 1998).

Segundo ESHA (2004b), perante o aumento dos custos econômicos e ambientais de geração por usinas térmicas, pequenas centrais hidrelétricas representam importante tecnologia nos esforços de mitigação das alterações climáticas. O crescimento da população mundial, especialmente nos países em desenvolvimento, requer a ampliação da infraestrutura para sociedade, e a produção de energia por pequenas centrais hidrelétricas, além de econômica, não tem grandes impactos ambientais ou sociais, apresentando ampla gama de benefícios, também possibilitando a geração descentralizada de energia, constituindo-se em fonte de energia muito mais concentrada do que outras fontes renováveis, sendo bastante previsível e de vida útil longa. A produção média de uma pequena central hidrelétrica de 1MW é de 5GWh/ano, provendo eletricidade para 2.200 famílias em um país em desenvolvimento. Na Europa, a geração hidrelétrica de 1 GWh fornece eletricidade a cerca de 220 domicílios europeus, evitando a emissão de 480 toneladas de CO₂.

Conforme CRUZ *et al.* (2008), as turbinas axiais apresentam como característica alta velocidade específica, sendo vantajosas para projetos de usinas hidrelétricas em locais de baixa queda e alta vazão.

Segundo ELETROBRAS (2002) para uma PCH a primeira alternativa de arranjo de turbomáquinas deve ser uma turbina com vazão ótima igual à vazão de 95% de permanência da bacia (Q_{95%}).

BLANCO *et al.*(2008) estudaram o uso de arranjos de duas turbinas em PCHs, concluindo pelo maior aproveitamento energético desse arranjo sobre uma única turbina. Nesse caso, as duas turbinas funcionam juntas no período de cheia, a maior entre elas funciona no período entre as cheias e as estiagens; e a menor funciona no período de estiagens. Este arranjo gera energia por mais tempo do que o arranjo de uma única turbina

projetada para as cheias com uma vazão turbinada igual à soma das vazões turbinadas das duas turbinas ora mencionadas.

Segundo ANAGNOSTOPOULOS e PAPANTONIS (2007), o dimensionamento de uma pequena central hidrelétrica a fio d'água é muito crítico para o custo efetivo do empreendimento. Analisando um estudo de caso de PCH, os pesquisadores verificaram que a eficiência de aproveitamento da energia potencial de arranjos de duas turbinas de diferentes potências operando em paralelo é 25% superior ao arranjo com uma única turbina. Os autores estudaram ainda, a maximização do aproveitamento da energia potencial, atingindo 80% de eficiência energética com arranjos de duas turbinas com razão de potência $P_1/P_2=0,25$.

De acordo com ESHA (2004a), a turbina Kaplan tem pás do rotor reguláveis e pode ter ou não distribuidor também regulável. Se as pás do rotor e o distribuidor são ajustáveis, é descrita como dotada de “dupla regulagem”. Se somente as pás do rotor são reguláveis e o distribuidor é fixo, pode ser chamada de semi-Kaplan. As turbinas hélice apresentam pás do rotor fixas e as do distribuidor reguláveis ou até mesmo fixas.

BALARIM *et al.* (2000) apresentam estudo com estimativas de custo para implantação de microcentrais hidrelétricas apropriadas para comunidades isoladas, no centro-sul do Brasil, que permite a partir dos dados de potência e altura de queda estimar os investimentos necessários à implantação da usina. Nesse estudo, é verificado que em relação ao custo total de implantação, em média, a barragem representa 15%, o canal 12%, o conduto forçado 12%, a casa de máquinas 12%, os equipamentos eletromecânicos 38% e a rede de transmissão 11%. Tal estudo não se aplica a região amazônica, já que no centro-sul do Brasil, o relevo é mais acidentado.

PAISH (2002) pesquisou custos de implantação de microcentrais hidrelétricas, encontrando valores variando de US\$10,000/kW para as menores potências, diminuindo para US\$2,500/kW com o aumento das potências e atingindo em circunstâncias favoráveis o mínimo de US\$1;000/kW.

KALDELLIS *et al.*(2005) efetuaram a avaliação técnico-econômica de PCHs, com análise de sensibilidade, estudando a viabilidade de diversos empreendimentos na Grécia, concluindo pela importância dos custos iniciais de implantação, além dos preços de venda de energia, para essa viabilidade.

DUARTE *et al.*(2010) estudaram a geração local de energia elétrica para atendimento de comunidades isoladas da Amazônia, concluindo que tal provisão de eletricidade não é e nem tende a ser feita pelo sistema interligado nacional, pois devido ao baixo consumo dessas comunidades, elas não são elegíveis técnica, econômica e financeiramente pelas concessionárias. Entretanto, essas populações necessitam de energia para melhoria de sua qualidade de vida e das perspectivas sociais e profissionais, devendo ser consideradas alternativas compatíveis com o Protocolo de Kyoto para essa geração.

5.2 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS DE FLUXO AXIAL

5.2.1 Faixa de aplicação das turbinas hidráulicas segundo a rotação específica

Para aproveitamentos hidráulicos de baixas quedas na Amazônia, as turbinas mais adequadas são as de fluxo axial, conforme Figura 5.1.

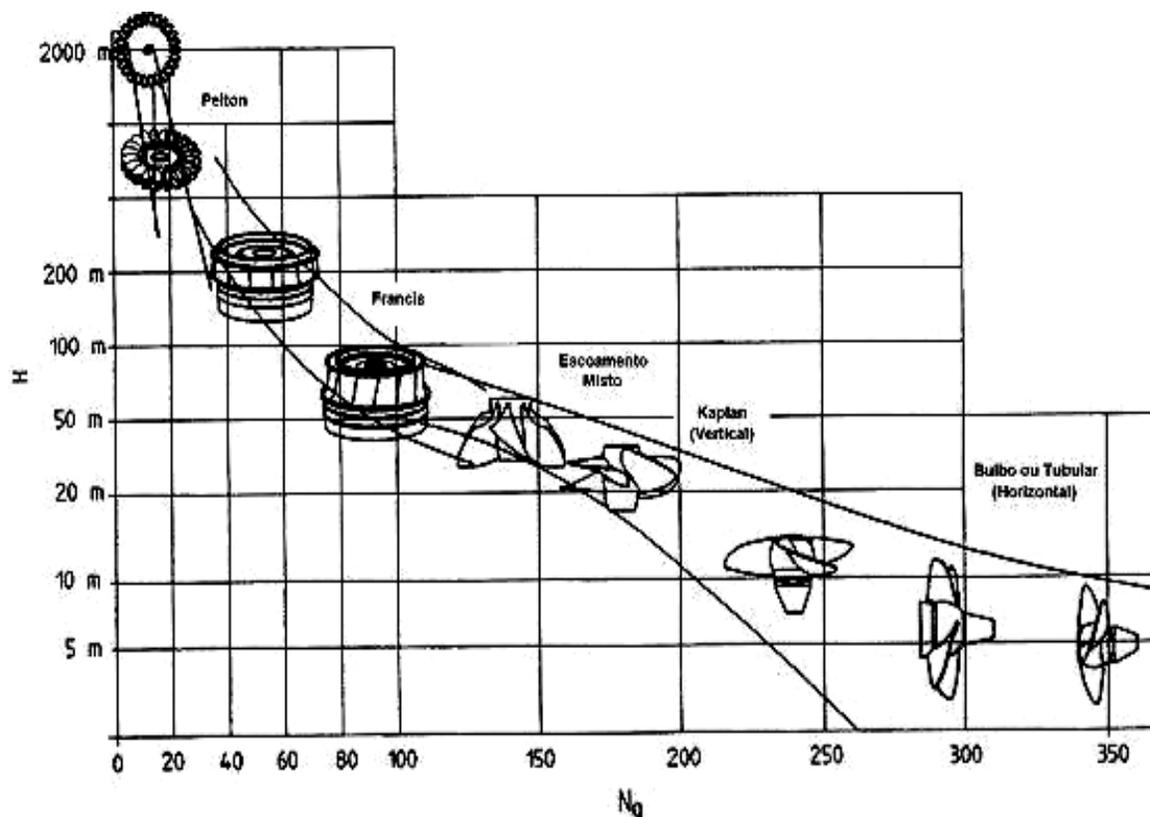


Figura 5.1 - Tipos de turbina em função da rotação específica e da altura de queda.

Fonte: Hydro Power Mechanical Design, ASME, 1996; apud BEZERRA, 2007.

Através da Figura 5.1, observa-se que turbinas hidráulicas adequadas a baixas quedas têm alta rotação específica (turbomáquinas de fluxo axial), enquanto que as compatíveis com altas quedas têm baixa rotação específica (turbomáquinas radiais, diagonais e de impulsão). Nas turbinas axiais, o escoamento principal através do rotor apresenta-se alinhado com o eixo de rotação da máquina, o qual pode ser vertical ou horizontal.

5.2.2 Tipos de turbinas hidráulicas de fluxo axial

A turbina axial deu origem a uma série de turbinas: Hélice, Kaplan, Bulbo, Sifão, S e Straflo. A Figura 5.2 mostra esquemas de turbinas hidráulicas axiais.

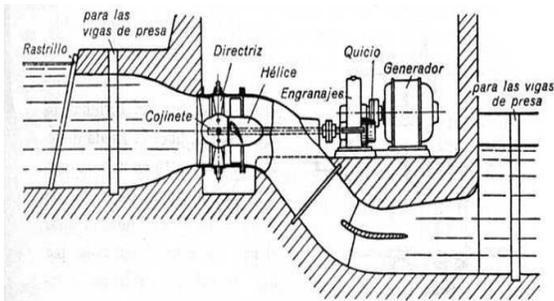


Figura 5.2.a - Central hidrelétrica de baixa queda com turbina hélice do tipo tubular-S.

Fonte: QUANTZ (1976) apud ALBUQUEQUE (2006).

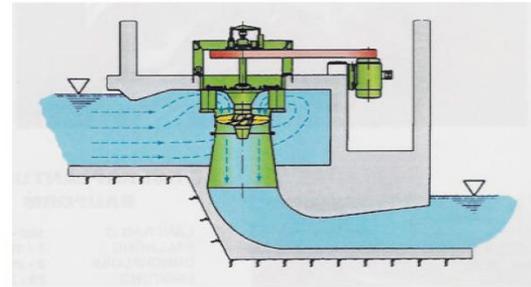


Figura 5.2.b - Central hidrelétrica de baixa queda com turbina Kaplan de eixo vertical.

Fonte: ESHA (2004a).

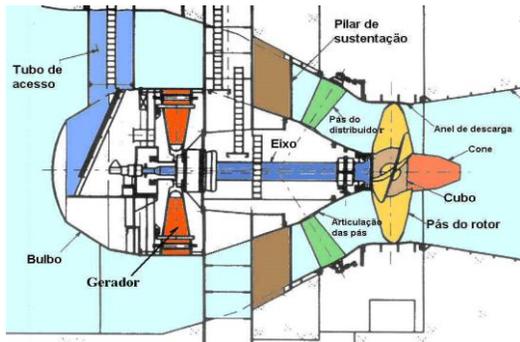


Figura 5.2.c - Turbina bulbo.

Fonte: Mello Jr, 2006

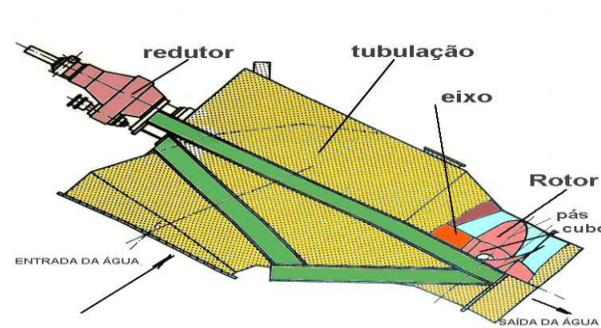


Figura 5.2.d - Turbina Sifão.

Fonte: Mello Jr, 2006

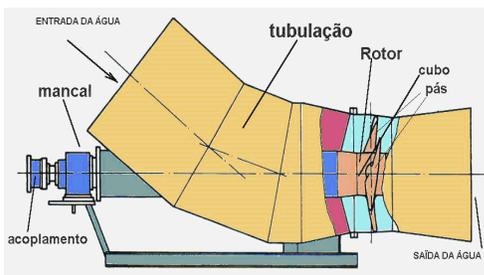


Figura 5.2.e - Turbina tipo "S".

Fonte: Mello Jr, 2006.

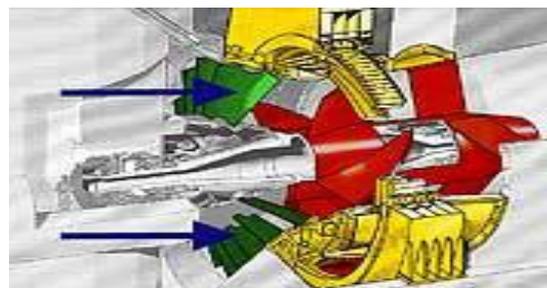


Figura 5.2.f - Turbina Straflo.

Fonte: BEZERRA, 2007.

As turbinas axiais tipo hélice com regulagem são dotadas de mecanismos que permitem a regulagem do ângulo das pás do distribuidor, semi-Kaplan dispõem de

regulagem do ângulo das pás do rotor e Kaplan de dupla regulagem, tanto do rotor como do distribuidor. A turbina Kaplan, ilustrada na Figura 25 (b), é uma turbomáquina de eixo vertical. O sistema de controle é projetado de modo que a variação no ângulo das pás seja acoplada à configuração do distribuidor, a fim de obter a melhor eficiência sobre uma ampla faixa de vazões e quedas. As pás do rotor podem ser reguladas com a turbina em operação, através de comandos ligados a uma haste vertical de deslizamento dentro do eixo oco da turbina. As turbinas Kaplan são certamente as máquinas que permitem o maior número de configurações possíveis. A regulagem é particularmente importante em sistemas de baixa queda, onde, para ser rentável, opera-se em amplas faixas de vazão. Entretanto, em contrapartida, os custos de implantação aumentam, gerando um problema de otimização entre maior eficiência de geração com melhor regulagem e menor custo de implantação com menor eficiência de geração e menor regulagem, fato objeto do presente trabalho.

A Figura 5.3 mostra turbinas e rotores em laboratórios da UFPA e da UNIFEI.



Figura 5.3.a - Turbina hélice -
Laboratório de Turbomáquinas da UFPA.
Fonte: BEZERRA, 2007.



Figura 5.3.b - Turbina hélice -
Laboratório de Turbomáquinas da UFPA.
Fonte: BEZERRA, 2007.



Figura 5.3.c - Modelo reduzido de turbina hélice do tipo tubular, com tubo de sucção desmontado para visualização do rotor (LHPCH - UNIFEI).

Fonte: ALBUQUERQUE, 2006.

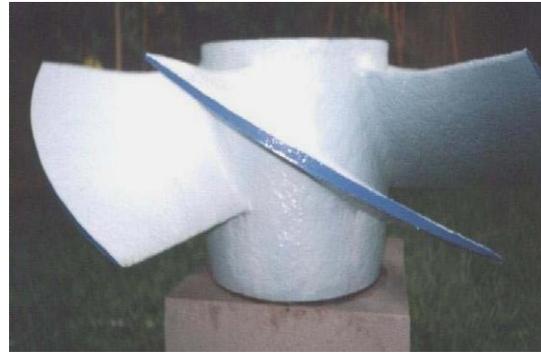


Figura 5.3.d - Rotor hélice (LHPCH - UNIFEI).

Fonte: Albuquerque, 2006.

A Figura 5.3 apresenta turbinas e rotores hidráulicos de fluxo axial, portanto de alta rotação específica, aplicáveis a pequenas centrais hidrelétricas de baixa queda, em laboratórios da UFPA e UNIFEI.

5.2.3 Triângulos de velocidade

Uma estação de uma turbina hidráulica axial é composta de um estator seguido de um rotor. A Figura 5.4 ilustra corte esquemático de turbina hidráulica axial mostrando distribuidor e rotor.

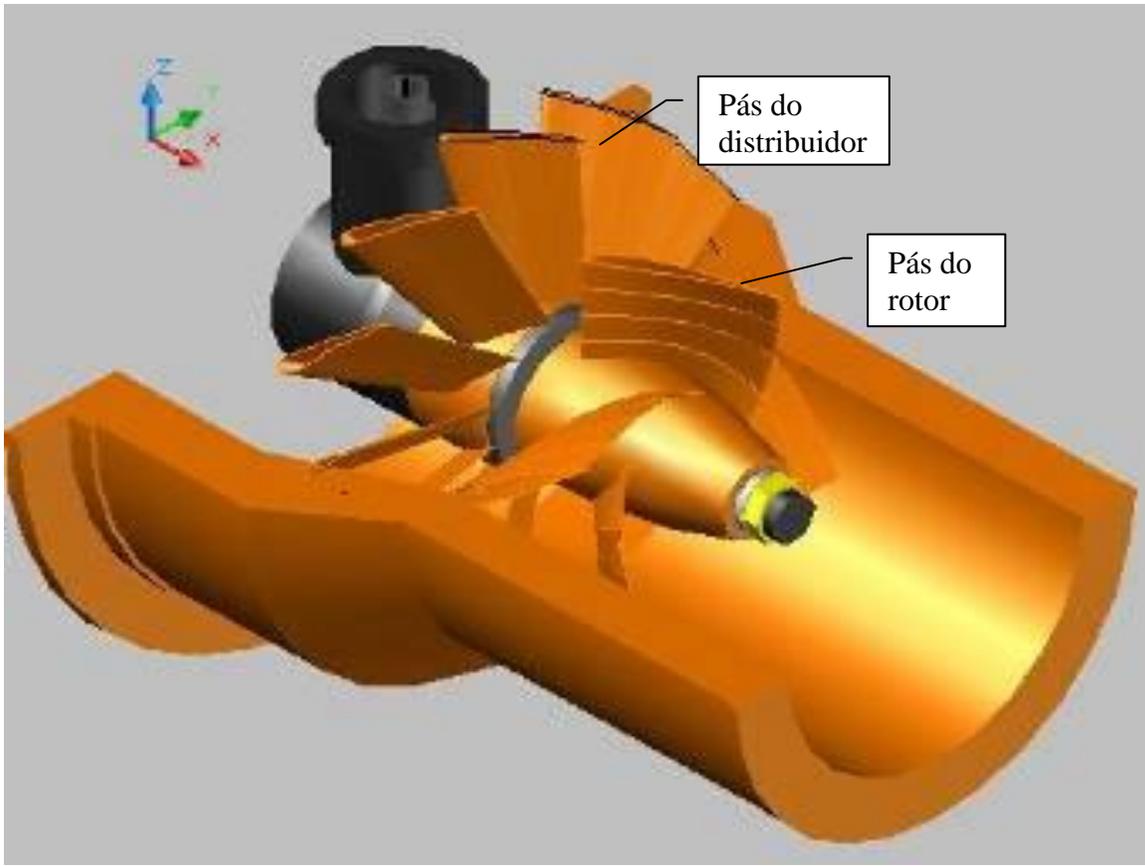
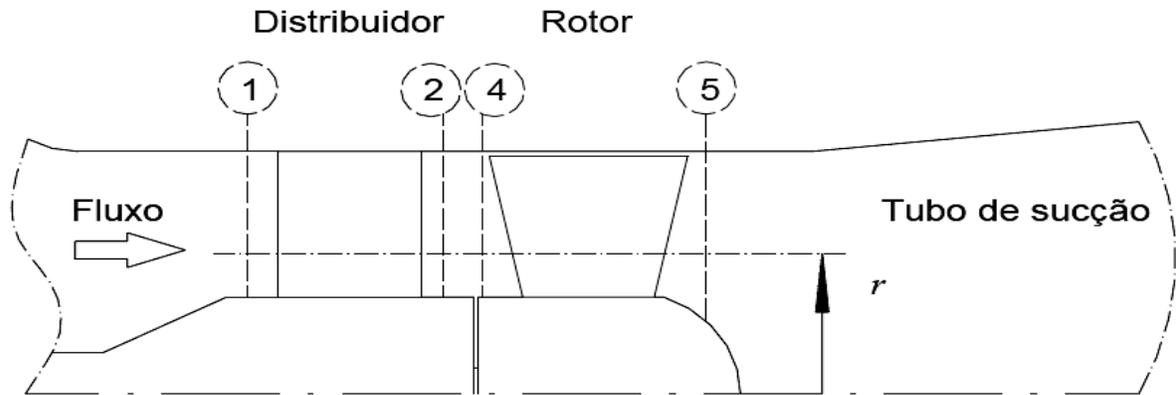


Figura 5.4 - Corte esquemático de turbina hidráulica axial mostrando distribuidor e rotor.

Fonte: BEZERRA, 2007.

Em uma turbomáquina axial, o torque e a potencia são calculados com base nos triângulos de velocidade de entrada e saída no estator e no rotor.

A Figura 5.5 apresenta esquematicamente o fluxo e convenção de pontos na seção meridional de uma turbina hidráulica axial.



1: entrada do distribuidor; 2: saída do distribuidor; 4: entrada do rotor; 5: saída do rotor

Figura 5.5 - Fluxo e convenção de pontos na seção meridional de turbina hidráulica axial.

Fonte: ALBUQUERQUE *et al.*, 2007a.

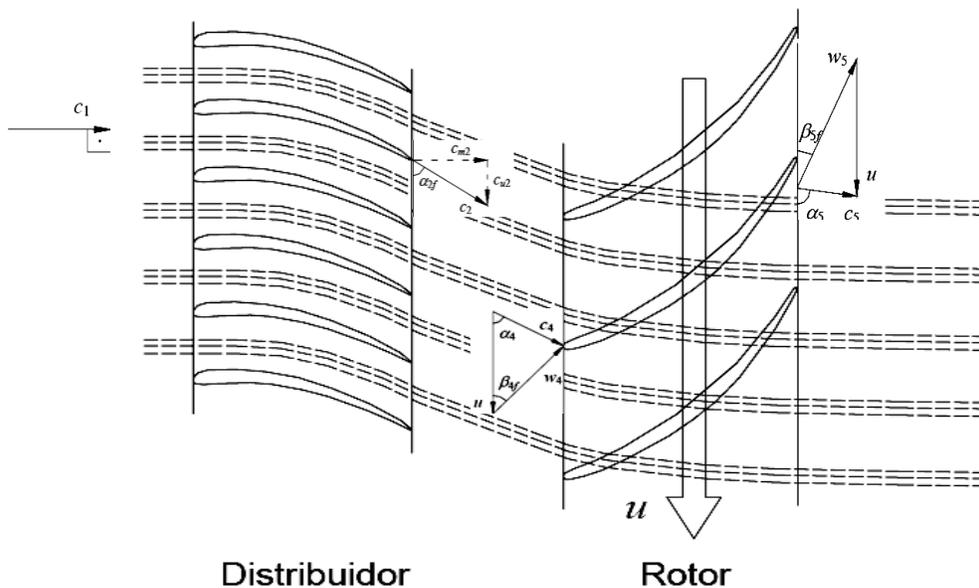


Figura 5.6 - Linhas de corrente, componentes e triângulos de velocidade no distribuidor e rotor de uma turbina hidráulica axial.

Fonte: ALBUQUERQUE *et al.*, 2007a.

A Figura 5.6 mostra as linhas de corrente, componentes e triângulos de velocidade no distribuidor e rotor de uma turbina hidráulica axial. Nesse caso, o campo de velocidades

na entrada do rotor é admitido igual ao da saída do distribuidor, aproximação razoável para a turbina considerada (Figuras 5.4 e 5.5), considerando-se imposta a condição de equilíbrio radial das máquinas de fluxo axial (ALBUQUERQUE, 2006). O trabalho específico das pás pode ser calculado usando-se a equação de Euler das turbomáquinas, equação fundamental das turbinas (QUANTZ, 1976, apud ALBUQUERQUE, 2006):

$$Y_{pá} = u(c_{u4} - c_{u5}) \quad (5.1)$$

onde:

$Y_{pá}$ é o trabalho específico das pás;

c_{u4} é a velocidade circumferencial (ou de condução) das pás na entrada do rotor;

c_{u5} é a velocidade circumferencial (ou de condução) das pás na saída do rotor;

u é a velocidade circumferencial (ou de condução) das pás.

Em geral, a análise bi-dimensional do fluxo através das pás da turbina considera a componente radial da velocidade como sendo nula; com as superfícies de corrente permanecendo cilíndricas e paralelas ao eixo de rotação. Essa condição é possível se a velocidade meridiana permanece constante (CRUZ *et. al.*, 2008).

5.2.4 Faixa de operação das turbinas hidráulicas axiais

Essas turbinas, se dotadas de dupla regulagem, portanto do tipo Kaplan, podem operar entre 15% e 100% da vazão máxima prevista. Sendo do tipo semi-Kaplan, dotadas apenas de regulagem do rotor, podem trabalhar entre 30% e 100% da vazão máxima de projeto. A turbina Hélice apresenta faixa de operação de 55% a 100% da carga nominal (ESHA, 2004a).

Segundo ELETROBRAS (2002), a turbina tipo Kaplan, de dupla regulagem, opera na faixa de 20% a 100% da vazão máxima, a turbina semi-Kaplan, de regulagem apenas do rotor, apresenta faixa de operação de 40% a 100% da vazão máxima e a turbina Hélice (pás

do rotor fixas) apresenta faixa de operação de 80% a 100% da vazão máxima. A Tabela 5.2 mostra a faixa de operação das turbinas Kaplan, semi-Kaplan e hélice.

Tabela 5.2 - Faixa de operação das turbinas Kaplan, semi-Kaplan e hélice.

| Tipo de turbina | Faixa de operação em relação à vazão máxima |
|----------------------------------|---|
| Kaplan (dupla regulagem) | 20% a 100% |
| Semi-kaplan (regulagem do rotor) | 40% a 100% |
| Hélice (sem regulagem) | 80% a 100% |

Fonte: Adaptado de ELETROBRAS (2002).

A Figura 5.7 mostra as curvas típicas de eficiência de turbinas hidráulicas. O eixo horizontal apresenta o percentual da carga em relação à carga de máxima eficiência.

Eficiência (%)

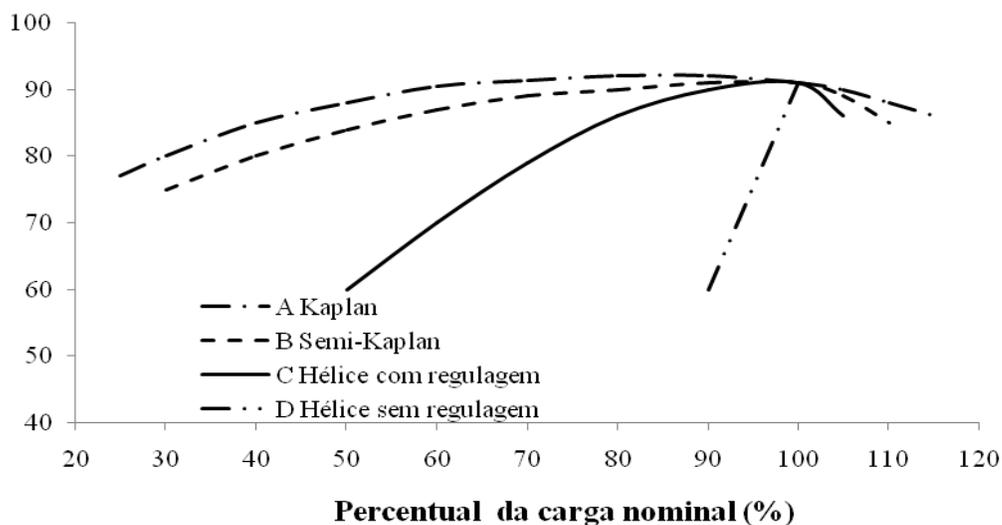


Figura 5.7 - Eficiência de tipos de turbina em função da carga.

Fonte: Adaptado de ARNDT (1981).

Na Figura 5.7 é possível visualizar as curvas de eficiência de turbinas hidráulicas axiais com diferentes tipos de regulagem. A curva *A* corresponde a turbinas Kaplan (dupla regulagem), a curva *B* a turbinas Semi-Kaplan (apenas rotor regulável), a curva *C* a turbinas Hélice com regulagem apenas do distribuidor e a curva *D* a turbinas Hélice sem regulagem. Observa-se que as turbinas Kaplan apresentam em sua curva (*A*) um platô superior ao platô das semi-Kaplan (curva *B*). As turbinas hélice apresentam uma curvatura muito mais acentuada (curva *C*), tendo, portanto, uma maior sensibilidade à variação de vazões que as duas anteriores.

5.2.5 Códigos computacionais que calculam as curvas características das turbinas

A utilização das turbinas hidráulicas axiais foi estudada com o auxílio de duas ferramentas computacionais consideradas adequadas à predição de desempenho de turbinas axiais de baixa queda, que são os códigos computacionais CARTHA e TURBNPRO, tendo este último sido utilizado para a geração das curvas características das turbinas devido o mesmo determinar a faixa de operação das turbinas.

5.2.5.1 CARTHA

O código computacional CARTHA (CARacterísticas de Turbinas Hidráulicas Axiais) pode ser utilizado para gerar as curvas características das turbinas hidráulicas axiais, porém devido o mesmo não determinar a faixa de operação da turbina, que é necessária para o cálculo da geração de energia hidrelétrica, fez com que o autor optasse pelo uso de outro software, o TURBNPRO.

A versão inicial do código computacional CARTHA foi desenvolvida por BIRUEL (1999), através de projeto de pesquisa no âmbito do programa trópico úmido do CNPq, em parceria da Universidade Federal do Pará e Universidade Federal de Itajubá. A versão atual utilizada neste trabalho foi obtida junto ao Prof. Nelson Manzaneres Filho, da UNIFEI,

tendo sido aprimorada sob sua orientação na Dissertação de Mestrado de ALBUQUERQUE (2006) e posteriormente adaptada para tratar problemas de regulação (ALBUQUERQUE *et al.*, 2007b). Essa versão do código computacional permite a simulação de três modos de controle das turbinas: regulação no distribuidor (turbina Hélice), no rotor (turbina semi-Kaplan) ou ambos, rotor e distribuidor (turbina Kaplan). O código computacional foi escrito em MatLab[®].

O CARTHA fornece avaliações expeditas das principais características operacionais de uma turbina axial, partindo de seus dados geométricos 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 código computacional, o qual utiliza equacionamento quasi-bidimensional do escoamento, utilizando triângulos de velocidade em seções estratégicas da turbina e correlações simplificadas para o cálculo dos desvios angulares do escoamento e das perdas hidráulicas.

Segundo ALBUQUERQUE (2006), no CARTHA, as perdas hidráulicas ou de escoamento através da turbina são avaliadas usando-se correlações empíricas da literatura relativas às parcelas mais significativas em turbinas axiais. Para o distribuidor, admitem-se apenas perdas de perfil, causadas pelo atrito viscoso com as aletas. Já para o rotor, além das perdas de perfil, consideram-se as perdas por choque na entrada, ocasionadas por ângulos desfavoráveis ao escoamento incidente sobre as pás. Têm-se também as perdas no tubo de sucção, associadas à recuperação imperfeita de pressão estática nesse difusor e que, em turbinas de baixa queda, representam normalmente a maior parcela da perda total. As

perdas são calculadas após a determinação dos perfis de velocidade nas saídas do distribuidor e do rotor, pois são correlacionadas às velocidades nessas seções.

O código computacional CARTHA pode ser usado em diversas situações: avaliação 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/máquina elétrica; e verificação dos dados nominais de desempenho fornecido pelo fabricante da turbina. Na versão utilizada, o código computacional gera as seguintes curvas operacionais para:

A) Regulagem do distribuidor:

A1) Vazão (m^3/s) em função do ângulo de saída do distribuidor ($^\circ$);

A2) Rendimento (%) em função do ângulo de saída do distribuidor ($^\circ$);

A3) Rendimento (%) em função da vazão (m^3/s);

A4) Potência de eixo (kW) em função da vazão (m^3/s), denominada curva de carga;

A5) Manutenção da altura disponível (m) em função do ângulo de saída do distribuidor ($^\circ$);

B) Regulagem do rotor:

B1) Vazão (m^3/s) em função do ângulo de giro das pás ($^\circ$);

B2) Rendimento (%) em função do ângulo de giro das pás ($^\circ$);

B3) Rendimento (%) em função da vazão (m^3/s);

B4) Potência de eixo (kW) em função da vazão (m^3/s), denominada curva de carga;

B5) Manutenção da altura disponível (m) em função do ângulo de giro das pás ($^\circ$);

C) Regulagem dupla (rotor e distribuidor):

C1) Dupla regulagem ótima em função do ângulo de giro das pás ($^\circ$) e da abertura do distribuidor ($^\circ$);

C2) Rendimento (%) em função da vazão (m^3/s);

C3) Curva de carga, constituída pelo gráfico da potência de eixo (kW) em função da vazão (m^3/s);

C5) Manutenção da altura disponível (m) em função da vazão (m^3/s)

As curvas mais importantes para o presente estudo são as de rendimento e de carga.

A Figura 5.8 apresenta o fluxograma do código computacional CARTHA na sua versão atual.

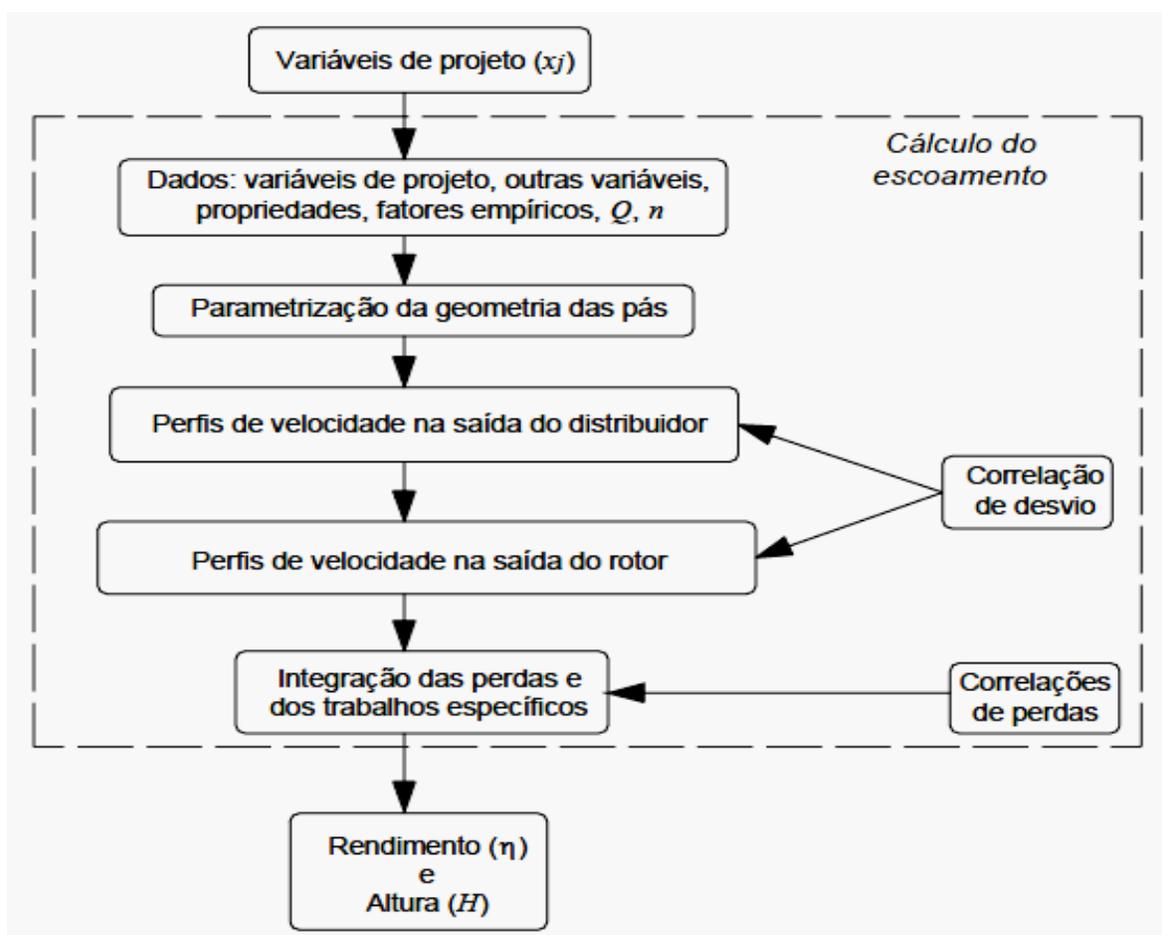


Figura 5.8 - Fluxograma do código computacional CARTHA na sua versão atual.

Fonte: ALBUQUERQUE, 2006.

Nessa Figura, observa-se a metodologia de cálculo que o código computacional CARTHA utiliza na solução do escoamento na turbomáquina hidráulica axial, produzindo, dentre outros resultados, as curvas características de rendimento e de carga da turbina. Observa-se, entretanto, que esse código computacional não calcula os limites de operação da turbina.

5.2.5.2 TURBNPRO

O código computacional TURBNPRO permite simular características de operação de turbinas hidráulicas. A partir da curva de permanência de vazões e alturas de queda disponível, é possível configurar turbinas hidráulicas e calcular a geração de energia. A Figura 5.9 ilustra a sequência típica de cálculos no TURBNPRO ao ser executada uma aplicação no mesmo.

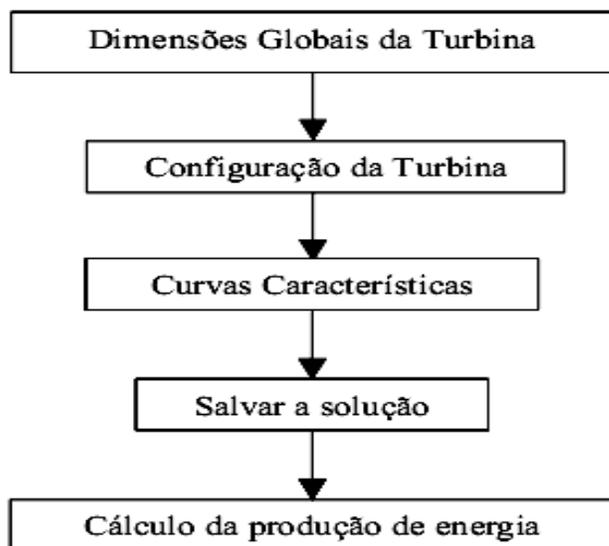


Figura 5.9 - Esquema de sequência típica de cálculos no TURBNPRO.

Fonte: BEZERRA, 2007.

Após a seleção do tipo de turbina, para a predição de características de desempenho, o TURBNPRO solicita os seguintes dados:

1. Vazão Nominal;
2. Queda líquida;
3. Queda bruta;
4. Altura em relação ao nível do mar;
5. Temperatura;
6. Altura do eixo da turbina em relação à 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; e
10. Mínima altura líquida.

A partir das características típicas de turbinas hidráulicas, o código computacional fornece dimensões, velocidades, limitações de operação e características de rendimento das turbinas propostas como solução ao problema apresentado pelo usuário, o qual deve escolher uma das opções fornecidas, ou seja, a que melhor se adapte ao seu sítio de instalação.

Após a seleção do tamanho e configuração da turbina, o código computacional fornece as curvas de desempenho, bem como os desenhos com as dimensões selecionadas da turbina e sua configuração.

Para o cálculo da produção de energia, o TURBNPRO, a partir da curva de permanência e das curvas de elevação a montante e a jusante do rio em função da vazão, é capaz de calcular a produção de energia, fornecendo os seguintes resultados:

1. Resumo dos resultados relativos à turbina e sua produção de energia anual;
2. Dimensões da turbina e do tubo de sucção;
3. Diâmetro do rotor;

4. Diâmetro do cubo do rotor;
5. Diâmetro do anel das pás diretrizes;
6. Comprimento do tubo de sucção;
7. Rotação da turbina;
8. Potência na máxima queda líquida;
9. Potência na mínima queda líquida;
10. Produção de energia anual; e
11. Energia anual.

Observou-se que esse código computacional calcula os limites de operação da turbina.

5.2.6 Princípios de semelhança aplicados a turbinas

Segundo ESHA (2004a) para projetos e construção da grande maioria das estruturas hidráulicas, tais como vertedouros, tomadas d'água, etc., são desenvolvidos modelos adequados aos estudos preliminares dessas estruturas, tendo por base os princípios de semelhança hidráulica, incluindo a análise dimensional e a análise das grandezas físicas envolvidas no comportamento estático e dinâmico de fluxo de água em uma estrutura hidráulica. O projeto de turbinas não é exceção, e os fabricantes de turbinas fazem uso de modelos em escala. É particularmente importante notar que os testes de modelo e desenvolvimentos de laboratório constituem a única forma de garantir a eficiência das turbinas e do seu comportamento hidráulico.

As turbinas reais e modelos relacionam-se conforme descrito na equação geral para cálculo da potência de uma turbina:

$$P_t = \eta_t \rho g Q_t H_t \quad (5.2)$$

$$P_m = \eta_m \rho g Q_m H_m \quad (5.3)$$

onde:

P_t é a potência de saída no eixo da turbina real em Watts;

P_m é a potência de saída no eixo da turbina modelo em Watts;

ρ é a massa específica da água em kg/m³;

g é a aceleração da gravidade em m/s²;

η_t é o rendimento da turbina real, adimensional;

η_m é o rendimento da turbina modelo, adimensional;

Q_t é a vazão da turbina real;

Q_m é a vazão da turbina modelo;

H_t é a queda real;

H_m é a queda do modelo;

A relação entre as potências de uma turbina real e de um modelo em escala pode ser expressa pela equação:

$$\frac{P_t}{P_m} = \frac{\eta_t \rho g Q_t H_t}{\eta_m \rho g Q_m H_m} \quad (5.4)$$

de onde resulta que:

$$\frac{P_t}{P_m} = \frac{\eta_t Q_t H_t}{\eta_m Q_m H_m} \quad (5.5)$$

Assim, a relação de semelhança entre turbinas de diferentes potências operando sob mesma altura de queda e com rendimentos considerados iguais é efetivada por um fator de escala dado pela relação de potências P_2/P_1 , a qual é igual à relação de vazões. Observa-se o fato de se considerar mesmo rendimento ($\eta_m = \eta_t$) e mesma queda ($H_t = H_m$) ter a vantagem de simplificar o caso estudado, porém sem invalidar o raciocínio geral, que contemplaria o crescimento do rendimento com o aumento da potência das turbinas, e o uso da curva chave para a obtenção das diferentes quedas.

A Figura 5.10 mostra aplicação do princípio de semelhança a turbinas hidráulicas axiais, operando sob mesma queda.

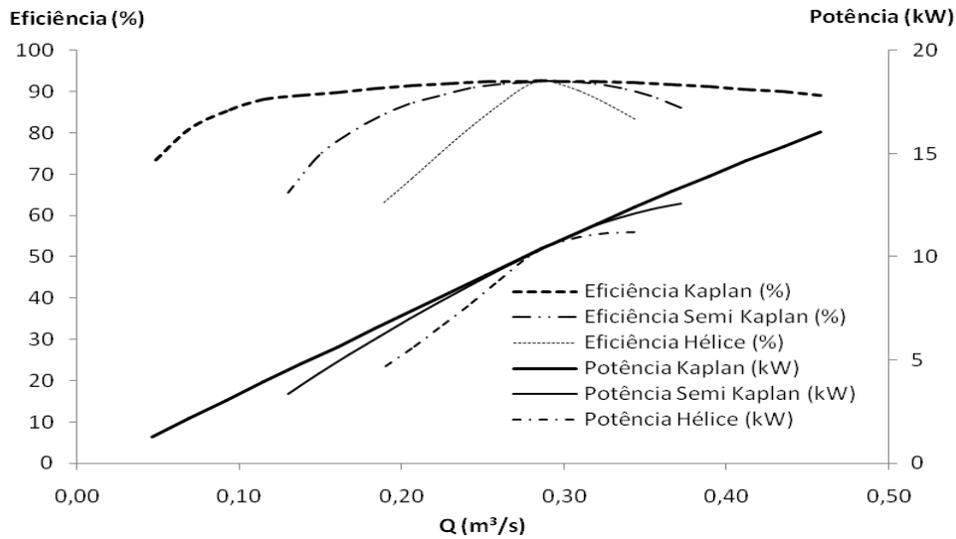


Figura 5.10.a - Curvas de rendimento e de carga da turbina.

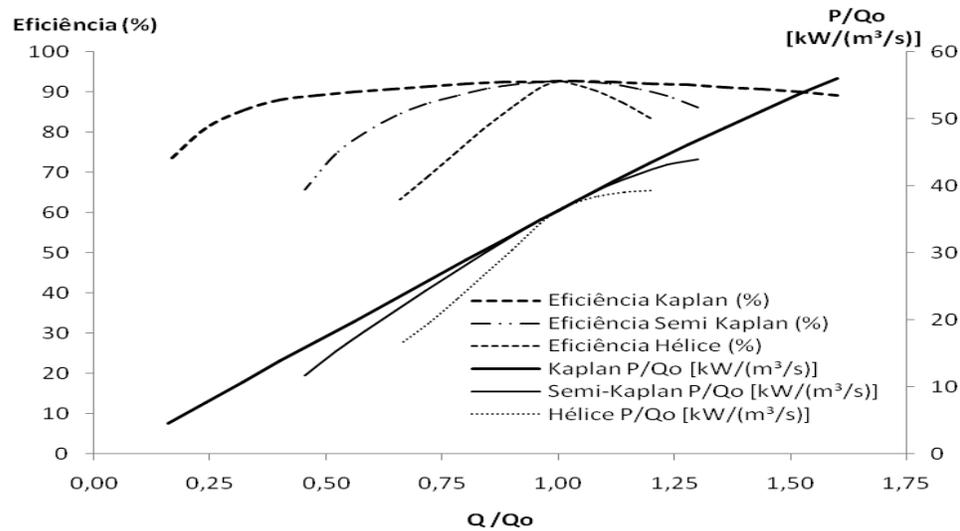


Figura 5.10.b - Curvas de rendimento e de carga da turbina normalizadas pela vazão ótima de projeto Q_0 .

Observa-se na Figura 5.10, que a relação entre as vazões e potências simuladas e reais é dada nesta aplicação, pelo fator de normalização Q_o , que é a vazão ótima de projeto da turbina. Neste estudo, adota-se para Q_o o valor de $Q_{95\%}$ da bacia. Assim, as vazões e potências podem ser simuladas a partir do princípio da semelhança pela multiplicação das vazões normalizadas Q/Q_o e potências normalizadas P/Q_o reais pelo fator de escala $F = Q_{95\%}$ da bacia sintética/ $Q_{95\%}$ da bacia B1.

Embora a relação geral de normalização seja $Q/(Q_o.H.\eta)$, observa-se na Figura 33 que no estudo de caso do presente trabalho, foram consideradas constantes as quedas H e os rendimentos η , o que simplifica a análise e não invalida o raciocínio utilizado, e ainda permite que a partir de um estudo de caso particular, condicionado pelas curvas de carga das turbinas e de permanência de vazões, seja desenvolvida uma visão analítica mais geral, procedimento corrente e coerente no meio científico. Observa-se que o rendimento cresce com a potência da turbomáquina, podendo crescer de cerca de 80% para 90%, segundo o tamanho da turbina.

5.2.7 Curvas de permanência de vazões escalonadas

Curvas de permanência de vazões de bacias de mesma altura de queda, podem ser estabelecidas pela multiplicação por um fator de escala dado pela relação entre as áreas de drenagem das bacias, desde que se tratem de pequenas bacias hidrográficas, aceitando-se a hipótese de linearidade entre vazão e área de drenagem.

A Figura 5.11 ilustra as curvas de permanência de vazões de uma pequena bacia real (Figura 5.11a) e de uma sintética com área de drenagem menor (Figura 5.11b).

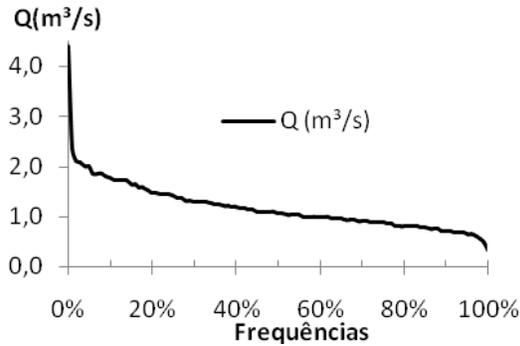


Figura 5.11.a - Curva de permanência de vazões de pequena bacia real.

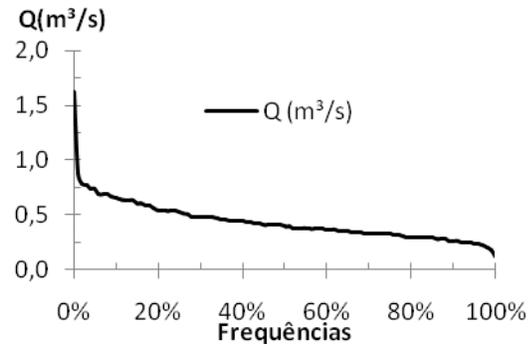


Figura 5.11.b - Curva de permanência de vazões simulada com fator de escala $Fe = 0,3711$.

A relação entre as vazões simuladas e reais é dada pelo fator de escala Fe , que no exemplo da Figura 5.11, é igual a 0,3711. Assim, as vazões simuladas resultam da multiplicação das vazões de permanência reais pelo fator de escala Fe .

5.2.8 Cálculo da energia disponível de uma bacia

Esse cálculo é efetuado a partir da curva de permanência de vazões da bacia, dividindo-se em cem intervalos iguais as frequências, cada um com duração de um centésimo do ano, obtendo $\Delta t_i = 86,4$ horas para todos os cem intervalos. A potência do i -ésimo intervalo é dada por $P_i = \eta g Q_i H$, conforme a equação (48), na qual se utiliza a altura de queda disponível H_i , para cada vazão Q_i do i -ésimo intervalo, sendo a energia gerada nesse intervalo dada por:

$$E_i = P_i \cdot \Delta t_i \tag{5.6}$$

onde:

E_i é a energia gerada pela PCH no i -ésimo intervalo em kWh;

P_i é a soma das potência das turbinas da PCH no i -ésimo intervalo em kW;

Δt_i é a duração do i-ésimo intervalo de tempo em h;

Portanto o somatório da energia dos cem intervalos resulta na energia disponível anual da bacia.

A Figura 5.12 exemplifica a energia disponível de uma pequena bacia.

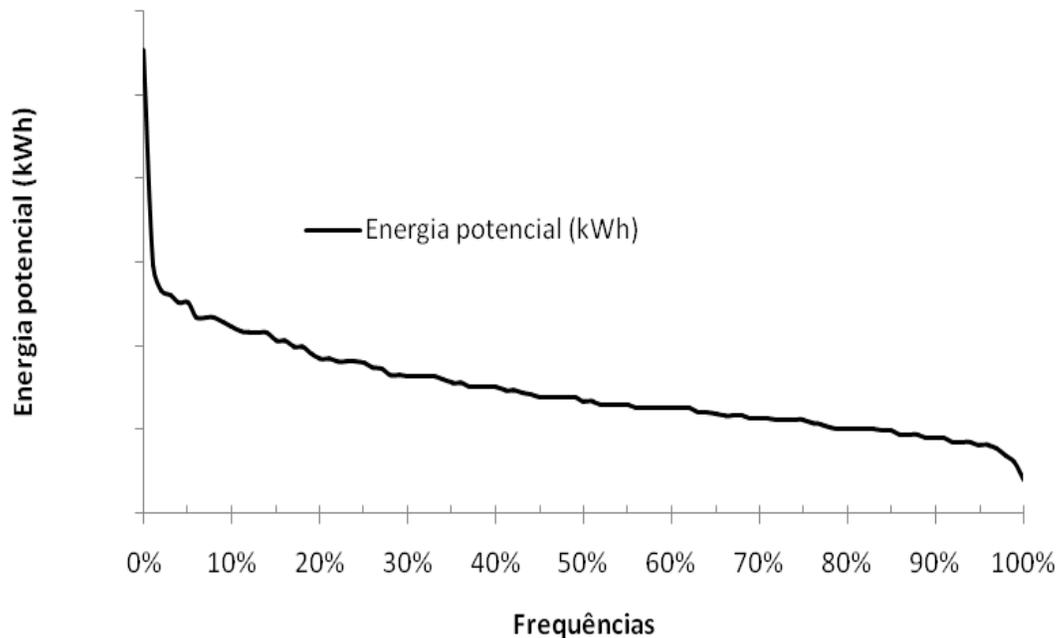


Figura 5.12 - Energia disponível da bacia.

5.2.9 Modo de operação de duas turbinas

A Figura 5.13 ilustra, conforme estudado por BLANCO *et al.* (2008), o modo de operação de duas turbinas hidráulicas axiais, de potências P_1 e P_2 , operando em uma pequena bacia, sendo a vazão ótima da turbina P_1 igual a $Q_{95\%}$. A turbina P_2 terá sua potência definida em função da otimização da geração de energia, objeto desta pesquisa.

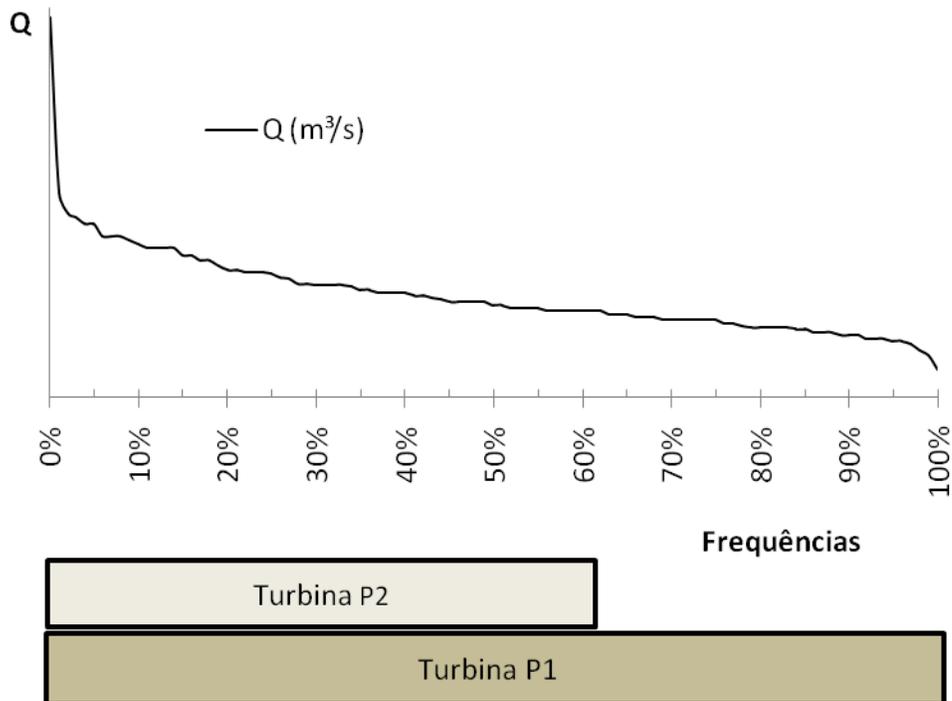


Figura 5.13 - Vazões de permanência do modo de operação de duas turbinas.

Fonte: Adaptado de BLANCO *et al.*(2008).

A Figura 5.13 ilustra exemplo de modo de operação, no qual a turbina de potência P_1 , opera sozinha na faixa de vazões de permanência de $Q_{100\%}$ até $Q_{60\%}$. As turbinas P_1 e P_2 funcionam simultaneamente de $Q_{60\%}$ a $Q_{0\%}$.

5.2.10 Eficiência energética da PCH

A Eficiência Energética da PCH é calculada pela relação entre a energia total gerada na PCH e a energia potencial total disponível no aproveitamento hidráulico, durante o período de um ano.

A Figura 5.14 apresenta a curva de permanência de vazões de caso estudado por ANAGNOSTOPOULOS e PAPANTONIS (2007).

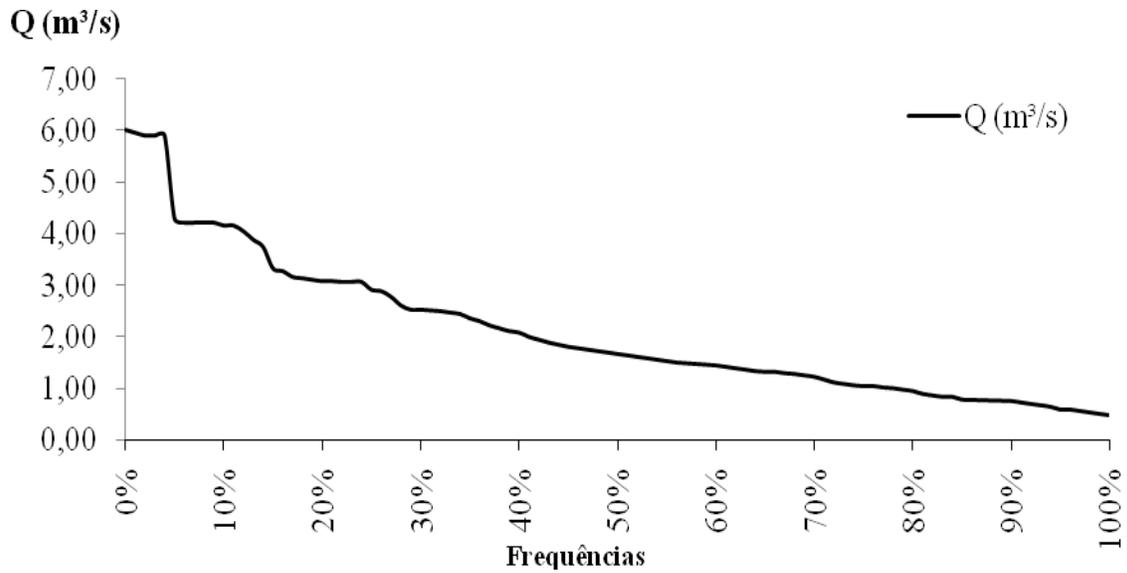


Figura 5.14 - Curva de permanência de vazões de pequena bacia da Grécia.

Fonte: ANAGNOSTOPOULOS e PAPANTONIS (2007).

A Figura 5.15 mostra o impacto da relação de potência das turbinas sobre a eficiência energética estudada por ANAGNOSTOPOULOS e PAPANTONIS (2007).

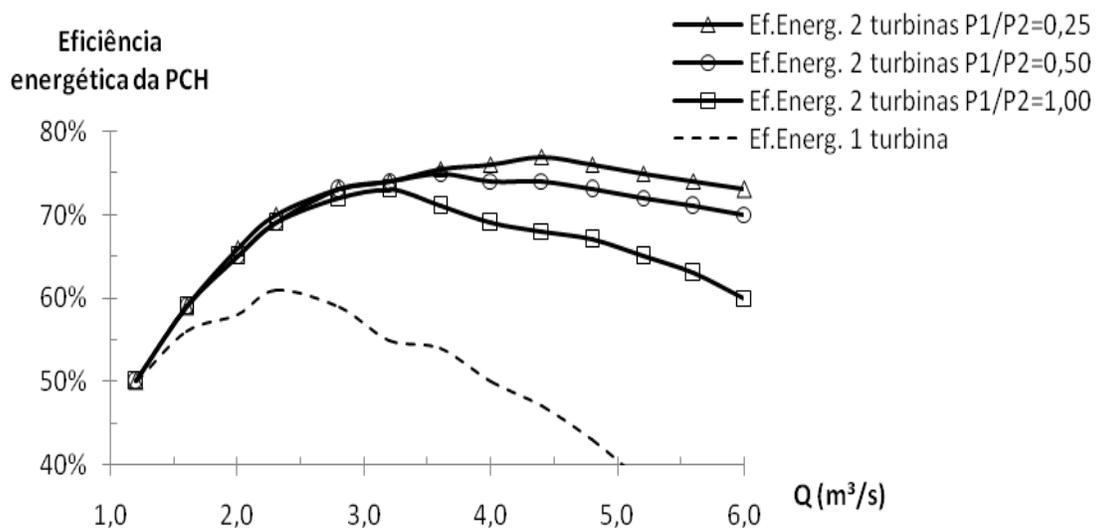


Figura 5.15 - Impacto da potência das turbinas sobre a eficiência energética da PCH.

Fonte: ANAGNOSTOPOULOS e PAPANTONIS (2007).

Na Figura 5.15, observa-se que a máxima eficiência energética tem o valor de 77% e ocorre para a vazão de $4,4\text{m}^3/\text{s}$, quando $P1/P2=0,25$. Para essa mesma vazão, a eficiência da PCH para uma única turbina é de 47%. Assim, as duas turbinas superam em 30% uma única turbina, para essa vazão.

ANAGNOSTOPOULOS e PAPANTONIS (2007) efetuaram estudo de caso em pequena bacia da Grécia, com o uso de duas turbinas Francis, uma cuja vazão ótima de projeto é $Q_o=0,583\text{m}^3/\text{s}$. Com o auxílio do código computacional TURBNPRO foram obtidas as curvas de carga das turbinas, as quais foram acopladas à curva de permanência da bacia da Figura 5.14.

A Figura 5.16 apresenta a eficiência energética dessa PCH segundo a relação de potência da segunda turbina em relação à primeira, $P2/P1$.

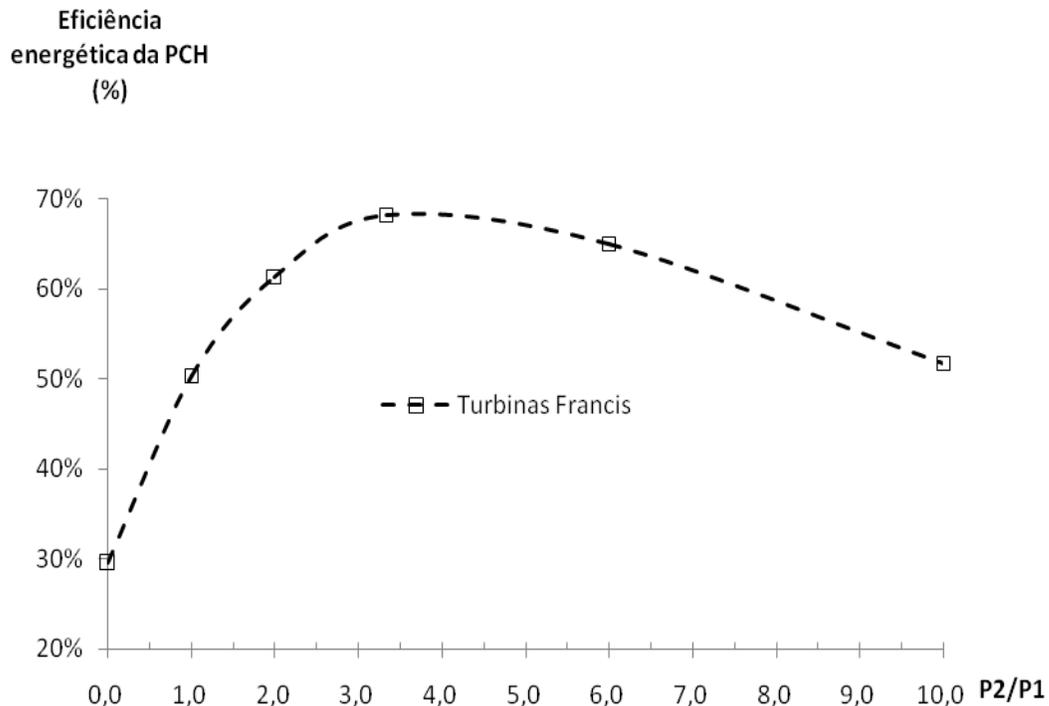


Figura 5.16 - Eficiência energética de uma PCH com o uso de duas turbinas Francis.

A Figura 5.16 mostra que a eficiência máxima da PCH de 68% ocorre para a relação $P_2/P_1=3,33$, ou seja, $P_1/P_2=0,30$, obtendo-se uma melhoria de 38% com o uso de uma segunda turbina.

5.3 MÉTODO E MATERIAIS

5.3.1 Método

No presente capítulo, estudou-se a otimização técnico-econômica de PCHs de baixa queda dotadas de arranjos de duas turbinas axiais operando em paralelo. Foram utilizados os princípios de semelhança para as turbinas com bacias escalonadas em função da área de drenagem, estas consideradas de mesma queda, $H=4,0m$, havendo apenas a variação das vazões de permanência, obtidas pela multiplicação por um fator de escala.

Para cada bacia simulada, foi acoplado um conjunto de duas turbinas em paralelo, de potências P_1 e P_2 , sendo característica de P_1 , que sua vazão do ponto de máximo rendimento para regulagem do rotor corresponde à vazão $Q_{95\%}$ da bacia. A seleção da potência de P_2 ocorrerá segundo melhorias técnico-econômicas desejadas e estudadas através da metodologia mostrada na Figura 5.17.

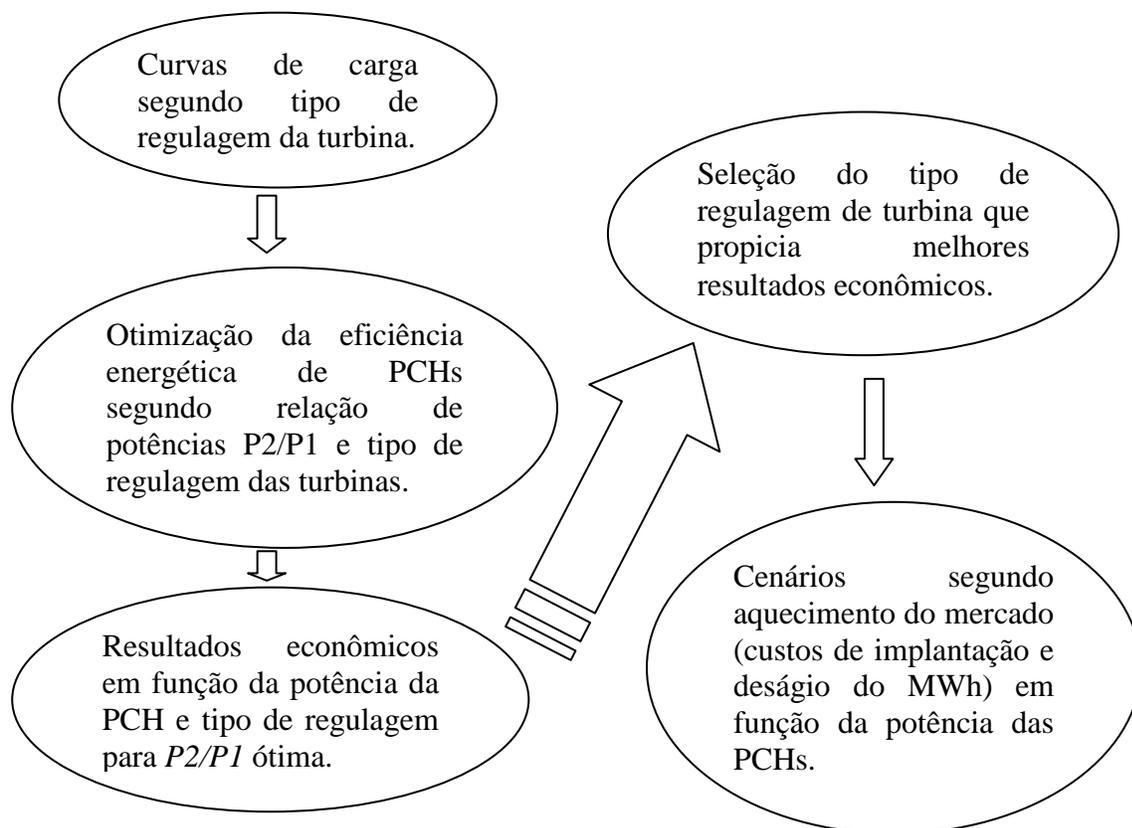


Figura 5.17 - Metodologia para otimização técnico-econômica do uso de duas turbinas axiais em PCHs de baixa queda.

Pode-se observar na Figura 5.17 a seguinte metodologia:

i) Com o uso do código computacional TURBNPRO, obtém-se as curvas de carga da turbina para os três modos de regulagem: distribuidor, rotor e dupla, tal turbina serviu de base para todas as demais curvas de turbinas semelhantes;

ii) As curvas de carga das turbinas de potência P_1 e P_2 são acopladas às curvas de permanência de vazões da bacia e produzem-se as curvas de geração de energia para os três modos de regulagem, segundo a relação de potências P_2/P_1 . Isto permite a seleção da regulagem e da relação P_2/P_1 ótimas;

iii) Utilizando-se dados como rendimento dos geradores elétricos, preço de venda de energia, vida útil, custos de implantação dos empreendimentos, e outros, foram calculados

o resultado operacional líquido anual, período de retorno, taxa de retorno, valor presente líquido, custo unitário de energia, dentre outros, para o empreendimento;

iv) Foram simuladas bacias sintéticas de mesma altura de queda e diferentes vazões de permanência, providas de arranjos de duas turbinas axiais de potências P_1 e P_2 , permitindo a seleção técnico-econômica das melhores bacias.

5.3.2 Materiais

Para a aplicação da metodologia explicitada foram utilizadas planilhas eletrônicas Microsoft Excel[®] e o código computacional TURBNPRO[®]. Os dados das turbinas e das bacias hidrológicas alimentaram essas planilhas e os códigos computacionais, permitindo o desenvolvimento dos cálculos de geração de energia e resultados econômicos.

5.4 APLICAÇÃO

5.4.1 Entrada de dados no TURBNPRO

Utiliza-se neste estudo a mesma turbina hidráulica axial estudada por ALBUQUERQUE (2006), para a qual são geradas as curvas características de carga e rendimento, com o uso do código computacional TURBNPRO. Na Tabela 5.3 são apresentados os dados da referida turbina.

Tabela 5.3 - Características básicas da turbina axial em estudo.

| | |
|---|-------------------------|
| Vazão, Q | 0,286 m ³ /s |
| Rotação, n | 1145 rpm |
| Altura, H | 4,0 m |
| Rotação específica | 652 |
| Rendimento esperado, η | 85 % |
| Potência de eixo esperada, Pe | 9,5 kW |
| Diâmetro externo, De | 280 mm |
| Diâmetro interno, Di | 112 mm |
| Número de pás, N _{pá} | 4 |
| Ângulo de saída do distribuidor, α_2 | 60° |

Fonte: ALBUQUERQUE, 2006.

A Figura 5.18 mostra a tela inicial do TURBNPRO[®] para seleção do tipo de turbina.

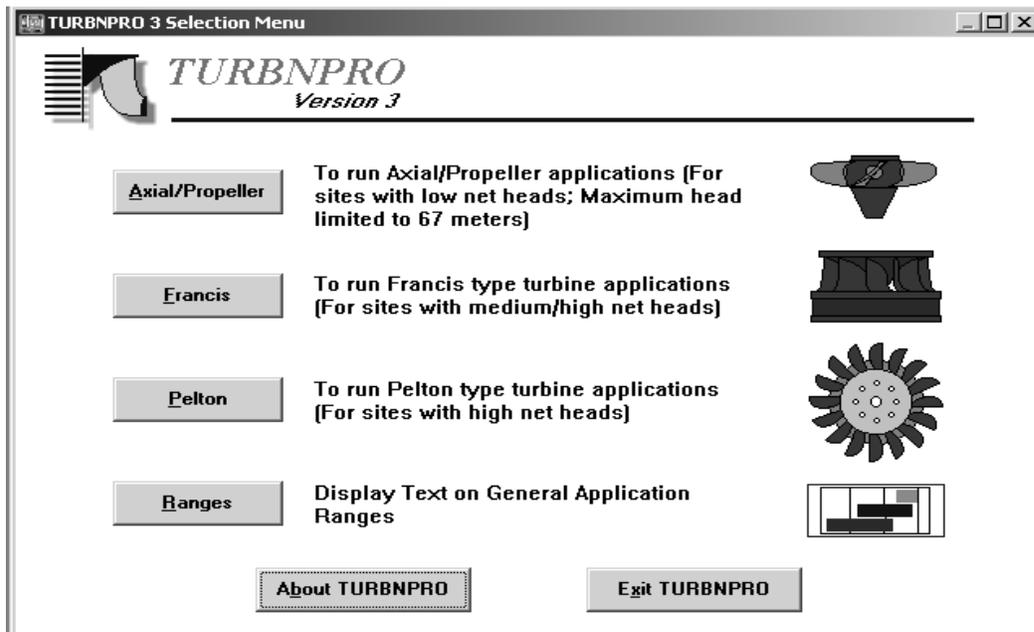


Figura 5.18 - Tela do TURBNPRO[®] para seleção do tipo de turbina.

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.

Observa-se na Figura 5.18 entre as opções de turbinas, a axial, adequada a baixas quedas, que é o caso em estudo.

Após a escolha do tipo de turbina, deve-se fornecer os dados solicitados pelo software, tais como: vazão nominal, obtida através da curva de permanência; as quedas líquidas e brutas, dentre outras informações. A Figura 5.19 mostra os dados de entrada para o dimensionamento da turbina axial com o auxílio do TURBNPRO®.

| Parameter | Value | Limit |
|---|---------|--------|
| Rated Discharge (in m ³ /s) | 0.2860 | Limits |
| Net Head at rated discharge (in meters and < 67) | 4.0000 | Limits |
| Site Gross Head (in meters) | 4.2000 | Limits |
| Site Elevation (in meters) | 15.0000 | Limits |
| Water Temperature (in degrees C) | 25.0000 | Limits |
| Desired setting to tailwater (in meters) | 0.2000 | Limits |
| Efficiency Priority at max output (0 to 10) | 10 | Limits |
| Ratio of rated head to best eff head (0.7 to 1.0) | 1.0000 | Limits |
| System Frequency (50 Hz or 60 Hz) | 60 | Limits |
| Minimum Net Head (in meters) | 3.8000 | Limits |

Figura 5.19 - Tela do TURBNPRO para entrada de dados da turbina.

A Figura 5.20 mostra as opções de solução ofertadas pelo software.

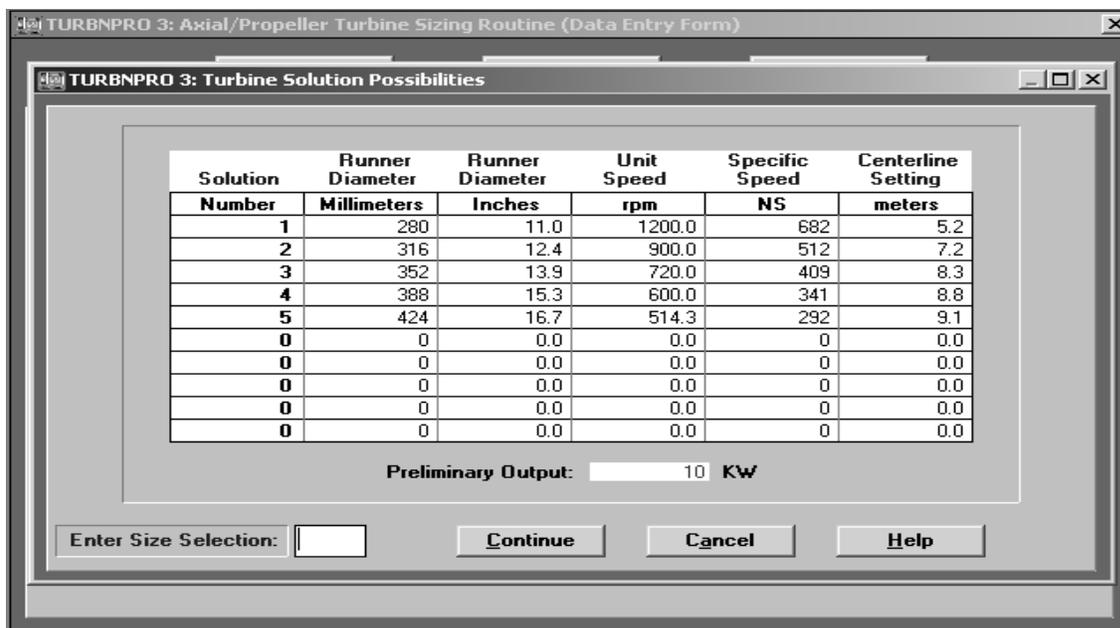


Figura 5.20 - Tela do TURBNPRO para seleção da possibilidade de solução.

Assim, foi selecionada a opção 1, por ser coerente com as características da turbina estudada na UNIFEI, a qual foi tomada como ponto de partida para a presente pesquisa.

A Figura 5.21 mostra as opções de configuração da turbina, oferecidas pelo software.

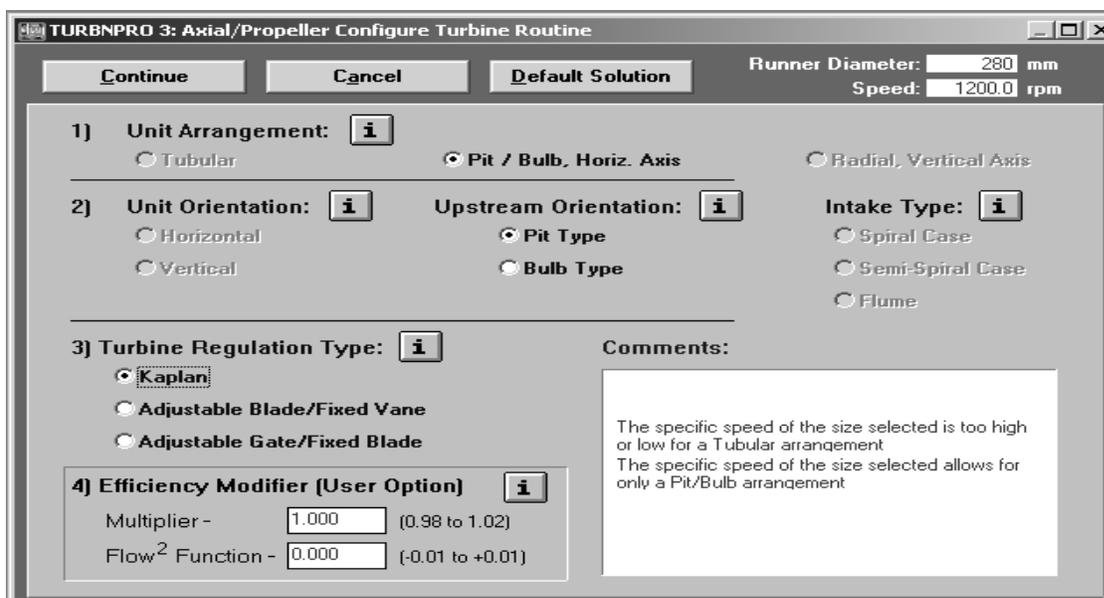


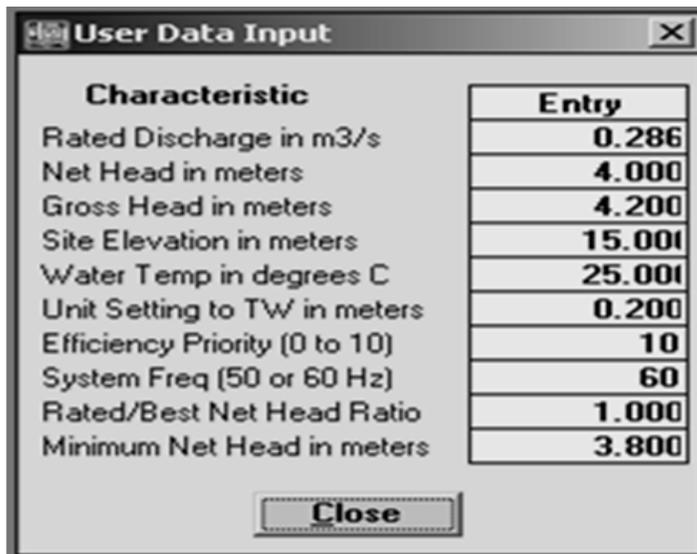
Figura 5.21 - Tela do TURBNPRO para configuração da turbina.

5.4.2 Resultados do TURBNPRO

5.4.2.1 Turbina Kaplan

Selecionou-se a turbina Kaplan, tipo pit, conforme se vê na Figura 44. Essa turbina apresenta regulagem dupla, ou seja, tanto o distribuidor como o rotor tem regulagem de seus ângulos para otimização da geração de energia.

A Figura 5.22 mostra a tela contendo a página 1 do resumo da solução fornecida pelo TURBNPRO.



| Characteristic | Entry |
|-------------------------------|--------|
| Rated Discharge in m3/s | 0.286 |
| Net Head in meters | 4.000 |
| Gross Head in meters | 4.200 |
| Site Elevation in meters | 15.000 |
| Water Temp in degrees C | 25.000 |
| Unit Setting to TW in meters | 0.200 |
| Efficiency Priority (0 to 10) | 10 |
| System Freq (50 or 60 Hz) | 60 |
| Rated/Best Net Head Ratio | 1.000 |
| Minimum Net Head in meters | 3.800 |

Figura 5.22 - Tela do TURBNPRO com o resumo dos dados de entrada.

Após a seleção do tamanho e configuração da turbina, o código computacional fornece as curvas características da turbina, bem como os desenhos com as dimensões selecionadas da turbina e sua configuração como pode ser visto na Figura 5.23, que mostra a tela contendo a página 1 do resumo da solução fornecida pelo TURBNPRO.

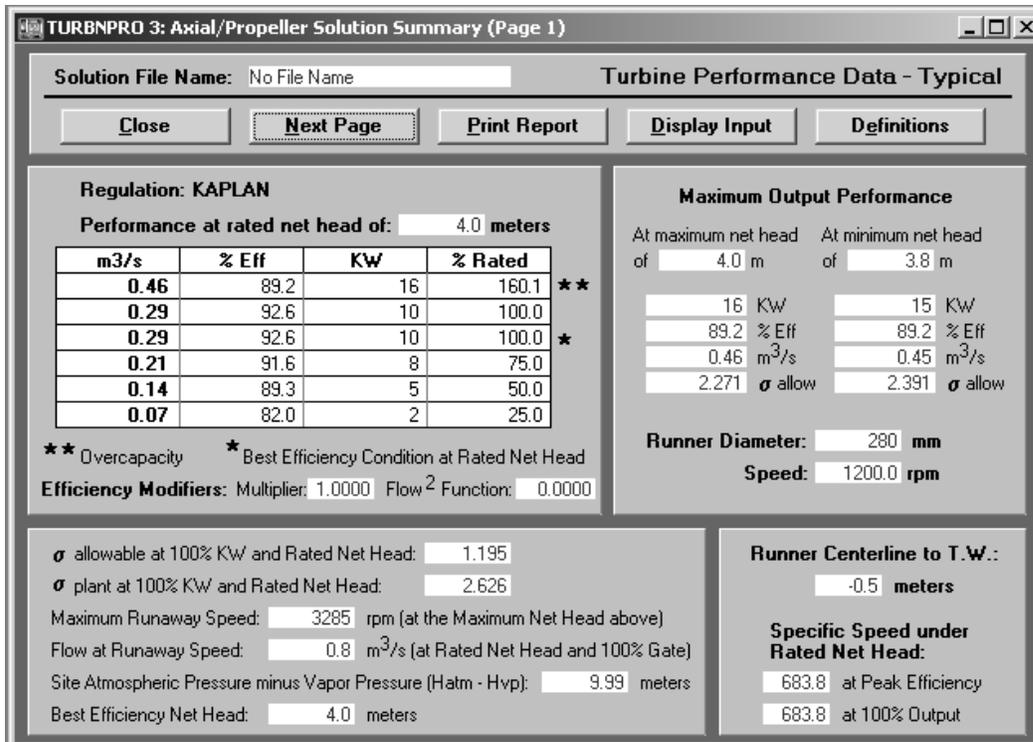


Figura 5.23 - Tela do TURBNPRO com a página 1 do resumo da solução.

A Figura 5.24 mostra a tela contendo a página 2 do resumo da solução fornecida pelo TURBNPRO.

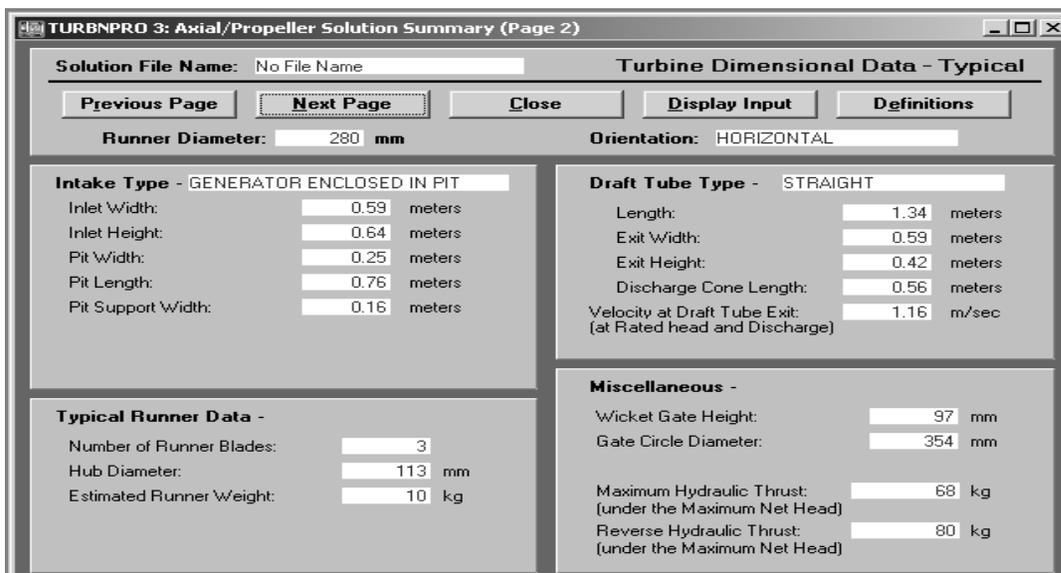


Figura 5.24 - Tela do TURBNPRO com a página 2 do resumo da solução.

A Figura 5.25 mostra a tela contendo a seção do distribuidor da solução fornecida pelo TURBNPRO.

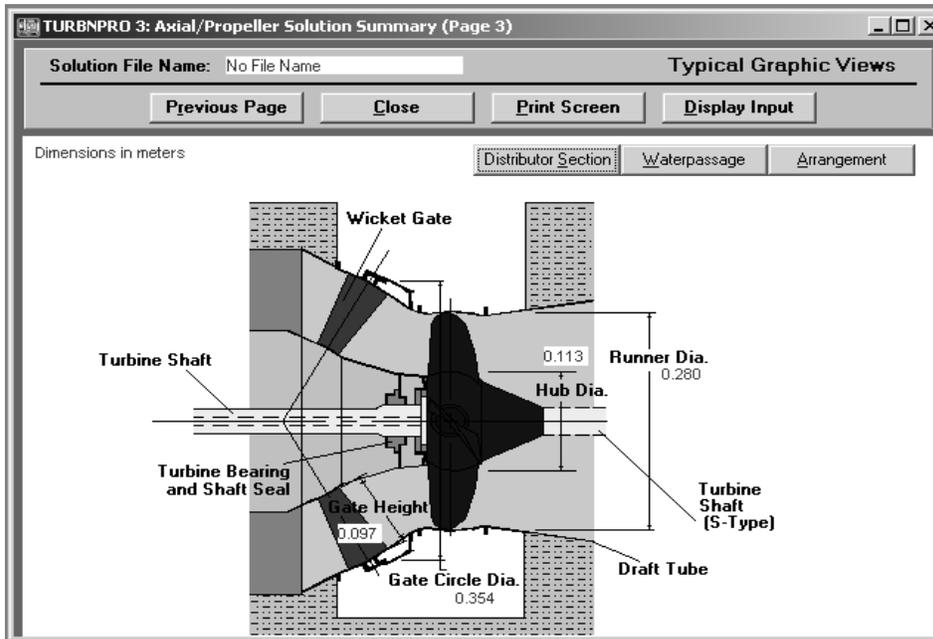


Figura 5.25 - Tela do TURBNPRO com a seção do distribuidor.

A Figura 5.26 mostra a tela contendo a seção longitudinal da passagem do fluxo da solução fornecida pelo TURBNPRO.

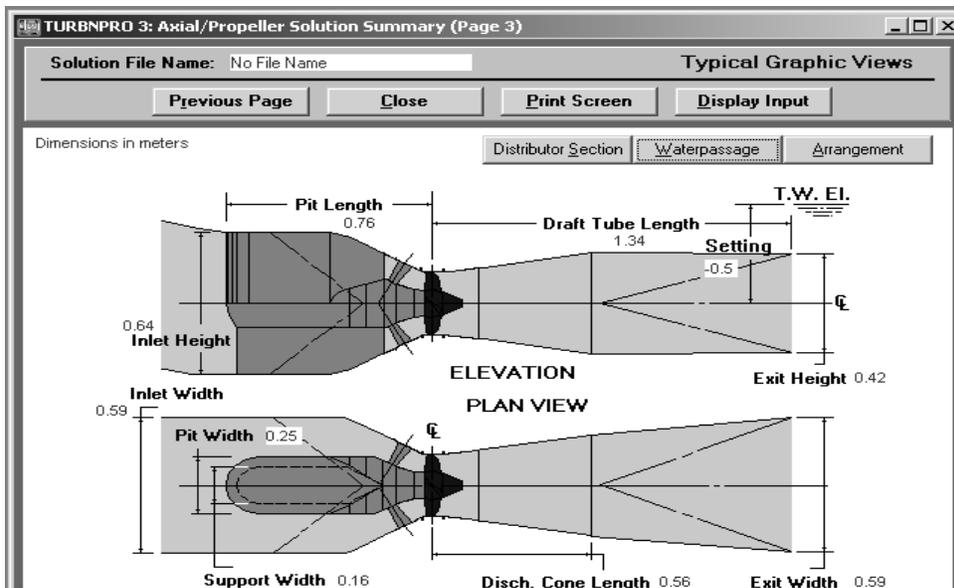


Figura 5.26 - Tela do TURBNPRO com a seção longitudinal da passagem do fluxo.

A Figura 5.27 mostra a tela contendo o arranjo do conjunto turbina-gerador da solução fornecida pelo TURBNPRO.

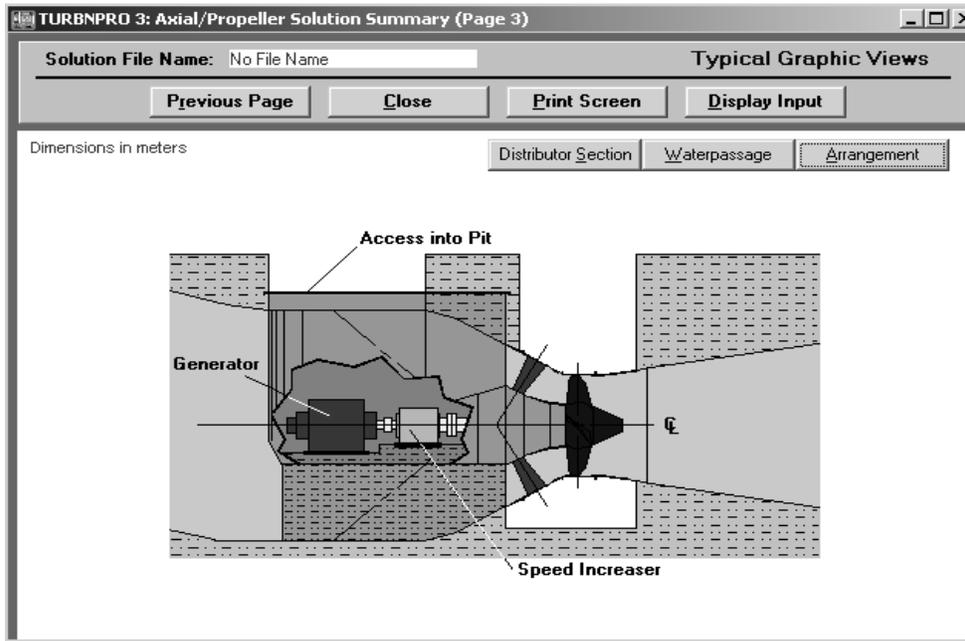


Figura 5.27 - Tela do TURBNPRO contendo o arranjo do conjunto turbina-gerador.

A Figura 5.28 mostra a tela contendo a curva de colina da turbina.

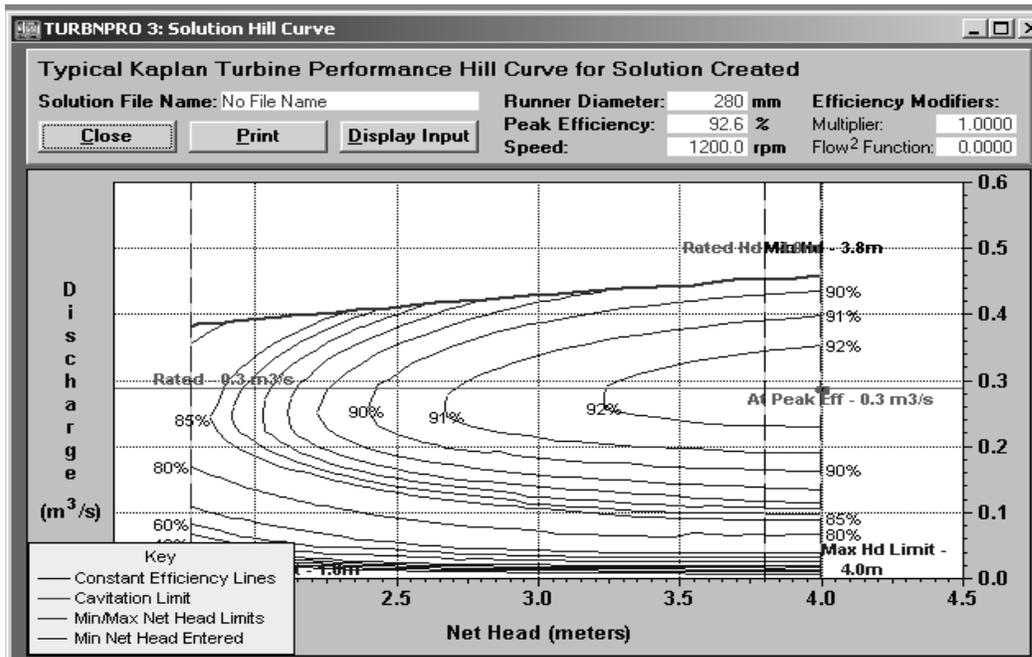


Figura 5.28 - Tela do TURBNPRO com a curva de colina da turbina.

Na Figura 5.28 são visíveis os limites de operação devido ao efeito da cavitação, bem como aos limites de queda máxima e queda mínima.

A Figura 5.29 mostra a tela contendo a curva de rendimento da turbina fornecida pelo TURBNPRO.

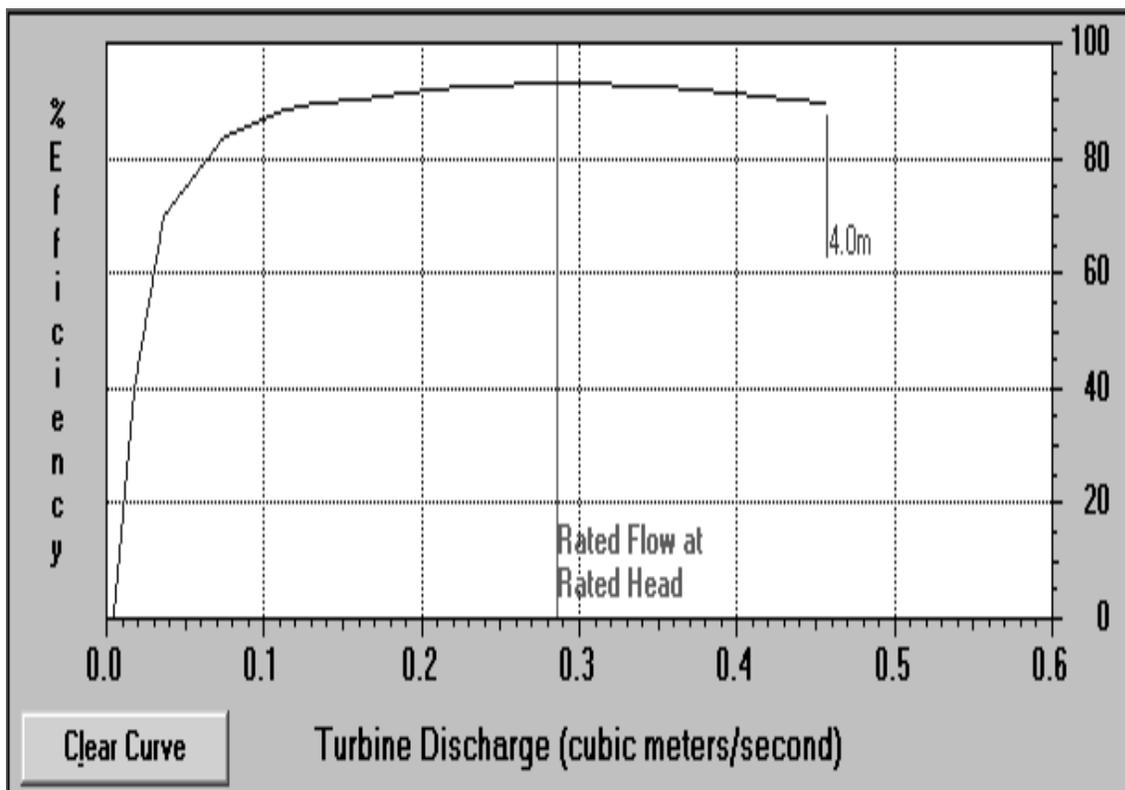


Figura 5.29 - Tela do TURBNPRO com a curva de rendimento da turbina.

Na Figura 5.29 observa-se que a curva de rendimento apresenta platô característico da turbina Kaplan de dupla regulação.

A Figura 5.30 mostra a tela contendo os dados da curva de rendimento e de carga da turbina fornecida pelo TURBNPRO.

| TURBNPRO Version 3 - [Turbine Performance Crossplot] | | | |
|--|----------------|------------------|--|
| Power (KW) | Efficiency (%) | Discharge (m3/s) | Notes |
| 16 | 89.2 | 0.46 | Additional Output Capability |
| 15 | 90.0 | 0.44 | Additional Output Capability |
| 15 | 90.6 | 0.41 | Additional Output Capability |
| 14 | 91.2 | 0.39 | Additional Output Capability |
| 13 | 91.7 | 0.37 | Additional Output Capability |
| 12 | 92.1 | 0.34 | Additional Output Capability |
| 12 | 92.4 | 0.32 | Additional Output Capability |
| 11 | 92.6 | 0.30 | Additional Output Capability |
| 10 | 92.6 | 0.29 | Rated Flow/Head Condition |
| 10 | 92.5 | 0.27 | - |
| 9 | 92.3 | 0.25 | - |
| 8 | 92.0 | 0.23 | - |
| 7 | 91.4 | 0.21 | - |
| 7 | 90.7 | 0.18 | - |
| 6 | 89.9 | 0.16 | - |
| 5 | 89.1 | 0.14 | - |
| 4 | 88.0 | 0.11 | - |
| 3 | 85.4 | 0.09 | - |
| 2 | 81.0 | 0.07 | - |
| 1 | 72.7 | 0.05 | - |
| 0 | 46.5 | 0.02 | Low efficiency; not used in energy calculation |

Figura 5.30 - Tela contendo as curvas de rendimento e de carga da turbina, fornecidas pelo TURBNPRO.

5.4.2.2 Turbina Semi-Kaplan

De modo semelhante foi utilizado o software TURBNPRO para uma turbina semelhante, porém com regulagem apenas do rotor, ou seja, do tipo Semi-Kaplan. A Figura 5.31 mostra os valores de eficiência e potência segundo a vazão turbinada.

TURBNPRO 3: Axial/Propeller Solution Summary (Page 1)

Solution File Name: c:\progra~1\turbnpro\semikapl **Turbine Performance Data - Typical**

Close Next Page Print Report Display Input Definitions

Regulation: Adjustable Blade/Fixed Vane
Performance at rated net head of: 4.0 meters

| m3/s | % Eff | KW | % Rated |
|------|-------|----|---------|
| 0.37 | 86.1 | 13 | 130.0 |
| 0.29 | 92.6 | 10 | 100.0 |
| 0.29 | 92.6 | 10 | 100.0 |
| 0.21 | 88.2 | 7 | 75.0 |
| 0.14 | 72.4 | 4 | 50.0 |
| 0.07 | 0.0 | 0 | 25.0 |

*** Overcapacity * Best Efficiency Condition at Rated Net Head

Efficiency Modifiers: Multiplier: 1.0000 Flow² Function: 0.0000

Maximum Output Performance

At maximum net head of 4.0 m At minimum net head of 3.8 m

| | |
|------------------------|------------------------|
| 13 KW | 12 KW |
| 86.1 % Eff | 86.0 % Eff |
| 0.37 m ³ /s | 0.37 m ³ /s |
| 1.691 σ allow | 1.730 σ allow |

Runner Diameter: 280 mm
Speed: 1200.0 rpm

σ allowable at 100% KW and Rated Net Head: 1.195
σ plant at 100% KW and Rated Net Head: 2.626

Maximum Runaway Speed: 3285 rpm (at the Maximum Net Head above)
Flow at Runaway Speed: 0.8 m³/s (at Rated Net Head and 100% Gate)
Site Atmospheric Pressure minus Vapor Pressure (Hatm - Hvp): 9.99 meters
Best Efficiency Net Head: 4.0 meters

Runner Centerline to T.W.:
-0.5 meters

Specific Speed under Rated Net Head:
683.8 at Peak Efficiency
683.8 at 100% Output

Figura 5.31 - Eficiência e potência segundo a vazão na turbina Semi-Kaplan.

A Figura 5.32 mostra as dimensões da turbina Semi-Kaplan.

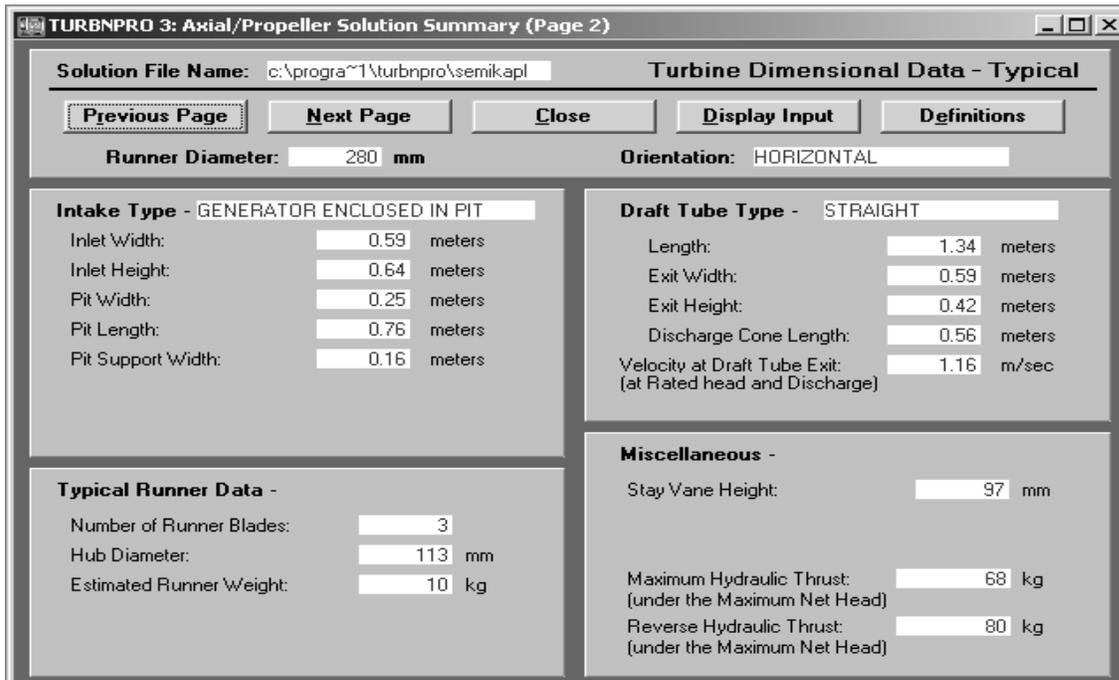


Figura 5.32 - Dimensões da turbina Semi-Kaplan.

A Figura 5.33 mostra a curva de colina da turbina Semi-Kaplan.

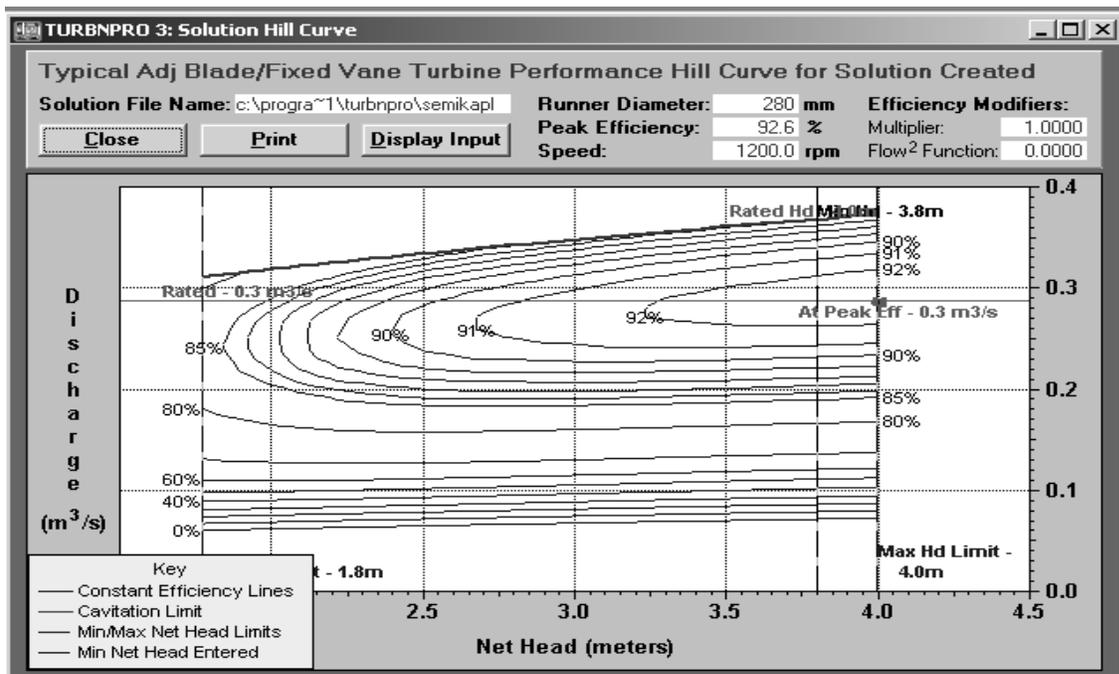


Figura 5.33 - Curva de colina da turbina Semi-Kaplan.

A Figura 5.34 mostra a curva de rendimento da turbina Semi-Kaplan.

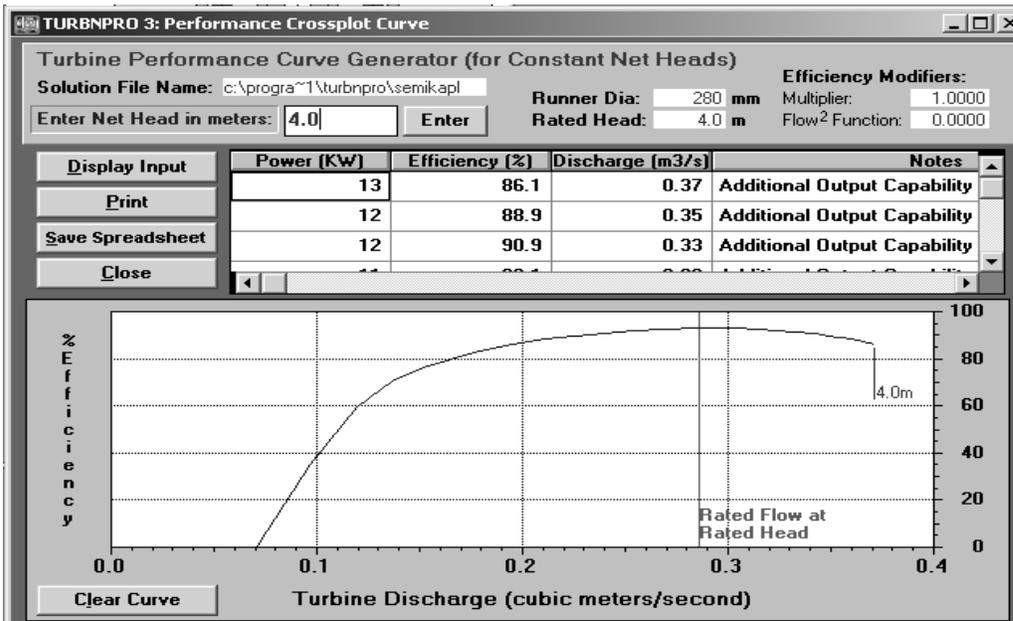


Figura 5.34 - Curva de rendimento da turbina Semi-Kaplan.

A Figura 5.35 mostra os valores da eficiência e potência segundo as vazões da turbina Semi-Kaplan.

The screenshot shows the 'TURBNPRO 3: Performance Crossplot' window displaying a detailed table of performance data. The table has columns for Power (KW), Efficiency (%), Discharge (m3/s), and Notes. The data points range from 0.02 m³/s to 0.37 m³/s. The efficiency increases from 0.0% at 0.02 m³/s to a peak of 92.6% at 0.29 m³/s, then gradually decreases to 86.1% at 0.37 m³/s. The notes indicate that the flow rate of 0.29 m³/s is the 'Rated Flow/Head Condition'.

| Power (KW) | Efficiency (%) | Discharge (m3/s) | Notes |
|------------|----------------|------------------|--|
| 13 | 86.1 | 0.37 | Additional Output Capability |
| 12 | 88.9 | 0.35 | Additional Output Capability |
| 12 | 90.9 | 0.33 | Additional Output Capability |
| 11 | 92.1 | 0.32 | Additional Output Capability |
| 11 | 92.5 | 0.30 | Additional Output Capability |
| 10 | 92.6 | 0.29 | Rated Flow/Head Condition |
| 10 | 92.4 | 0.28 | - |
| 9 | 91.9 | 0.26 | - |
| 9 | 90.8 | 0.24 | - |
| 8 | 89.1 | 0.22 | - |
| 7 | 87.0 | 0.20 | - |
| 6 | 84.1 | 0.19 | - |
| 5 | 80.0 | 0.17 | - |
| 4 | 74.6 | 0.15 | - |
| 3 | 65.6 | 0.13 | - |
| 2 | 50.1 | 0.11 | Low efficiency; not used in energy calculation |
| 1 | 28.9 | 0.09 | Low efficiency; not used in energy calculation |
| 0 | 3.9 | 0.07 | Low efficiency; not used in energy calculation |
| 0 | 0.0 | 0.06 | Low efficiency; not used in energy calculation |
| 0 | 0.0 | 0.04 | Low efficiency; not used in energy calculation |
| 0 | 0.0 | 0.02 | Low efficiency; not used in energy calculation |

Figura 5.35 - Valores de eficiência e potência segundo as vazões da turbina Semi-Kaplan.

5.4.2.3 Turbina Hélice

Analogamente foi utilizado o software TURBNPRO para uma turbina tipo Hélice com regulagem apenas do distribuidor. A Figura 5.36 mostra as dimensões da turbina.

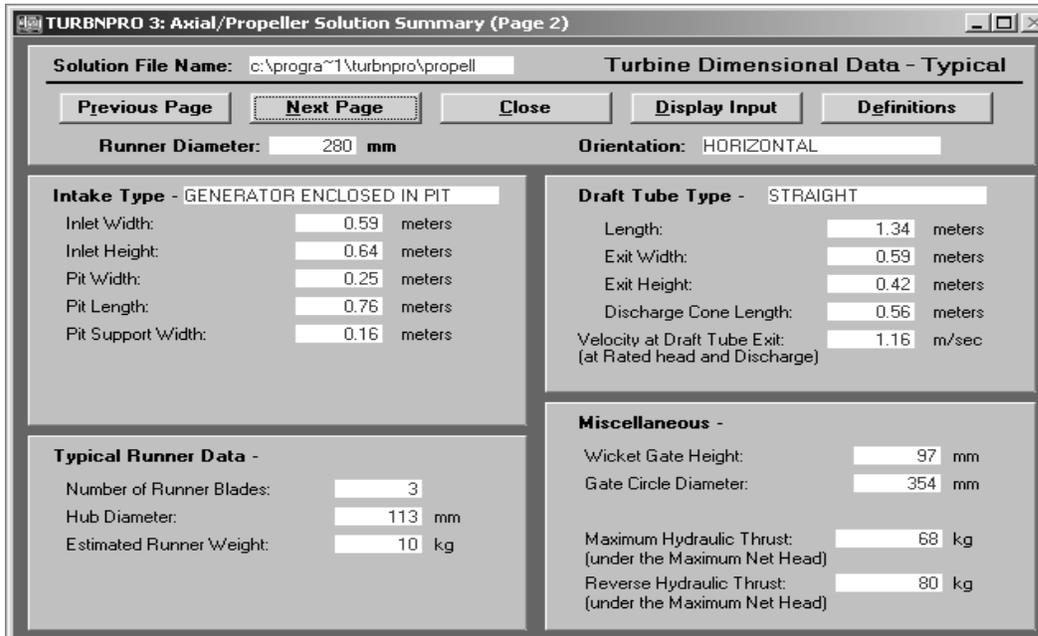


Figura 5.36 - Dimensões da turbina Hélice.

A Figura 5.37 mostra a curva de colina da turbina Hélice.

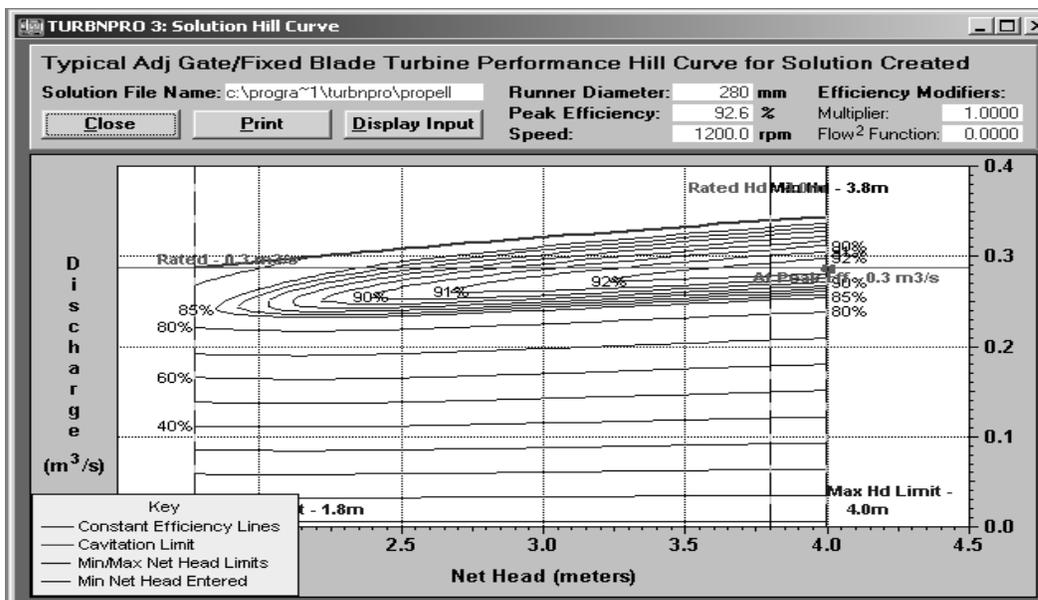


Figura 5.37 - Curva de colina da turbina Hélice.

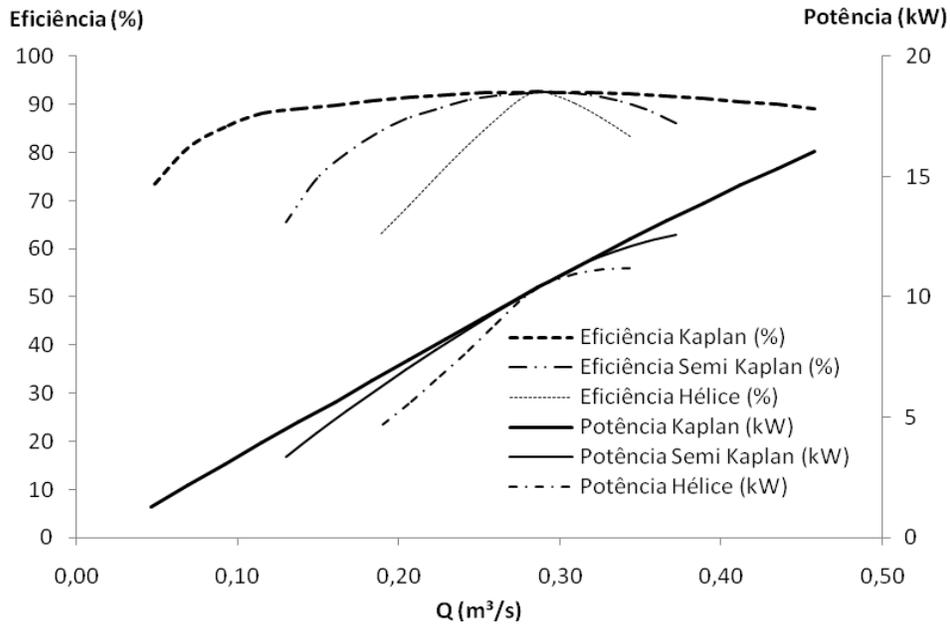


Figura 5.40 - Curvas de rendimento e de carga das turbinas Kaplan, Semi-Kaplan e Hélice.

A Figura 5.41 mostra as curvas de rendimento e de potência das turbinas Kaplan, Semi-Kaplan e Hélice, normalizadas pela vazão ótima de projeto.

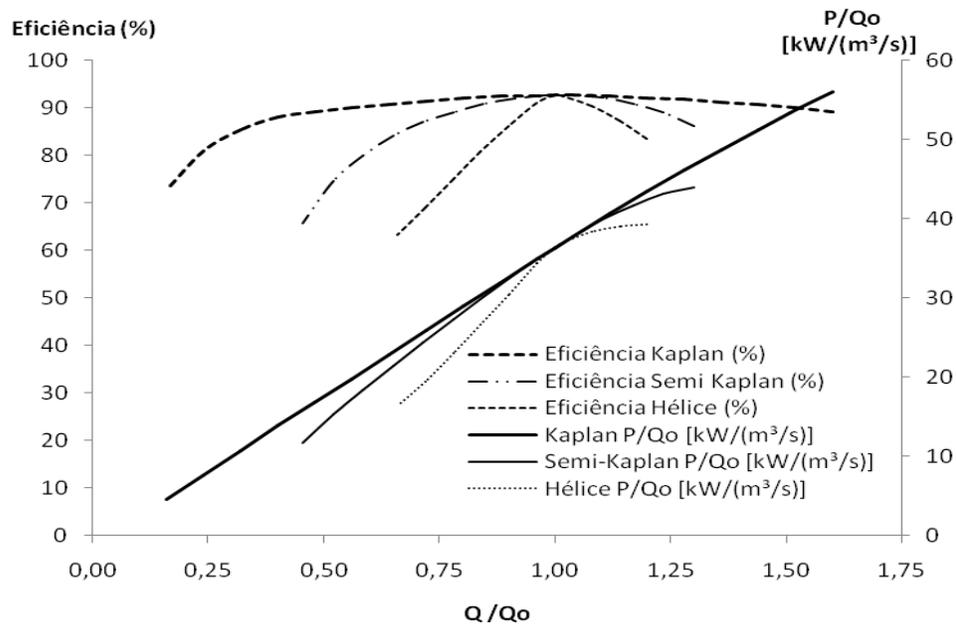


Figura 5.41 - Curvas de rendimento e de potência das turbinas Kaplan, Semi-Kaplan e Hélice normalizadas pela vazão ótima de projeto Q_o .

Observa-se na Figura 5.42 que a turbina Kaplan apresenta a faixa de operação de maior amplitude, $0,16 \leq Q/Q_o \leq 1,60$, sua curva de rendimento apresenta um platô, e sua potência máxima é a maior das três. A turbina Hélice apresenta a menor potência máxima, sua curva de rendimento é acentuada, com sua faixa de operação compreendida por $0,66 \leq Q/Q_o \leq 1,20$. A turbina Semi-Kaplan apresenta comportamento intermediário entre ambas, com a seguinte faixa de operação $0,46 \leq Q/Q_o \leq 1,30$.

Observa-se que o código computacional TURBNPRO fornece os limites de operação das turbinas, razão pela qual serão utilizadas as curvas de potência obtidas com o auxílio desse software para o estudo técnico-econômico objeto da presente pesquisa.

Com os dados da curva de permanência é possível configurar turbinas hidráulicas e realizar cálculos de geração de energia para uma única turbomáquina. Para isso, o usuário fornece ao código computacional, um conjunto de condições hidrelétricas e parâmetros de operação. A análise de geração de energia a partir de arranjos de duas turbinas será efetuada com o auxílio de planilhas eletrônicas.

Para o cálculo dessa energia, faz-se necessário o acoplamento dessas curvas de carga às vazões da curva de permanência. Para essa finalidade, foram adotadas fórmulas de aproximação que representam bem as curvas de carga, conforme mostrado a seguir.

A Figura 5.42 mostra a potência de saída da turbina Kaplan normalizada pela vazão ótima de projeto, sua fórmula de aproximação bem como a faixa de operação. No caso em estudo, foram considerados H e η constantes. A regressão matemática com seu coeficiente de Nash, R^2 , o qual apresenta valor igual a 1,00, o que mostra ser a mesma uma boa representação da curva.

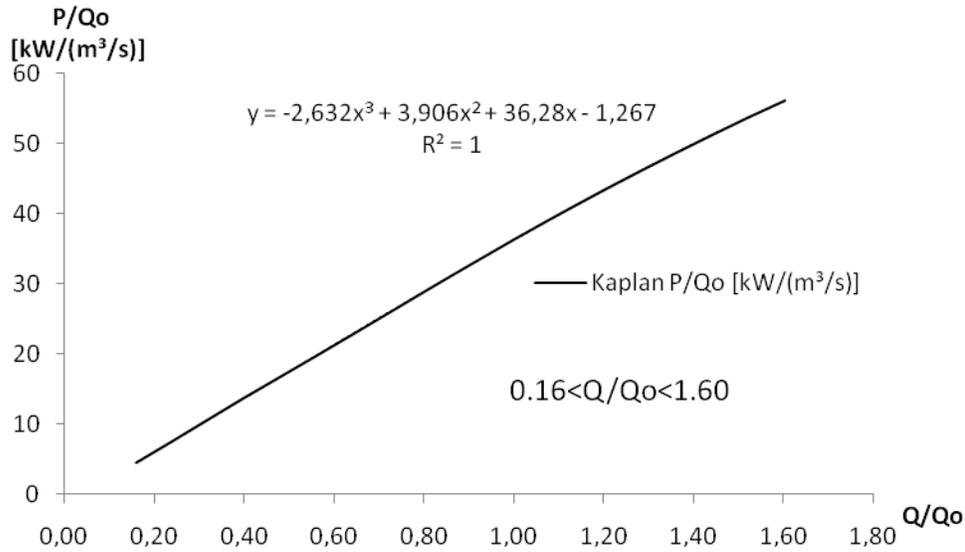


Figura 5.42 - Potência de saída da turbina Kaplan normalizada pela vazão ótima de projeto.

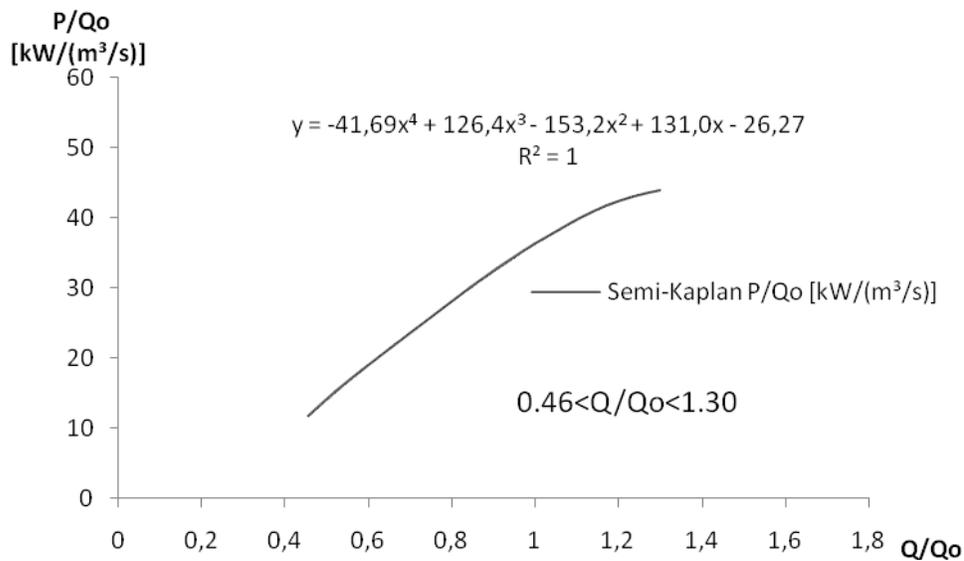


Figura 5.43 - Potência de saída da turbina Semi-Kaplan normalizada pela vazão ótima de projeto.

A Figura 5.43 mostra a potência de saída da turbina Semi-Kaplan e sua correspondente fórmula de aproximação com seu coeficiente de Nash, R^2 , o qual apresenta valor de 0,999, muito próximo de 1,00, o que mostra ser a mesma uma boa representação da curva.

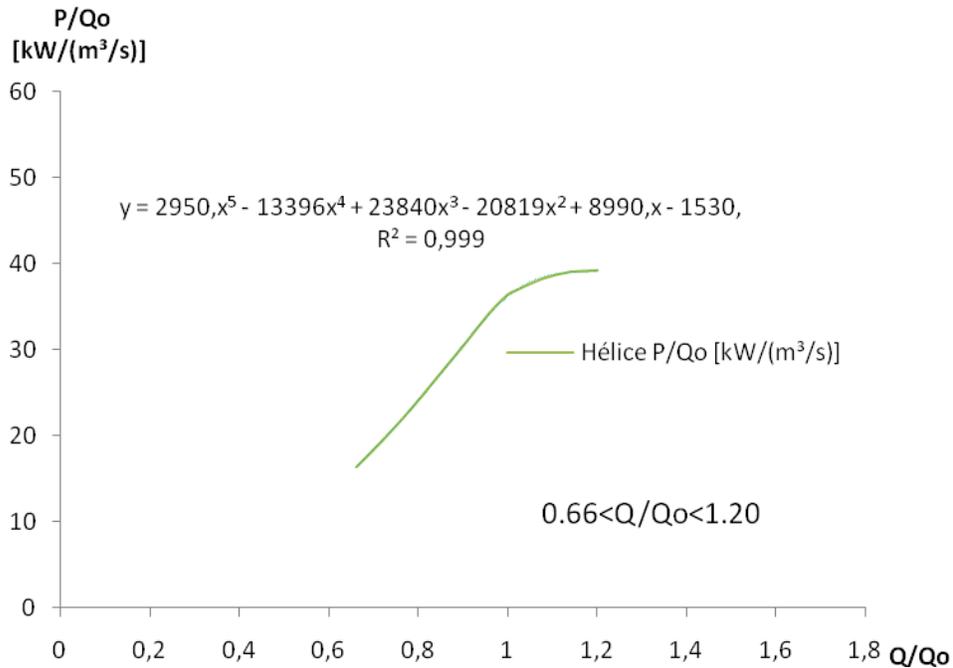


Figura 5.44 - Potência de saída da turbina Hélice normalizada pela vazão ótima de projeto.

A Figura 5.44 mostra a potência de saída da turbina Hélice com regulagem do distribuidor e sua correspondente fórmula de aproximação com seu coeficiente de Nash, R^2 , o qual apresenta valor de 0,999, muito próximo de 1,00, o que mostra ser a mesma uma ótima representação da curva.

5.4.3 Bacias sintéticas

A pequena bacia hidrográfica *PBH* da Figura 5.45 forneceu a base de estudos para as curvas de permanência das bacias sintéticas simuladas, conforme explanado a seguir. A mesma está situada a 160 km a leste de Belém, no Estado do Pará. Possui área de drenagem de 82 km².

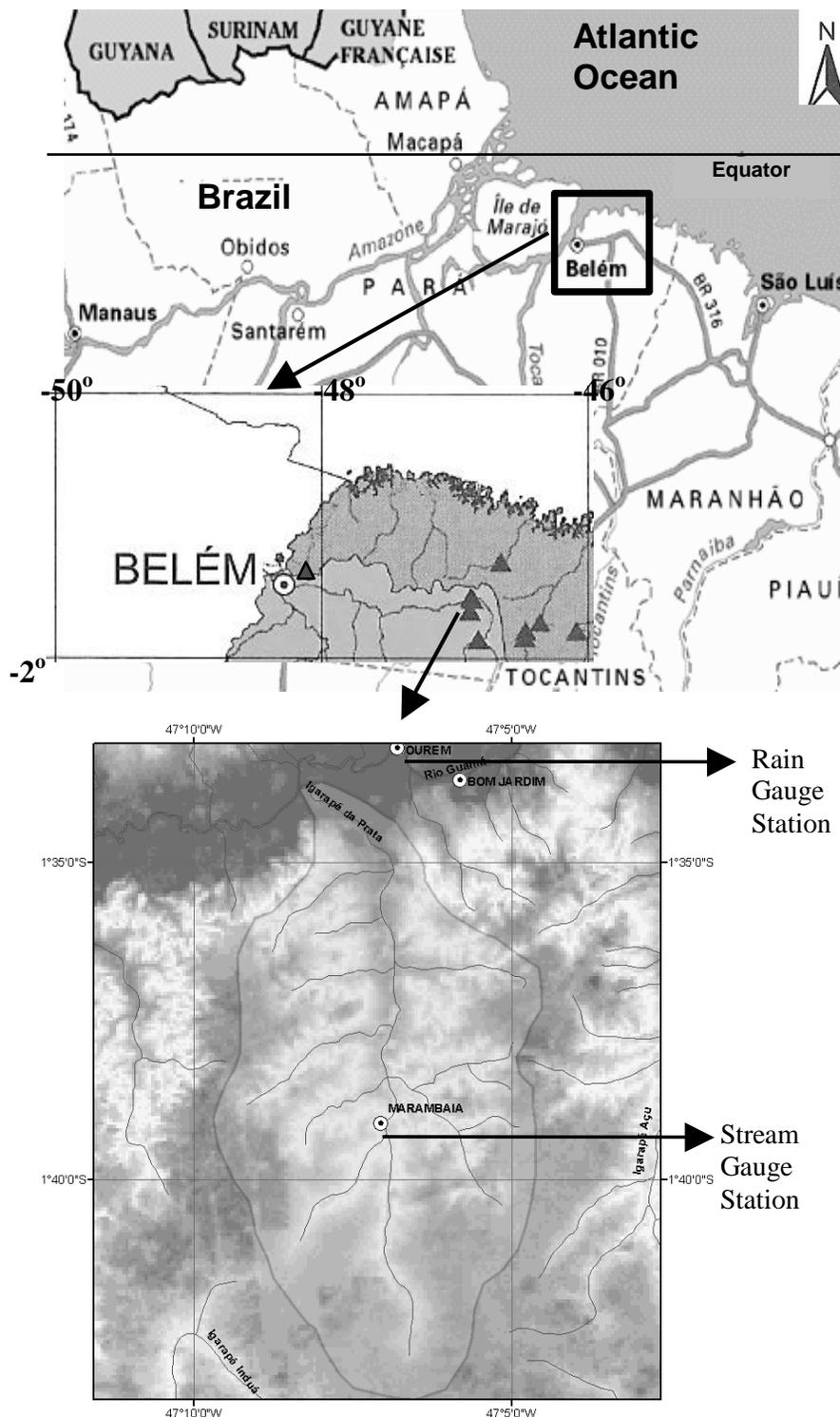


Figura 5.45 - Localização da pequena bacia hidrográfica PBH.

A Figura 5.46 mostra a curva de permanência da PBH para o período de 01/01/1993 a 31/12/1999.

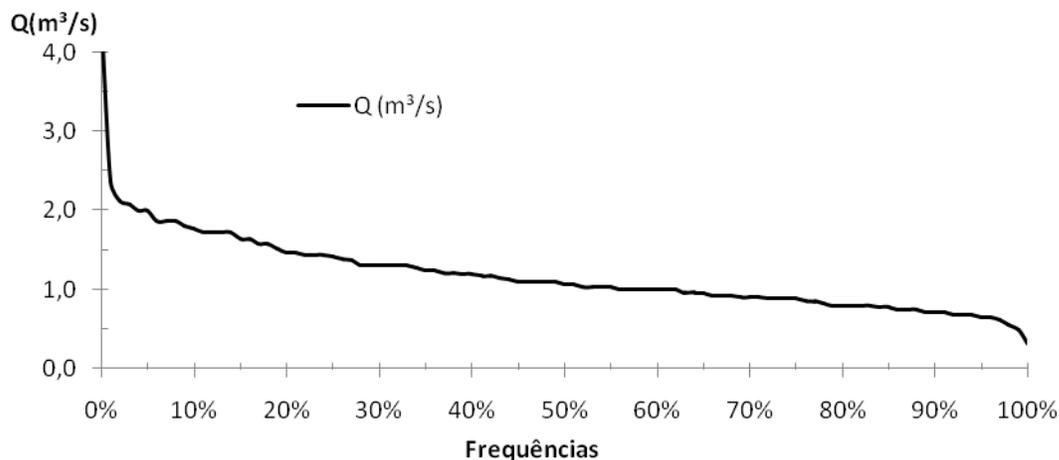


Figura 5.46 - Curva de permanência da PBH para o período de 01/01/1993 a 31/12/1999.

Neste estudo, foram simuladas bacias sintéticas que apresentam curvas de permanência semelhantes à da Figura 5.46, cujas vazões de permanência são estimadas a partir da multiplicação de um fator de escala dessas bacias em relação à bacia real, sendo que todas foram consideradas de mesma queda, $H=4,0m$.

A Tabela 5.4 relaciona as bacias sintéticas consideradas de interesse. A razão do interesse de cada bacia está relacionada na linha de comentários dessa tabela.

Tabela 5.4 - Características das bacias sintéticas *B1* a *B6*.

| Bacia | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
|-------------------|----------------|---------------------------|--------|---------------|---------------------|---------------------------|
| $Q_{95\%}$ (m³/s) | 0,286 | 0,800 | 2,315 | 8,000 | 269,070 | 342,395 |
| Comentários | $Q_{95\%}=Q_0$ | P.Ret.=V.útil =35 anos | Viável | Estabilização | 30MW c/ 2 Kaplan | 30MW c/ 2 semi- Kaplan |

Na Tabela 5.4, a bacia *B1* apresenta $Q_{95\%}$ com o mesmo valor da vazão ótima Q_0 da turbina real estudada por ALBUQUERQUE (2006). A bacia *B2* apresenta o período de retorno do empreendimento de 35 anos, igual à vida útil típica de PCHs, sendo utilizada na

análise econômica deste estudo. A bacia *B3* apresenta resultados considerados empresarialmente viáveis. A bacia *B4* tem resultados situados na faixa de estabilização dos indicadores econômicos, e as bacias *B5* e *B6* apresentam potência de 30MW para turbinas Kaplan e semi-Kaplan, respectivamente. Este é o limite máximo legal de potências para PCHs.

A Figura 5.47 mostra a curva de permanência da bacia sintética *B1*.

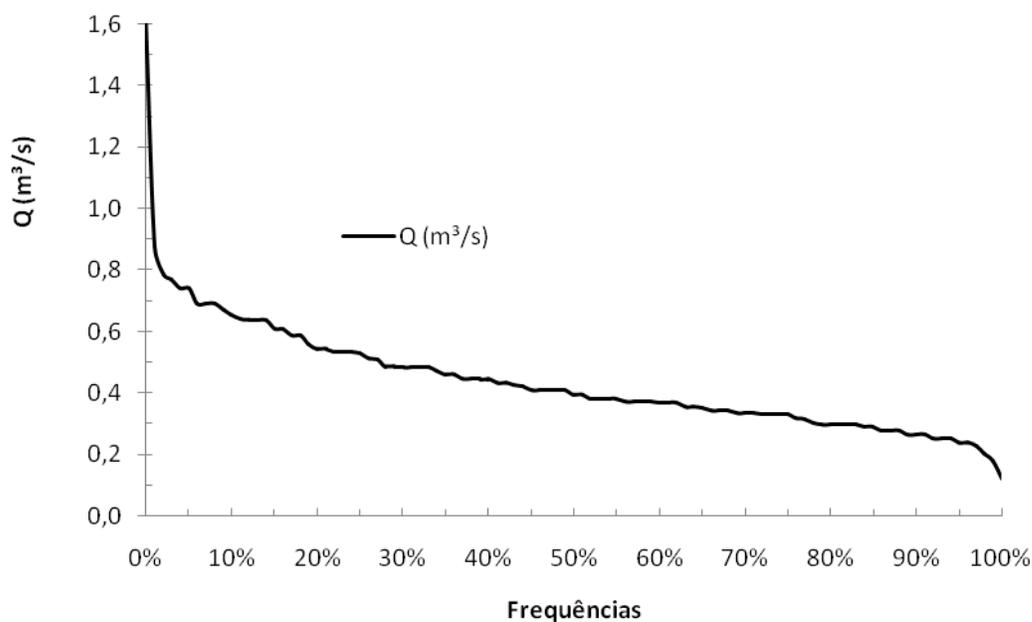


Figura 5.47 - Curva de permanência de vazões da bacia sintética *B1*.

Observa-se na Figura 5.47 que $Q_{95\%} = 0,286m^3/s$, correspondente à vazão ótima de projeto da turbina real estudada.

5.4.4 Cálculo da energia disponível

A Figura 5.48 mostra a energia disponível calculada para a bacia *B1*.

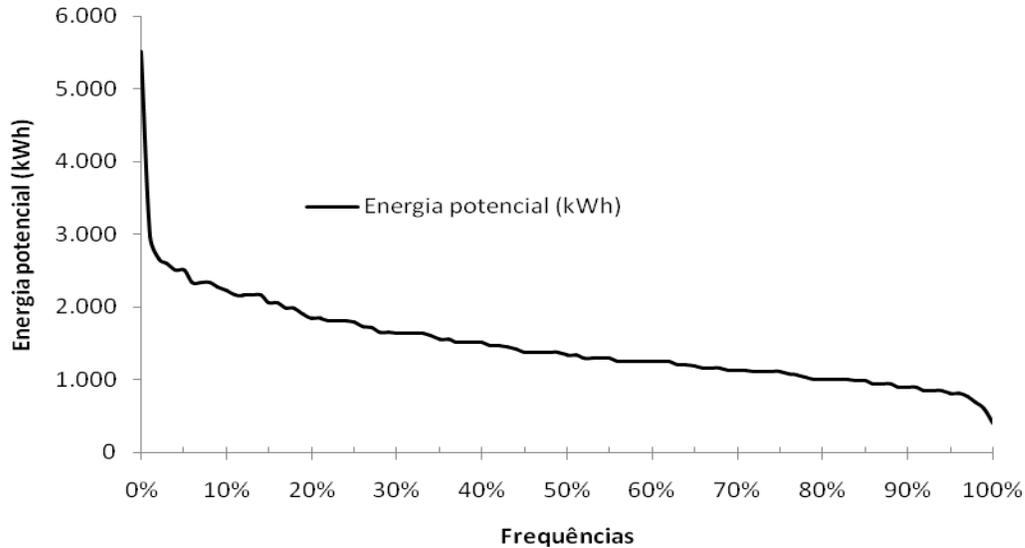


Figura 5.48 - Energia disponível da bacia sintética *B1*.

Observam-se, na Figura 5.48, os valores de energia disponível para cada vazão de permanência centesimal, variando de um mínimo de 404 kWh ao valor máximo de 5.519 kWh. O somatório dessas energias perfaz um montante anual de 150MWh.

5.4.5 Eficiência energética da PCH

No caso estudado neste trabalho, de uma PCH de baixa queda na Amazônia, analisa-se o uso de duas turbinas axiais de potências P_1 e P_2 , para aproveitamento hidrelétrico da bacia sintética *B1*, cuja curva de permanência de vazões encontra-se na Figura 5.47. A vazão ótima de projeto da turbina P_1 tem o mesmo valor de $Q_{95\%}$ da curva de permanência da bacia *B1* (ELETROBRAS, 2002). São estudados três tipos de regulagem para as turbinas: dupla, do rotor e do distribuidor. O valor adotado para o rendimento do gerador elétrico foi de 92%.

A Figura 5.49 mostra a eficiência energética da PCH em função da vazão e da relação de potências P_2/P_1 de turbinas tipo Kaplan (a), semi-Kaplan (b) e Hélice (c).

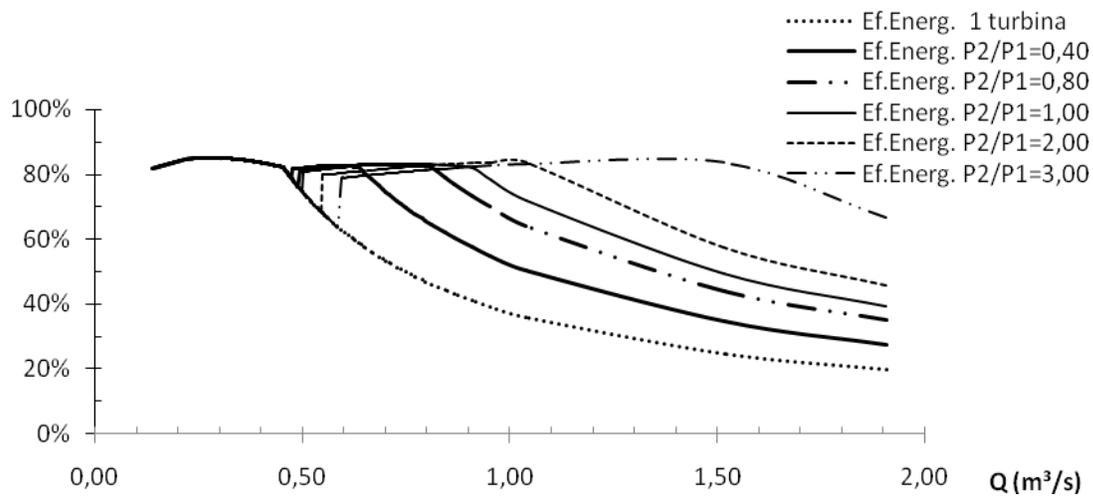


Figura 5.49.a - Eficiência energética da PCH provida de turbinas Kaplan.

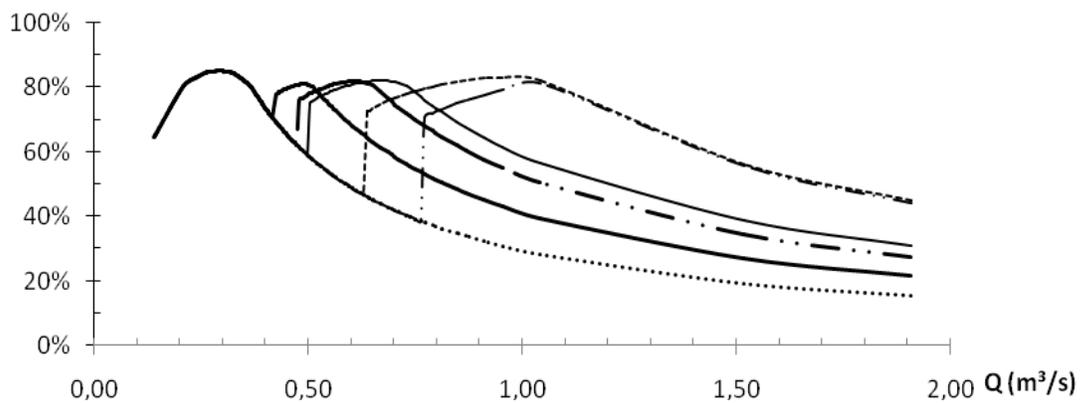


Figura 5.49.b - Eficiência energética da PCH provida de turbinas semi-Kaplan.

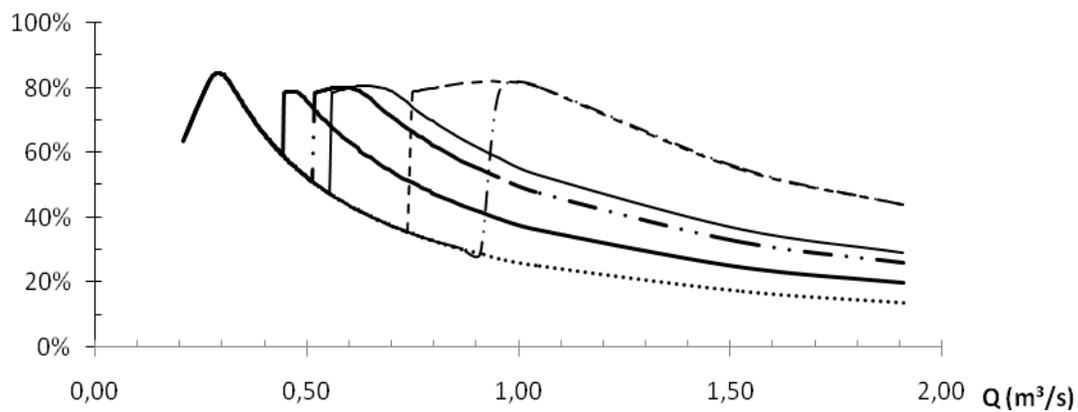


Figura 5.49.c - Eficiência energética da PCH provida de turbinas Hélice.

Observa-se nas Figuras 5.49(a), 5.49(b) e 5.49(c), que a eficiência energética da PCH tem dois trechos distintos. O trecho inicial corresponde à operação apenas da turbina P_1 , sendo a vazão não turbinada insuficiente para o início da operação da segunda turbina. No segundo trecho da curva, quando a vazão não turbinada atinge o valor mínimo para ativação da segunda turbina, a eficiência da PCH cresce devido à contribuição da energia da turbina de potência P_2 . À medida que a potência da segunda turbina cresce, a vazão necessária ao início de operação dessa turbina também cresce, retardando a entrada em operação da mesma.

A Tabela 5.5 mostra a eficiência energética da PCH em função do modo de regulação e relação de potência das turbinas, obtidas a partir da curva de permanência de vazões da bacia BI ; da altura de queda disponível que foi considerada como sendo de 4 m ; das curvas de carga dos três tipos de turbinas axiais (Kaplan, semi-Kaplan e hélice) obtidas a partir do código computacional TURBNPRO, com vazão ótima de projeto $Q_o = 0,286\text{ m}^3/\text{s}$ igual à vazão $Q_{95\%}$ da curva de permanência da bacia.

Tabela 5.5 - Eficiência energética da PCH em função do modo de regulação e P2/P1.

| Tipo das turbinas | Relação de potencias P2/P1 | | | | | |
|-------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | 0,00 | 0,40 | 0,80 | 1,00 | 2,00 | 3,00 |
| Kaplan | 65% | 75% | 79% | 80% | 79% | 79% |
| Semi-Kaplan | 54% | 66% | 71% | 72% | 69% | 62% |
| Hélice | 49% | 61% | 65% | 65% | 60% | 53% |

A Figura 5.50 mostra a eficiência energética da PCH em função do modo de regulação e relação de potência das turbinas.

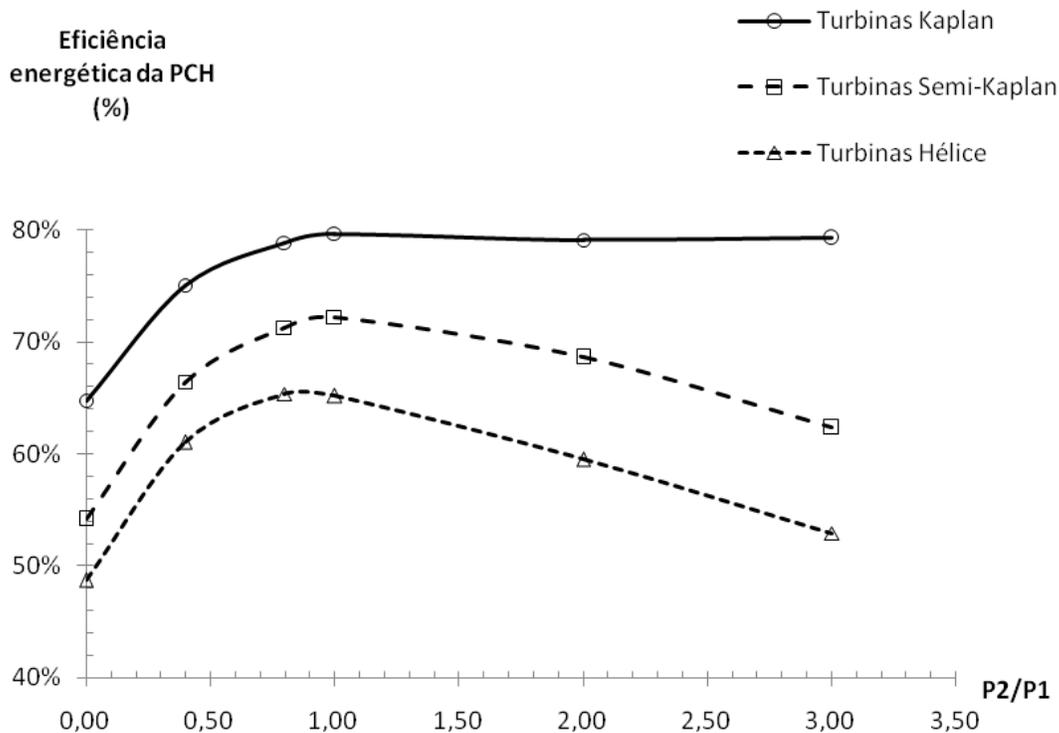


Figura 5.50 - Eficiência energética da PCH segundo o modo de regulagem das turbinas e $P2/P1$.

Na Figura 5.50, observa-se que as eficiências energéticas de PCHs com arranjos de duas turbinas apresentam seus valores máximos quando $P2/P1=1,00$, sendo de 80% para turbinas Kaplan (dupla regulagem), 72% para turbinas semi-Kaplan (regulagem do rotor) e 65% para turbinas Hélice (regulagem do distribuidor). Para PCHs com uma única turbina, esses valores são de 65% para turbinas Kaplan, 54% para semi-Kaplan e 49% para turbinas Hélice. Portanto, em relação à geração a partir de uma única turbina, o uso de duas turbinas apresentou aumento de eficiência energética da PCH de 15% para turbinas Kaplan, 18% para semi-Kaplan e 16% para turbina Hélice com distribuidor regulável, apresentando maior geração de energia e consequentemente melhores resultados econômicos.

Assim, no caso estudado, encontrou-se a máxima eficiência energética da PCH provida de duas turbinas para $P_2/P_1=1,00$, o que significa que os melhores resultados encontrados correspondem ao o uso de duas turbinas iguais.

A Figura 5.51 mostra as curvas de permanência de vazões, de energia disponível e de energia gerada por duas turbinas iguais semi-Kaplan para a bacia B1.

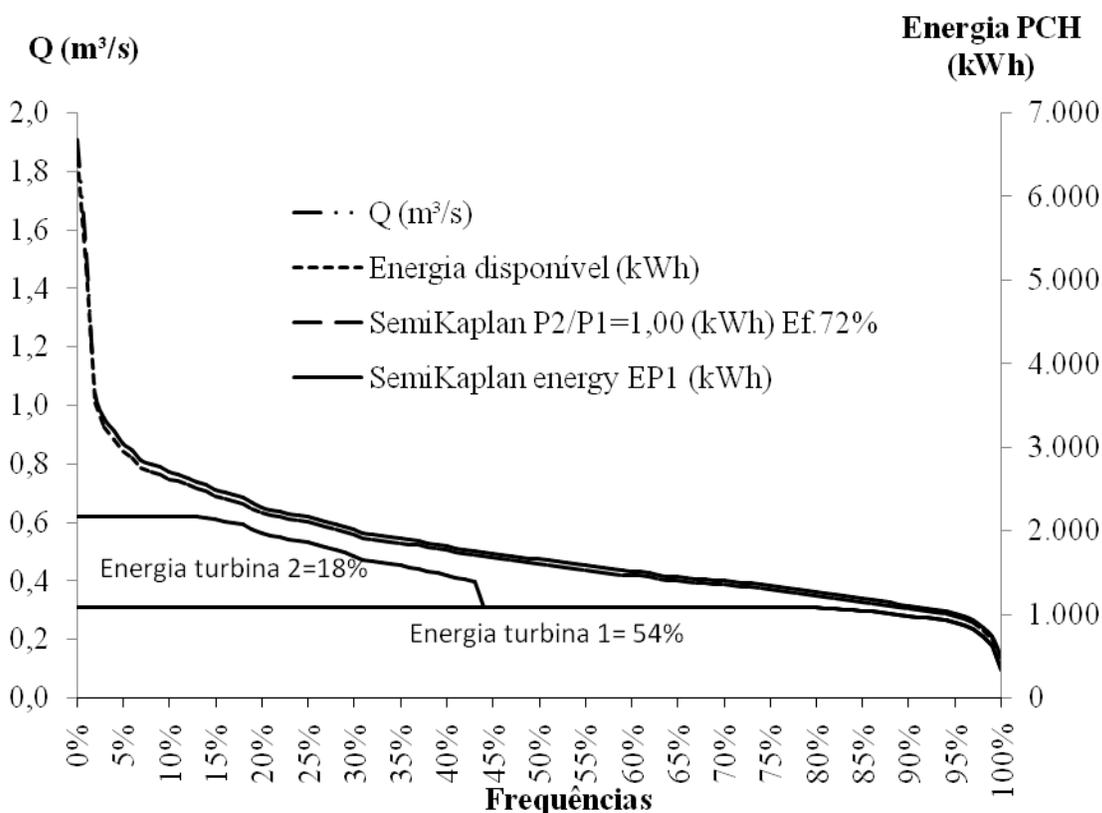


Figura 5.51 - Curvas de permanência de vazões, de energia disponível e de energia gerada por duas turbinas iguais semi-Kaplan para a bacia B1.

Observa-se na Figura 5.51, que a turbina 1 gera 54% da energia da PCH, operando durante 100% do tempo, enquanto que a turbina 2 gera 18% da energia da PCH, operando durante 45% do tempo. No eixo das vazões, podem ser lidas as vazões mínima e máxima da turbina 1 e por subtração desta última, as da turbina 2. Os 28% de energia não aproveitada

correspondem à área abaixo da curva de energia disponível, porém superior às áreas de energia das turbinas 1 e 2.

A análise da Figura 5.51 é extremamente produtiva e relevante, pois a partir do presente estudo de caso, pode-se ampliar a análise para a visão geral desse tipo de empreendimento (PCH), para diversas turbinas, com rendimentos e curvas de carga diferentes. Inclusive com curvas de permanência e com a queda variando segundo curvas-chave.

5.4.6 Custos de implantação

BALARIM *et al.* (2000), PAISH (2002) e KALDELLIS *et al.* (2005) estudaram o custo de implantação de pequenas centrais hidrelétricas, em função da potência instalada dessas usinas. A Figura 5.52 mostra o comportamento do custo de implantação de usinas em função da potência a partir das conclusões desses pesquisadores.

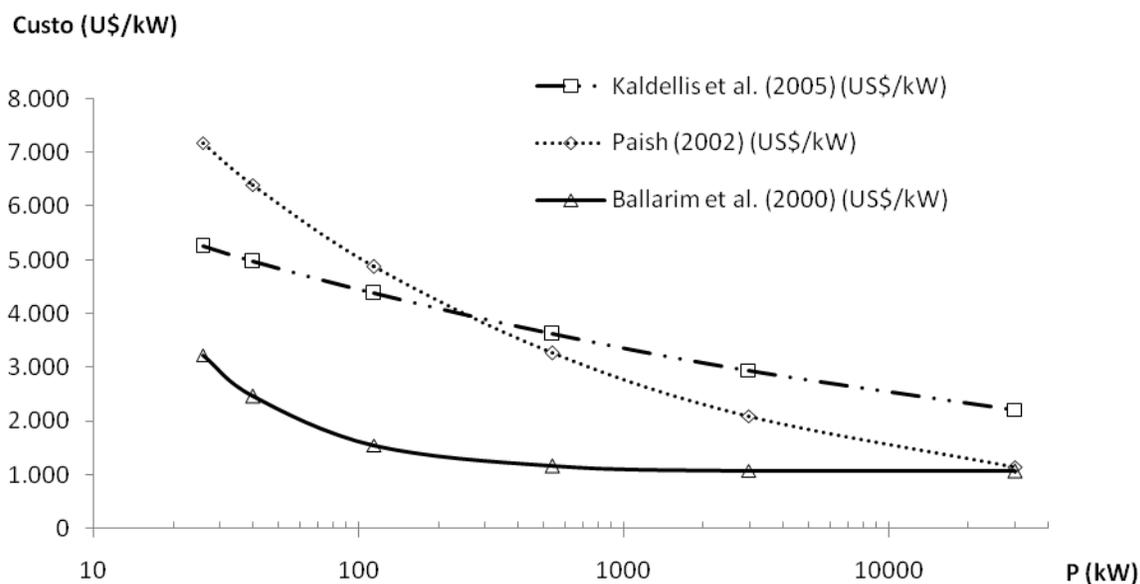


Figura 5.52 - Custos de implantação de PCHs em função da potência.

Fonte: Adaptado de BALARIM *et al.* (2000), PAISH (2000) e KALDELLIS *et al.* (2005)

Observa-se na Figura 5.52, que os custos são representados por hipérbolas decrescentes com assíntota horizontal na faixa de US\$ 1,060/kW. Por tratar-se de estudo de PCHs no Brasil, preferiu-se o uso de BALARIM *et al.* (2000) como referência no presente trabalho.

A máxima eficiência energética da PCH ocorre para $P_2/P_1=1,00$. Consequentemente para a mesma potência de saída da PCH, ou seja, com os mesmos custos de investimento, eficiências energéticas maiores, implicam em mais energia gerada e melhores resultados econômicos. Portanto, as próximas análises consideraram $P_2/P_1=1,00$.

5.4.7 Análise econômica

Tendo sido determinada a relação ótima para $P_2/P_1=1,00$, torna-se adequado efetuar a análise econômica em função da potência de saída da PCH, de modo a permitir uma ampla análise dos resultados. A energia gerada, a renda e os encargos decorrentes da comercialização dessa energia são calculados; os custos de implantação da hidrelétrica, e os indicadores econômico-financeiros mais relevantes, como o resultado operacional anual, taxa interna de retorno, período de retorno do investimento, valor presente líquido, relação benefício custo, rentabilidade e outros.

Para a formulação da análise econômica das usinas, são considerados os dados relacionados na Tabela 5.6, a qual inclui o preço de venda do kWh, a um valor específico de R\$ 0,155 equivalente a R\$155,00/MWh, preço-teto aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para PCHs em agosto/2010.

Tabela 5.6 - Dados considerados na formulação da análise econômica das usinas.

| | | |
|------------------------------------|-----------|---------------------------|
| Vida útil | 35 | anos |
| Custos de operação e manutenção | 2,70% | do investimento |
| Tx juros | 2% | a.a. |
| PIS | 1,65% | sobre faturamento |
| COFINS | 2% | sobre faturamento |
| Tx fiscalização ANEEL | 0,5% | a.a. |
| Seguros | 1% | a.a. |
| Depreciação | 3% | a.a. |
| Contribuição Social | 8% | sobre faturamento |
| RGR | 2,50% | a.a.inv.<3% receita anual |
| Taxa de desconto | 15% | |
| Imposto de renda | 15% | Faturamento<R\$240.000; |
| | 25% | sobre diferença |
| A_n | 6,566 | |
| Período de Funcionamento Anual (h) | 8554 | |
| Preço de venda do kWh | R\$ 0,155 | |
| CUE Rede | 0,09 | US\$/KWh |
| CUE Diesel= | 0,19 | US\$/KWh |

O Período de Retorno do Investimento (Payback) quantifica o tempo que o investidor necessita para recuperar o capital financeiro que investiu no empreendimento.

A Figura 5.53 explicita o período de retorno do empreendimento em função da potência da PCH e do tipo de regulação das turbinas.

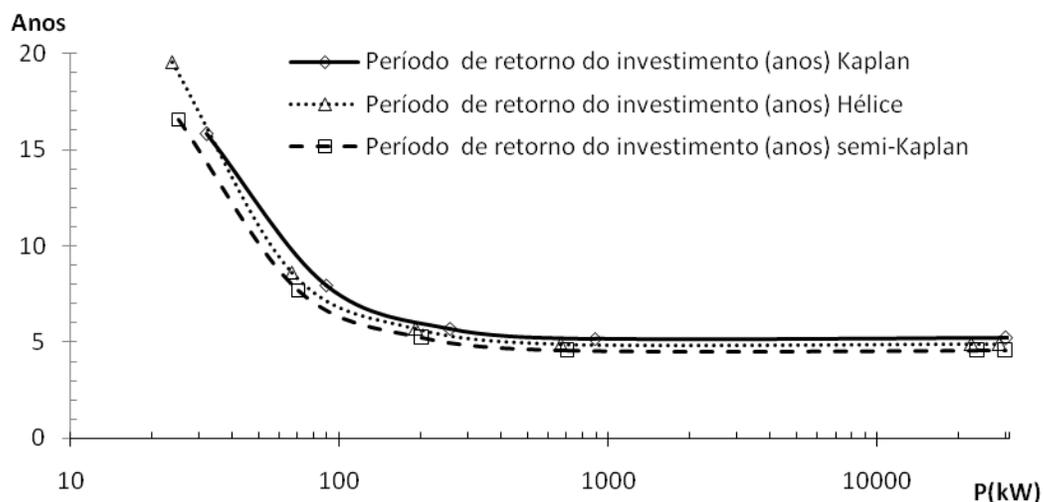


Figura 5.53 - Período de retorno em função da potência da PCH e do tipo de regulação.

A Figura 5.53 mostra que o período de retorno diminui com o aumento da potência da PCH. O período de retorno mínimo, de cinco anos ocorre para PCHs com potência maior que 300 kW, quando os custos de implantação (R\$/kW) estabilizam-se.

O Valor Presente Líquido (VPL) consiste no transporte de todos os valores futuros para o momento presente, através do cálculo da soma algébrica de todos os valores positivos (entradas, receitas, benefícios, etc.) e negativos (saídas, despesas, custos, etc.) existentes no fluxo de caixa, incluindo o investimento inicial e aplicando-se uma taxa de desconto.

$$VPL = \sum_1^n \frac{VFL}{(1+i)^j} \quad (5.7)$$

onde:

VPL é o valor presente líquido;

n é o número total de períodos, ou seja, o horizonte de projeto;

VFL é o valor futuro líquido, ou seja, o saldo, valor futuro entrada menos o valor futuro de saída;

j é o período em que ocorre o valor;

i é a taxa de desconto.

A Rentabilidade é calculada pelo quociente entre o VPL acumulado e o Investimento inicial, subtraído da unidade e colocado sob a forma de percentual (DUARTE, 2009).

$$R = \left[\left(\frac{VPL_a}{I_1} \right) - 1 \right] \times 100\% \quad (5.8)$$

onde R é a rentabilidade do projeto em %;

VPL_a é o valor presente líquido acumulado;

I_1 é o investimento no primeiro ano do projeto.

Quanto maior a rentabilidade, mais atrativo empresarialmente torna-se o empreendimento. Se negativa, o empreendimento não apresenta atratividade a investidores. Sob a ótica empresarial, a rentabilidade deve apresentar capacidade de remunerar o risco e o trabalho empregado. De modo geral, para empreendimentos de curta e média duração esse valor é de 35% e para longa duração é de 50% (HIRSCHFELD, 1989).

A Figura 5.54 mostra a rentabilidade do empreendimento em função da potência de saída da PCH.

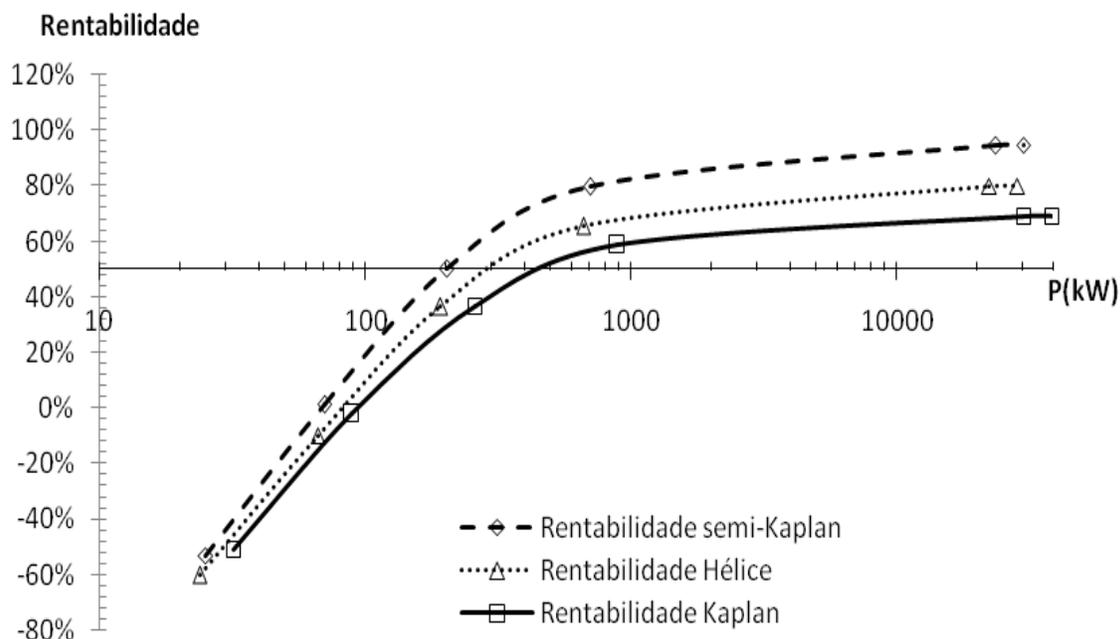


Figura 5.54 - Rentabilidade em função da potência da PCH e do tipo de regulagem.

Na Figura 5.54, observa-se que a rentabilidade cresce com o aumento da potência de saída da PCH e se estabiliza para potências superiores a 1MW. Verifica-se nessa figura, que a rentabilidade é maior para turbinas semi-Kaplan, de rotor regulável, intermediária para turbinas hélice, de distribuidor regulável, e menor para turbinas Kaplan, de regulagem dupla. Isso decorre do aumento da potência da PCH que afeta de duas maneiras a rentabilidade:

1º) negativamente, pois os custos de implantação crescem com o aumento da potência da PCH;

2º) positivamente pois a renda da venda de energia cresce com o aumento da potência da PCH.

Portanto, as turbinas semi-Kaplan são preferíveis por maximizar a rentabilidade do empreendimento, particularmente para potências superiores a 120 kW, a partir dos quais a rentabilidade supera 50%, tornando o empreendimento a partir desse ponto atraente, mesmo

se considerado de longa duração. A máxima rentabilidade ocorre para PCHs com potência de 30MW, valor máximo segundo a legislação brasileira, sendo de 95% para turbinas semi-Kaplan (regulagem do rotor), 80% para turbinas Hélice (regulagem do distribuidor) e 69% para turbinas Kaplan (regulagem dupla).

A Figura 5.55 mostra os custos unitários de energia do empreendimento em função da potência da PCH e do tipo de regulagem.

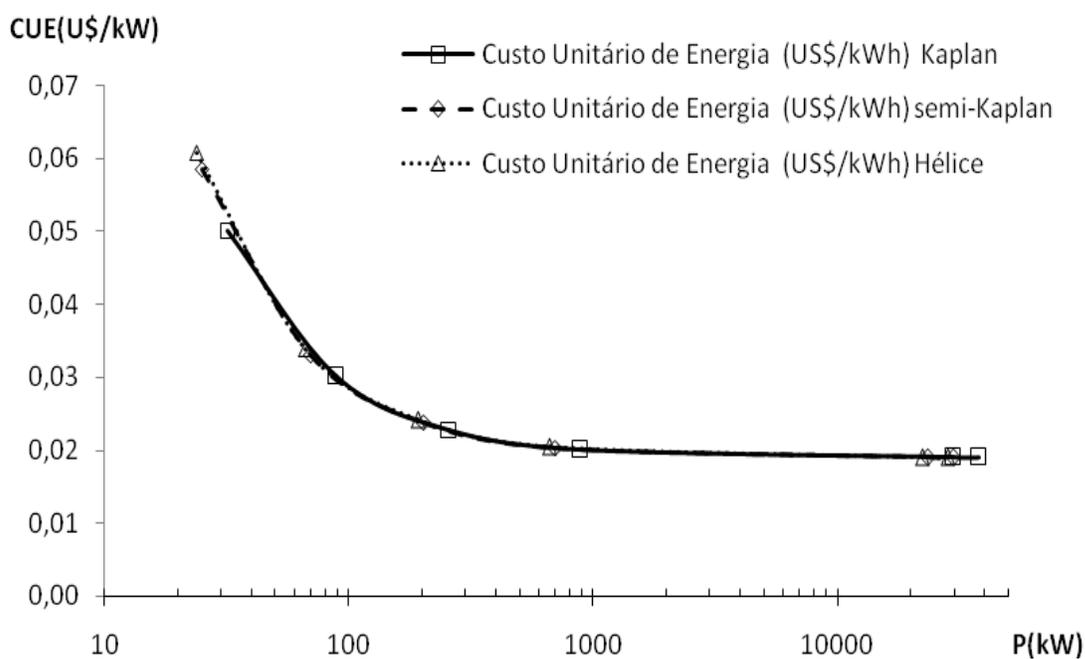


Figura 5.55 - Custos unitários de energia da PCH em função da potência.

A Figura 5.55 mostra que os custos unitários de energia atingem seu mínimo para potências superiores a 1 MW, estabilizando em torno de US\$0.02/kWh.

A Figura 5.56 mostra o resultado líquido operacional anual.

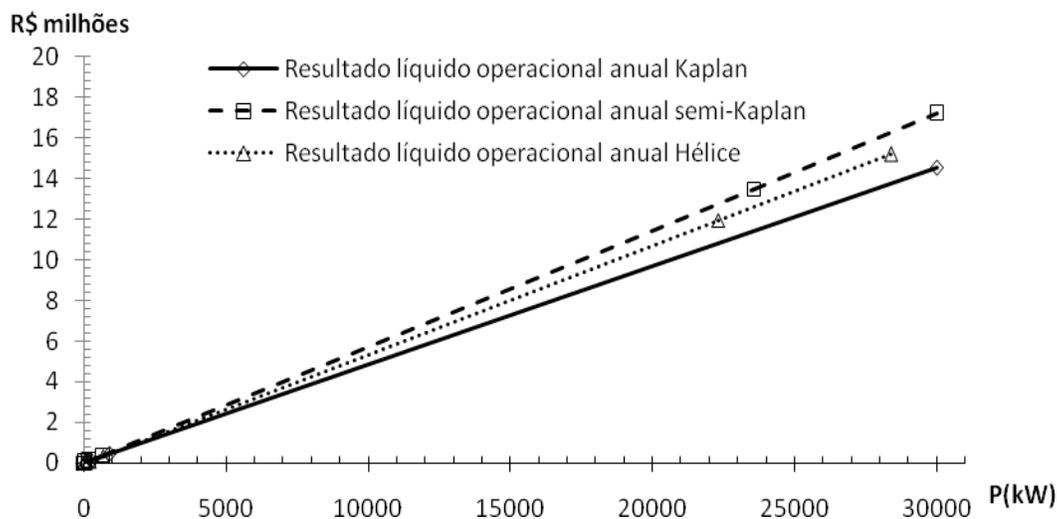


Figura 5.56 - Resultado líquido operacional anual em função da potência e do tipo de regulagem das turbinas.

Observa-se na Figura 5.56 que o resultado líquido operacional anual é maior para regulagem do rotor, intermediário para regulagem do distribuidor e menor para regulagem dupla.

5.4.8 Cenários

BALARIM *et al.* (2000) estudaram os custos de implantação de PCHs, elaborando seus custos em três faixas, inferior, média e superior. Nas etapas anteriores do presente trabalho, foi utilizada a faixa média, considerada como mercado neutro.

No presente capítulo, são apresentados aspectos relativos à geração de energia elétrica pelas PCHs em bacias de baixa queda da Amazônia, sugerindo o autor, que o estudo da influência da demanda por energia elétrica seja desenvolvido em estudo futuro, haja vista a necessidade de estudo de dados demográficos, econômico-sociais e hidrológicos, considerados, então, devido à delimitação do tema da presente Tese.

O preço-teto de venda do MWh de R\$155,00 aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para PCHs em agosto de 2010, tende a sofrer deságio quando do processo do leilão de energia, com reflexos nos resultados econômicos da PCH, portanto, sendo necessária a análise de sua influência nesses resultados.

Serão aqui analisados três cenários, denominados de mercado aquecido, com custos de implantação elevados em 30% e sem deságio no preço do MWh, mercado neutro, sem elevação dos custos de implantação e sem deságio no preço do MWh, e finalmente mercado desaquecido, com redução de 30% nos custos de implantação e deságio de 30% no preço do MWh.

A Figura 5.57 mostra os custos específicos de implantação de PCHs em função da potência para os três cenários considerados.

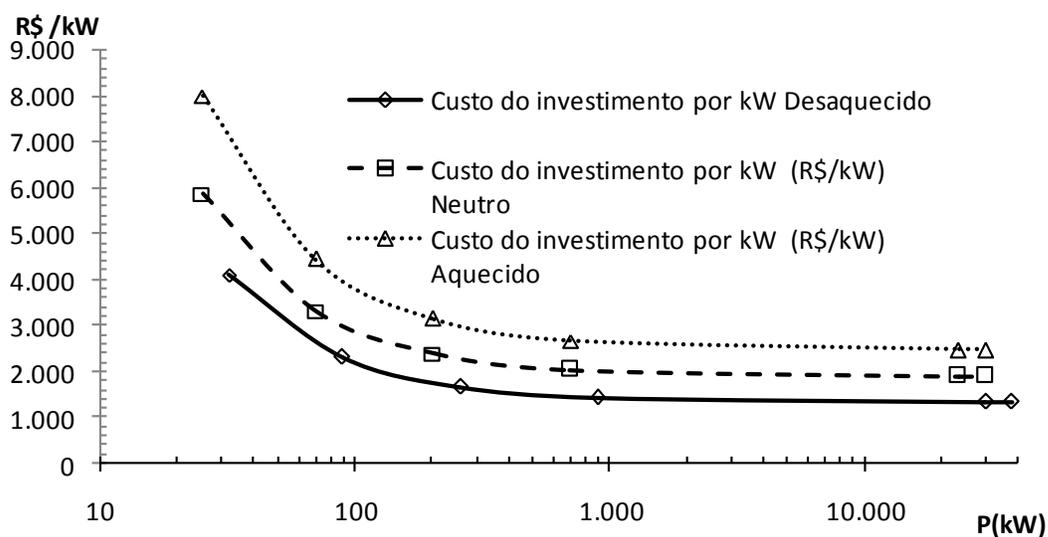


Figura 5.57 - Custos específicos de implantação de PCHs em função da potência e do aquecimento do mercado.

Fonte: Adaptado de BALARIM *et al.* (2000).

Observa-se na Figura 5.57 a diminuição desses custos com o aumento da potência e com o aquecimento do mercado.

A Figura 5.58 mostra a rentabilidade de PCHs dotadas de duas turbinas semi-Kaplan em função da potência da PCH e segundo o aquecimento do mercado.

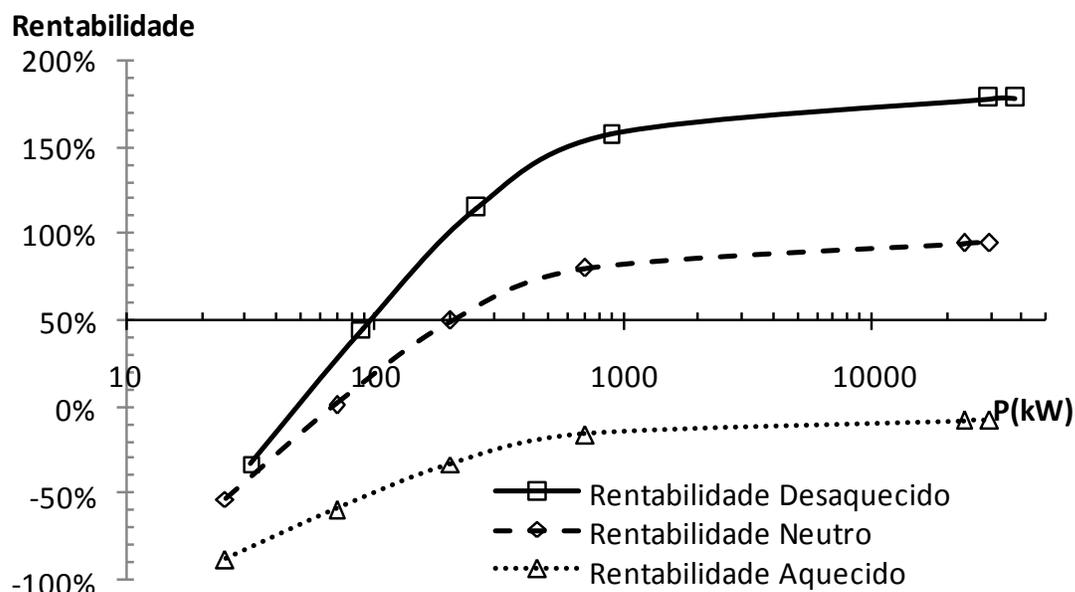


Figura 5.58 - Rentabilidade de PCHs dotadas de duas turbinas semi-Kaplan em função da potência e do aquecimento do mercado.

Observa-se na Figura 5.58, o aumento da rentabilidade com o desaquecimento do mercado e, portanto, com a diminuição dos custos de implantação das PCHs. Nota-se, que a rentabilidade é fortemente influenciada pelo grau de aquecimento do mercado, constituindo-se em fator decisório da viabilidade da PCH, verificando-se, que para o mercado aquecido, a rentabilidade será inferior aos 50% recomendados para empreendimentos de longo prazo.

A Figura 5.59 mostra o comportamento do período de retorno de PCHs dotadas de turbinas semi-Kaplan em função da potência de saída e segundo o grau de aquecimento do mercado.

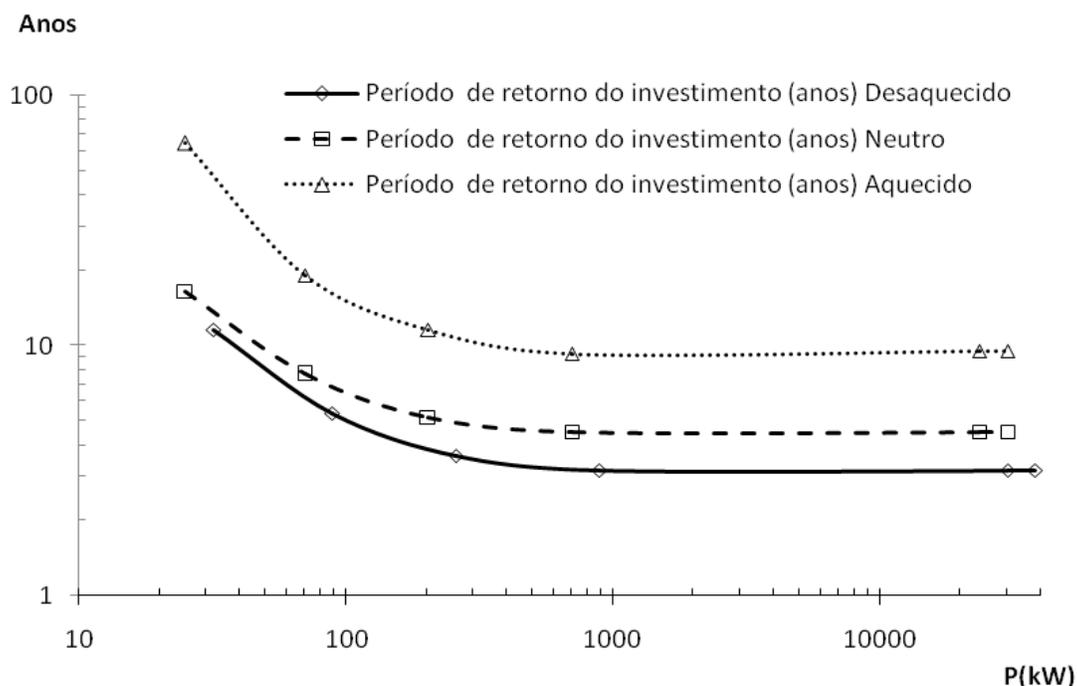


Figura 5.59 - Período de retorno de PCHs dotadas de turbinas semi-Kaplan em função da potência de saída e o aquecimento do mercado.

Observa-se na Figura 5.59, a diminuição do período de retorno com o desaquecimento do mercado, ou seja, com a diminuição dos custos de implantação das PCHs e do deságio do MWh. Portanto, o cenário mais atrativo ao empreendedor ocorre para o mercado desaquecido, o qual apresenta menores custos de implantação, maior rentabilidade e menor período de retorno.

5.4.9 Considerações finais

O estudo desenvolvido aborda a análise técnico-econômica do aproveitamento energético de sítios hidrelétricos de baixa queda para a geração de energia elétrica,

permitindo um melhor entendimento do processo de aproveitamento energético e do desempenho técnico-econômico do empreendimento.

A aplicação da metodologia, aqui apresentada, contribui para a definição do melhor aproveitamento energético de pequenas bacias hidrográficas, tanto pela visão do social, como do empresarial, a partir da análise técnico-econômica nos moldes propostos.

Assim, o presente capítulo estudou aspectos técnicos e econômicos relevantes para a melhoria do uso de arranjos em paralelo de duas turbinas axiais em PCHs na Amazônia. Destacando-se aspectos relevantes do caso estudado:

i) Eficiência de uma única turbina de vazão ótima de projeto igual a $Q_{95\%}$ segundo o modo de regulação:

Verificou-se que a turbina Kaplan apresenta a melhor eficiência, de 65%, enquanto que a turbina semi-Kaplan apresenta eficiência de 54% e a turbina hélice tem eficiência de 49%.

ii) Influência da relação das potências das turbinas, P_2/P_1 , e do modo de regulação sobre a eficiência energética da PCH:

Considerado o período de um ano, a máxima eficiência energética da PCH é obtida para $P_2/P_1=1,00$, para os três modos de regulação. PCHs providas de turbinas Kaplan apresentam a melhor eficiência, no valor de 80%, enquanto que a turbina semi-Kaplan apresenta eficiência de 72% e a turbina hélice com regulação do distribuidor tem eficiência de 65%.

iii) Influência da potência da PCH sobre os resultados econômicos:

Simularam-se as bacias para $P_2/P_1=1,00$, obtendo-se os melhores resultados técnico-econômicos para potências superiores a 1MW com o uso de turbinas semi-Kaplan. A rentabilidade do investimento pode atingir o valor de 95% para PCHs com potências de

30MW e turbinas semi-Kaplan. O período de retorno mínimo é de cinco anos. Para PCHs com potências inferiores a 120 kW, a rentabilidade é negativa, e nesse caso, para minimizar custos, pode ser conveniente optar por turbinas com regulagem apenas do distribuidor ou até mesmo sem regulagem, diminuindo assim os investimentos iniciais do empreendimento, visto que o mesmo não terá atratividade empresarial, apenas social.

iv) Influência do tipo de regulagem sobre a rentabilidade da PCH:

As rentabilidades de PCHs com turbinas semi-Kaplan são superiores às decorrentes do uso de turbinas Kaplan e Hélice, concluindo-se, ser preferível o uso de turbinas semi-Kaplan em PCHs.

v) Influência do aquecimento do mercado sobre o custo de implantação de PCHs:

No estudo dos três cenários verificou-se que a rentabilidade é muito sensível aos custos de implantação da PCH e ao deságio do MWh, verificando-se que, para o mercado aquecido, a rentabilidade será inferior aos 50% recomendados para empreendimentos de longo prazo, constituindo-se, portanto, em um limite para a disputa no mercado de concessões de PCHs no caso estudado.

vi) Para o caso estudado, ou seja, para curva de permanência de vazões e turbinas consideradas, os melhores resultados serão obtidos para PCHs com as seguintes características:

Providas de duas turbinas semi-Kaplan de mesma potência operando em paralelo, com vazão ótima de projeto $Q_{95\%}$, com relação de potências $P2/P1=1,00$. Ainda, quanto maior e mais próxima do limite legal de 30MW, a potência de saída da PCH, melhores resultados econômicos serão obtidos, particularmente se o mercado estiver desaquecido, constituindo-se este, no cenário para esses empreendimentos, com possibilidade de propiciar períodos de retorno de três anos e rentabilidade de até 178%.

vii) Finalmente e muito importante:

A análise de viabilidade técnico-econômica das PCHs deve ser feita a partir das curvas de permanência de vazões, de energia disponível e de energia gerada pelas turbinas, buscando-se a otimização da eficiência energética e dos resultados econômicos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS

6.1 CONCLUSÕES

Esta tese apresentou uma abordagem enriquecedora ao seu tema, seja do ponto de vista hidrológico, seja do ponto de vista da geração hidrelétrica, fornecendo ferramentas de análise consistentes com a disponibilidade de dados e a realidade amazônica. A Amazônia além de sua relevância econômica para o Brasil, desperta interesse de outras nações por sua importância atual e futura em escala mundial. Portanto, devido a esse valor estratégico, é importante e necessário, que os alocadores públicos de recursos, os formuladores e os executores da política pública brasileira de energia, fortaleçam a participação das PCHs na matriz energética nacional, através delas, provendo eletricidade a comunidades isoladas da Amazônia e fortalecendo a cidadania dos brasileiros nelas residentes.

No contexto hidrológico, o MSV é um modelo não-linear simples, que representa bem o fenômeno chuva-vazão, contemplando a não-linearidade decorrente da infiltração e da evaporação, mostrando-se adequado à realidade dos dados disponíveis das pequenas bacias da Amazônia, em sua maioria dados de chuva. A aplicação do mesmo, na bacia teste, mostrou-se promissora, com resultados para a curva de permanência de vazões simuladas significativamente próximos aos da curva das vazões de permanência observada, fornecendo resultados aplicáveis aos projetos de PCHs na Amazônia.

Com relação aos aspectos técnicos e econômicos do uso de arranjos de duas turbinas axiais, observa-se que PCHs providas de turbinas Kaplan apresentaram a melhor eficiência energética, de 80%; enquanto que, turbinas semi-Kaplan apresentaram eficiência de 72%; e

turbinas hélice de distribuidor regulável têm eficiência de 65%. A melhor relação de potência das turbinas é $P_2/P_1 = 1,00$.

Foram elaborados três cenários de mercado: aquecido, com elevação de custos de implantação em 30%, neutro, e desaquecido, com redução desses custos em 30%. Observou-se que os resultados empresariais são melhores quando há menor competitividade, ou seja, no mercado desaquecido.

Constituem o melhor arranjo e cenário para PCHs, no caso estudado, duas turbinas semi-Kaplan iguais em paralelo, sendo a vazão ótima de projeto de P_1 , $Q_{95\%}$, e nesse caso, quanto maior e mais próximo do limite legal de 30MW for a potência da PCH, melhor, em um mercado desaquecido, portanto com menores custos de investimentos iniciais, propiciando períodos de retorno de cinco anos e rentabilidade de 95%. O grau de aquecimento do mercado determina a viabilidade do empreendimento. Para PCHs com rentabilidade negativa, para minimizar custos, pode ser conveniente optar por turbinas com regulagem apenas do distribuidor ou até mesmo sem regulagem, diminuindo assim os custos do empreendimento, visto que o mesmo não terá atratividade empresarial, apenas social.

6.2 PESQUISAS FUTURAS

A análise econômica efetuada não considera a demanda como externalidade. Sugere-se que esta seja mais bem estabelecida através de estudos futuros, a partir dos dados demográficos e hidrológicos das bacias amazônicas.

Também, sugerem-se para estudos futuros a determinação de custos de implantação de PCHs na Amazônia, haja vista que os custos de BALARIM *et al.* (2000) são relativos a PCHs no centro-sul do Brasil.

Finalmente, sugere-se sejam realizados estudos futuros que contemplem atualizações tecnológicas e econômicas de empreendimentos dessa natureza, além de outras melhorias ao modelo hidrológico proposto e ao estudo técnico-econômico de Pequenas Centrais Hidrelétricas de baixa queda na Amazônia, tema relevante para o uso de recursos naturais da Amazônia, em benefício dos que nela habitam e também do País.

REFERÊNCIAS

- AGENDA 21. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Brasília: Senado Federal, 2001.
- ANAGNOSTOPOULOS, J.S.; PAPANTONIS, D.E., 2007, “*Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant*”, ***Energy Conversion and Management***, v.48, pp. 2663–2670.
- AFGAN, N. H.; CARVALHO, M.G.; HOVANOV, N.V., 2000, “*Energy system assessment with sustainability indicators*”, ***Energy Policy***, v. 28, pp. 603-612.
- AHSAN, M.; O’CONNOR, K.M., 1994, “*A simple non-linear rainfall-runoff model with a variable gain factor*”, ***Journal of hydrology***, v. 155, pp. 151-183.
- ALBUQUERQUE, R.B.F., 2006, *Projeto de Turbinas Hidráulicas Axiais com Parametrização da Geometria, Equação de Equilíbrio Radial e Técnicas de Otimização*. Dissertação de M.Sc., UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil.
- ALBUQUERQUE, R.B.F., MANZANARES-FILHO, N. e OLIVEIRA, W., 2007a, “*Conceptual optimization of axial-flow hydraulic turbines with non-free vortex design*”. ***Proc. IMechE Vol. 221 Part A: J. Power and Energy***.pp.713-724. DOI:10.1243/09576509JPE394.
- ALBUQUERQUE, R.B.F., MANZANARES-FILHO, N. e OLIVEIRA, W., 2007b, “*Performance prediction of axial flow hydraulic turbines and optimal double regulating*”. ***Proceedings of the 19th International Congress of Mechanical Engineering, COBEM-2007***, Brasília, Brasil.
- ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica), 1998. “*Resolução ANEEL 394/98*”. Disponível:<http://www.aneel.gov.br>. Acessado: 03/03/2009.

- ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica), 2003. “*BIG (Banco de Informações em Geração)*”. Disponível: [<http://www.aneel.gov.br>]. Acessado:05/04/2007.
- ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica), 2007, “*Atlas de Energia Elétrica no Brasil*”. Disponível: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>. Acessado: 22/11/2007.
- ARNDT, R.E.A., 1981, “*Fundamentals of hydraulic turbines design*”, ***Renewable Energy Review Journal***, v. 3, n.2, p.25-66.
- ARNDT, R.E.A., 1998, “*Hydraulic Turbines*”. In: *The Handbook of Fluid Dynamics*, USA, CRC Press LLC.
- BALARIM, C.R., TARGA, L.A. e SANT’ANA, R.F., 2000, “*Estimativa de custo para implantação de micro centrais hidrelétricas com potências de 20, 30, 50, 75 e 100 kW*”, ***Energia na Agricultura***, v. 13, n.3, pp. 45-54.
- BARP, A.R.B., MULLER, E.A., 2005, “*Aplicação de um modelo hidrológico chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio Tocantins, na Região Amazônica*”, UNAMA/FIDESA, Belém, PA, Brasil.
- BEZERRA, F.V.V., 2007, *Implantação de centrais geradoras hidrelétricas na Amazônia, uma visão global com ênfase nos aspectos hidrológicos, tecnológicos, ambientais e financeiros*. Dissertação de M.Sc. em Engenharia Mecânica, UFPA, Belém, PA, Brasil.
- BIRUEL JR, J., 1999, *Predição das características de desempenho de turbinas hidráulicas axiais*. Trabalho de Diploma, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil.
- BLANCO, C.J.C., SECRETAN, Y., FAVRE, A.C., 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***, v.32, pp.803-811.

- BLANCO, C. J. C. ; SECRETAN, Y. ; MESQUITA, A. L. A., 2008, “*Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective*”, ***Energy Sustainable Development***, v. XII, p. 25-33.
- BP Statistical Review. Disponível: <http://www.bp.com>. Acessado: 15/10/2007.
- CERPCH - Centro Nacional de Referencia em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Disponível: <http://www.cerpch.unifei.edu.br>. Acessado: 26/08/2009.
- CLARK, C.O., 1945, “*Storage and the unity hydrograph*”, ***Trans ASCE***, 110.
- CONSTITUIÇÃO FEDERAL DO BRASIL (CF), 1988. Editora do Senado Federal, Brasília, DF, Brasil.
- CRUZ, A. G. B. ; MESQUITA, A. L. A.; BLANCO, C. J. C., 2008, “*Minimum pressure coefficient criterion applied in axial-flow hydraulic turbines*”, ***J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.***, Rio de Janeiro, v. XXX, n.1, Mar.2008, p. 30-38.
- DOI: 10.1590/S1678-58782008000100005.
- DUARTE, A.R.C.L., 2009, *Análise de parâmetros de sustentabilidade para geração de energia elétrica com óleo vegetal em comunidades isoladas na Amazônia*. Tese de D.Sc. em Engenharia Elétrica, UFPA, Belém, PA, Brasil.
- DUARTE, A.R.C.L., BEZERRA, U.H, TOSTES, M.E.L., DUARTE. A.M., ROCHA FILHO, G.N., 2010, “*A proposal of electrical power supply to Brazilian Amazon remote communities*”, ***Biomass and bioenergy***, Science Direct, v.34, n.9, Sep. 2010, p. 1314-1320.
- EIA (Energy International Agency), 2007. *Energy Consumption / inhabitant*. Disponível: <http://www.eia.doe.gov>. Acessado em abril de 2007.

- ELETROBRAS, 2002, *Diretrizes para projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível: <http://www.eletrobras.gov.br/>. Acessado em novembro de 2008.
- Energy & Enviro, 2005. Newsletter. Disponível: http://www.energy-enviro.fi/images/newsletter/2_2005/10_tjusterbybig.jpg. Acessado: 15/10/2007.
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2006, *Balanco Energético Nacional 2006: Ano base 2005*. EPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ESHA (European Small Hydropower Association), 2004a, *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. Brussels, Belgium. Disponível: <http://www.esha.be>. Acessado: 17/04/2010.
- ESHA (European Small Hydropower Association), 2004b, *State of the art of small hydropower in EU - 25 Guide*. Brussels, Belgium. Disponível: <http://www.esha.be>. Acessado: 17/04/2010.
- FULFORD, D. J.; MOSLEY, P.; GILL, A.; 2000, “*Field Report. Recommendations on the use of micro-hydro power in rural development*”, Journal of International Development. v.12, pp. 975-983.
- GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L.D., 2003, *Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento*. Tradução de André Koch. 2ª ed. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- HARGREAVES, A.M., 2004, *A contribuição da energia nuclear no cumprimento das metas de desenvolvimento do milênio*. Dissertação de MSc. IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- HINDLEY, M., 1996, “*Buoyant year for turbines*”, *International Water Power & Dam Construction*, February, pp. 29.

- HIRSCHFELD, H. 1989, *Engenharia econômica e análise de custos*. 4.a ed. Editora Atlas, São Paulo, SP, Brasil.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). *Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil (Atlas IDH2000)*. Disponível: <http://www.ibge.gov.br>. Acessado: 10/04/2007.
- IPEA, 2005, *Objetivos de Desenvolvimento do Milênio – Relatório nacional de acompanhamento*. IPEA, Brasília, Brasil.
- JAKEMAN, A.J. e HORNBERGER, G.M., 1993, “*How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model*”, *Water Resources Research*, v.29, n.8, pp. 2637-2649.
- JUN, X., 2001, “*A system approach of real-time hydrological forecasting applied to a catchment basin*”, *International Workshop on non-structural measures for water management problems*, London, Canada, October 2001.
- KACHROO, R.K. e NATALE, L., 1992a, “*Non-linear modelling of the rainfall-runoff transformation*”, *Journal of hydrology*, v.135, pp. 341-369.
- KACHROO, R.K., 1992b, “*River flow forecasting. Part 1.A discussion of the principles*”, *Journal of hydrology*, v.133, pp. 1-15.
- KACHROO, R.K. & LIANG, G.C., 1992c, “*River flow forecasting.Part 2.A discussion of the principles*”, *Journal of hydrology*, v.133, pp. 17-40.
- KALDELLIS, J.K., VLACHOU, D.S. & KORBAKIS, G., 2005, “*Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis*”, *Energy Policy*, v.33, pp. 1969-1985.
- LABAT, R.A. e MANGIN,A., 2000, “*Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analyses*”, *Journal of hydrology*, v.238, pp. 123-148.

- MELLO JR, A. G., 2009, Notas de aula da Disciplina Máquinas II do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Presbiteriana Mackenzie. CAPÍTULO 3 - Tipos de turbinas hidráulicas aplicadas às pequenas, mini e microcentrais hidráulicas. São Paulo: 2006. Disponível: <http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%20E1ulicas/CAP%20TULO%203REV.htm>. Acessado: 25/08/2009.
- MESQUITA, A. L. A., BLANCO, C. J. C. e LOBATO, R. V., 1999, *Levantamento do potencial energético para a implantação de mini centrais hidrelétricas na região da Calha Norte, Estado do Pará*. Relatório Final do projeto FUNTEC 115-00/97, 55p.
- ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), 2007. *Sistema de Transmissão Horizonte 2007- 2009*. Disponível: <http://www.ons.org.br>. Acessado: 22/11/2007.
- PAISH, O., 2002, “*Small hydro power: technology and current status*”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v.6, pp. 537-556.
- PATUSCO, J.A.M., 1998. *Nota Técnica do Coordenador Geral de Estudos Integrados do Ministério das Minas e Energia (MME) nº 01 /98 de 22/09/98. Assunto: Eletricidade no Balanço Energético Nacional (BEN)*. Disponível: <http://ecen.com/eee11/eletrben.htm>. Acessado: 12/03/2009.
- PAZ, L.R.L.; SILVA, N.F. e ROSA, L.P.R.; 2007, “*The paradigm of sustainability in the Brazilian energy sector*”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v.11, pp. 1558-1570.
- RIBEIRO NETO, A.; SILVA, R.C.V.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, E.M.; 2008, “*Simulação na Bacia Amazônica com Dados Limitados: Rio Madeira*”, ***Revista Brasileira de Recurso Hídricos***, v.13 n.3, pp. 47-58.
- SHERMAN, L.K., 1932, “*Stream flow from rainfall by the unity hydrograph method*”, ***Engineering News Record***, v.108, pp. 501-505.

TUCCI, C.E.M., 2005, *Modelo hidrológicos*. ABRH Editora da UFRGS. 2ª Ed., Porto Alegre, RS, Brasil.

UN (United Nations), 2007. *Millennium Indicators Database*. Department of Economic and Social Affairs, Statistics Division, New York. Disponível:<http://mdgs.un.org>. Acessado: 03/04/2007.

WOLMAN, A., 1977, *O Metabolismo das Cidades*. In: CIDADES: A Urbanização da Humanidade. Zahar, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

WORLD BANK, 2007, *WDI (World Development Indicators)*. Disponível: <http://web.worldbank.org>. Acessado: 03/04/2007.