

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA

NOVAS TENDÊNCIAS NOS ESTUDOS DE
POTENCIAIS HIDRELÉTRICOS:
METODOLOGIA DE PROSPECÇÃO E
ANÁLISE DE APROVEITAMENTOS COM
BASE EM SISTEMA DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA - SIG

Adriana Santos Peixoto Corrêa

Itajubá, 17 de Dezembro de 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA

Adriana Santos Peixoto Corrêa

NOVAS TENDÊNCIAS NOS ESTUDOS DE
POTENCIAIS HIDRELÉTRICOS: METODOLOGIA
DE PROSPECÇÃO E ANÁLISE DE
APROVEITAMENTOS COM BASE EM SISTEMA
DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA - SIG

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

Área de Concentração: Planejamento Energético

Orientador: Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

17 de Dezembro de 2008

Itajubá – MG

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos (Orientador)

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva (Co-orientador)

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Prof. Dr. Fernando Falco Pruski

Universidade Federal de Viçosa - UFV

*A única coisa nesse mundo que aumenta
quando repartimos é o conhecimento....*

Dedicatória

A Deus, que me deu força e sabedoria durante todo percurso deste trabalho e esteve do meu lado nos momentos mais difíceis, incentivando-me a seguir em frente.

Ao meu esposo Reinaldo, a toda minha família e amigos, que sempre me apoiaram com orgulho. A eles, minha homenagem, meu amor e gratidão.

*“Uns são professores, poucos são mestres.
Aos primeiros, escuta-se; aos segundos,
respeita-se e segue-se.”*

Agradecimentos

Ao meu orientador, mestre e grande amigo Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos, a quem admiro e respeito pela sabedoria, paciência e compromisso em todas as etapas de minha formação. Um agradecimento especial pelas lições, as quais contribuíram imensamente para o meu crescimento profissional e pessoal.

Por todas as valiosas e “mirabolantes idéias”, pela amizade, pela parceria, pela orientação e confiança, meu eterno agradecimento, companheirismo e cumplicidade.

Ao co-orientador Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva, meu agradecimento pelo tempo dedicado, paciência, incentivo e valiosa co-orientação científica, devo grande parte desse trabalho aos seus conselhos.

Aos meus amigos de toda vida, Carol, Yasmine, Dani, Thiaguinho e Marlene, aos amigos e parceiros da iX Consultoria, Benedito, Leopoldo, Ricardinho, Fábio, Alexandre, um agradecimento especial pela amizade, apoio, incentivo, paciência e companheirismo.

Aos amigos e professores do EXCEN, Jamil Haddad, Roberto Akira, Edison Bortoni, Erick Azevedo, Lucia Garrido e Marcos Dias, que participaram dessa trajetória, colaborando com toda a amizade, experiência e conhecimento, minha eterna gratidão.

Ao Reinaldo, meu marido por toda amizade e amor, agradeço por estar ao meu lado nos momentos bons e ruins da conclusão desta tese.

Resumo

O Brasil possui demanda crescente por energia elétrica, e a oferta deste recurso, vem crescente junto aos investimentos no setor nos últimos anos. O mercado apresenta um aquecimento, especialmente no tocante aos estudos para implantação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).

Como conseqüência do cenário atual de aumento da demanda por energia elétrica e dos investimentos no setor, vários estudos vêm sendo desenvolvidos. Estudos estes que têm a finalidade de auxiliar a tomada de decisão desde as etapas iniciais de busca de potenciais, às fases finais de implantação dos aproveitamentos.

Em etapas preliminares de estudos de potenciais, prospecções são executadas, e atualmente têm-se enfrentado dificuldades nesta atividade, visto tratar-se de um trabalho extenso e dispendioso, tanto em tempo quanto em investimento.

Frente às dificuldades de busca de novos potenciais hidrelétricos, a presente dissertação de mestrado, propõe um modelo de prospecção de potenciais hidrelétricos que se fundamenta em SIG - Ferramentas de Sistema de Informações Geográficas, com o propósito de auxiliar na tomada de decisão, e proporcionar agilidade e eficácia nos resultados.

O modelo proposto foi aplicado à bacia do rio Grande e ao rio Sapucaí. Os resultados obtidos mostram que além de localizar espacialmente as potências calculadas no curso d'água, a metodologia gera informações do tipo de arranjo, do comprimento do reservatório e do desvio do rio, e uma análise preliminar do tipo de máquina hidráulica que melhor se adequa ao aproveitamento identificado.

Abstract

Brazil has increasing demand for electric energy, the offer of this resource growing close to investments in sector during the last years. Today the market shows an increase, specially regarding studies for implantation of small hydro power plants (SHP's).

Several studies are being carried out due to present scenario of electric energy increasing demand and investments in sector as well. These studies aim helping in decision taking from initial stages in search of new potentials through final stages of profits implantation.

In preliminary steps of studies on potential where prospections are performed, several difficulties are found in this activity which is extense and onerous either in time and investment.

In face to difficulties in searching new hydro power potentials, this master science degree thesis proposes a model for prospection of hydro power potentials, based on SIG – Geographic Information Tools, with the purpose of helping in decision taking and to provide efficacy in results.

The proposed model was applied to basin of Grande and Sapucaí Rivers. The model besides providing spatially location of calculated potencies in water running, generates information about sort of arrange, lenght of reservoir and river deviation and a preliminary analysis of the most suitable hydraulic machine if adequate to identified profit, which nowadays available models do not show.

Estrutura da Dissertação

Este trabalho é estruturado em nove Capítulos, sendo o Capítulo 1 introdutório e o Capítulo 2 a apresentação dos objetivos do presente estudo. O Capítulo 3 apresenta o levantamento bibliográfico de temas relevantes à apresentação do modelo de prospecção de potenciais hidrelétricos, subdividindo-se nos seguintes itens:

- Sub-capítulo 3.1 – Classificação dos tipos de PCHs: onde se descreve e classificam-se os tipos de arranjos de centrais hidrelétricas, apontando conceitualmente as principais diferenças.
- Sub-capítulo 3.2 – Tipos de Turbinas: onde se aborda os conceitos de rotação específica de máquinas hidráulicas, bem como se descreve as particularidades dos principais tipos de turbinas.

No Capítulo 4 é desenvolvido o estado da arte do estudo, subdividindo-se em: Sub-capítulo 4.1 – Potencial Hidráulico - Definição e Panorama: Destaca-se o panorama atual do setor elétrico no Brasil.

- Sub-capítulo 4.2 – O cenário atual das PCHs no Brasil: Descreve o desenvolvimento do setor nos últimos anos e enfoca-se os potenciais ainda não explorados no país.
- Sub-capítulo 4.3 – Metodologias de estimativa de potenciais: Neste item descrevem-se as metodologias mais aplicadas na prospecção de potenciais hidrelétricos.
- Sub-capítulo 4.4 – Novas fontes de dados: Descrevem-se as fontes de dados utilizadas no modelo de prospecção do presente estudo, destacando-se as novas fontes de dados que agilizam e garantem a eficácia do modelo.

No Capítulo 5 é desenvolvida a metodologia de cálculo dos potenciais hidráulicos, descrevendo-se passo a passo, os detalhes de aplicação da metodologia.

O Capítulo 6 traz o estudo de caso, subdividindo-se em:

- Sub-capítulo 6.1 – Caracterização da região de estudo: Neste item descreve-se a região onde se aplicou a metodologia.
- Sub-capítulo 6.2 – Aplicação da metodologia no rio Sapucaí: Descreve-se a construção do banco de dados e da base espacial do modelo, bem como a aplicação da metodologia desenvolvida de prospecção de potenciais.

- Sub-capítulo 6.2 – Aplicação da metodologia na Bacia do rio Grande: Descreve-se a aplicação da metodologia desenvolvida, entretanto neste item dá-se o enfoque na consistência do modelo.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados da aplicação do modelo em ambas as áreas de estudo.

No Capítulo 8 apresenta-se as conclusões da aplicação do modelo e as perspectivas futuras desse trabalho.

No Capítulo 9 listam-se as fontes bibliográficas utilizadas no desenvolvimento da presente dissertação.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
3.	PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – CONCEITOS.....	4
3.1.	CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE PCH'S.....	4
3.1.1.	CENTRAIS QUANTO À CAPACIDADE DE REGULARIZAÇÃO.....	4
3.1.2.	SISTEMA DE ADUÇÃO.....	5
3.1.3.	SISTEMA DE OPERAÇÃO.....	5
3.1.4.	QUANTO À POTÊNCIA INSTALADA E À QUEDA DE PROJETO.....	6
3.2.	TIPOS DE TURBINAS E MÉTODOS DE SELEÇÃO.....	10
3.2.1.	ROTAÇÃO ESPECÍFICA.....	11
3.2.2.	TURBINA FRANCIS.....	12
3.2.3.	TURBINA PELTON.....	15
3.2.4.	TURBINAS AXIAIS.....	15
4.	IDENTIFICAÇÃO DE POTÊNCIAS HIDRELÉTRICOS.....	19
4.1.	POTENCIAL HIDRÁULICO – DEFINIÇÃO E PANORAMA.....	19
4.2.	O CENÁRIO ATUAL DAS PCHS NO BRASIL.....	21
4.3.	METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE POTENCIAIS.....	23
4.3.1.	USO DE FERRAMENTAS DE SIG PARA INVENTÁRIO PRELIMINAR DE POTENCIAIS.....	23
4.3.2.	POTENCIAL HIDRELÉTRICO EQUIVALENTE.....	24
4.3.3.	LOCALIZAÇÃO DE POTENCIAL HIDROELÉTRICO – MÉTODO CLÁSSICO.....	27
4.4.	NOVAS FONTES DE DADOS.....	28
4.4.1.	SRTM – CONCEITO E APLICAÇÕES.....	28
4.4.2.	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES.....	31
4.4.3.	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG.....	33
5.	METODOLOGIA.....	34
6.	ESTUDO DE CASO.....	43
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO.....	43
6.2.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO RIO SAPUCAÍ.....	58
6.3.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NA BACIA DO RIO GRANDE.....	61
7.	RESULTADOS.....	63
7.1.	RIO SAPUCAÍ.....	63
7.2.	BACIA DO RIO GRANDE.....	72
8.	CONCLUSÕES.....	74
9.	BIBLIOGRAFIA.....	76

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema ilustrativo de uma Central de Desvio.....	7
Figura 2: Esquema ilustrativo de uma Central de represamento.....	8
Figura 3: GG da PCH Bortolan em Poços de Caldas.....	9
Figura 4: Corte representativo de central de baixa queda com máquina axial de eixo vertical.....	10
Figura 5: Corte representativo de Centrais de Baixa Queda com máquina poço no circuito hidráulico.....	10
Figura 6: Campo de aplicação das turbinas hidráulicas.....	12
Figura 7: Turbina Francis em perspectiva.....	13
Figura 8: Rotores Francis lenta, normal e rápida.....	14
Figura 9: Arranjo geral típico de casa de força – Turbina Francis Horizontal.....	14
Figura 10: Turbina Pelton em perspectiva.....	15
Figura 11: Turbina Kaplan vista em perspectiva.....	16
Figura 12: Turbina hélice em caixa espiral.....	17
Figura 13: Arranjo geral de casa de força - Turbina Kaplan em S.....	17
Figura 14: Turbina Bulbo em perspectiva.....	18
Figura 15: Turbina Axial em “S”.....	19
Figura 16: Empreendimentos Hidrelétricos em Operação.....	20
Figura 17: Desembolso de financiamentos para o setor de PCHs em Bilhões de Reais.....	21
Figura 19: Perfil do rio da nascente a foz com barramento na foz da bacia.....	25
Figura 20: Perfil do rio da nascente a foz com partição da queda em dois aproveitamentos.....	26
Figura 21: Comportamento da energia (Kzb) em aproveitamentos em cascata em função do número de barramentos (zb). Fonte: Souza, Thiago (2008).	26
Figura 22: Ilustração da Superfície levantada pela missão SRTM (verde) e GTOPO (vermelho).....	29
Figura 23: Esquema da aquisição de dados do SRTM – detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita. Fonte: http://erg.usgs.gov/isb/pubs , acesso em fevereiro de 2008.....	30
Figura 24: Fluxograma metodológico do levantamento de potencial.....	35
Figura 25: Curso d’água e medição de comprimentos e variação de cotas.....	38
Figura 26: Vértices do curso d’água digitalizado.....	39
Figura 27: Esquema do processo de busca do potencial utilizando a janela móvel. ...	40

Figura 28: Cálculo da vazão de projeto.....	41
Figura 29: Localização Geográfica da Área de Estudo.	44
Figura 30: Localização das sedes municipais inseridas na bacia do rio Sapucaí.....	45
Figura 6.1.3: Vias de Acesso da área de estudo.....	46
Figura 31: Área de drenagem da bacia do rio Sapucaí e principais afluentes.....	47
Figura 32: Relevo na bacia do rio Sapucaí.	48
Figura 3.15: Representação das Unidades de Conservação na área de estudo.....	56
Figura 33: Perfil longitudinal do curso d'água e acréscimo de vazão ao longo do mesmo.....	59
Figura 34: Localização da Bacia Hidrográfica do rio Grande.....	61
Figura 35: Potencias no rio Sapucaí utilizando as vazões de jusante nas janelas de 2, 4, 10 e 20 km.....	63
Figura 36: Potencias no rio Sapucaí utilizando as vazões de montante nas janelas de 2, 4, 10 e 20 km.....	64
Figura 37: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 2 km e vazão de montante.....	65
Figura 38: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 2 km e vazão de jusante.....	65
Figura 39: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 4 km e vazão de montante.....	66
Figura 40: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 4 km e vazão de jusante.....	66
Figura 41: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 10 km e vazão de montante.....	67
Figura 42: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 10 km e vazão de jusante.....	67
Figura 43: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 20 km e vazão de montante.....	68
Figura 44: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 20 km e vazão de jusante.....	68
Figura 45: Partição de queda inicial no rio Sapucaí.....	69
Figura 46: Variável ambiental e a seleção dos potenciais hidrelétricos no rio Sapucaí.....	70
Figura 47: Iqh ao longo do rio Sapucaí.....	71
Figura 48: Resultado da aplicação do modelo e comparação com as centrais hidrelétricas existentes.....	73

Lista de Tabelas

Tabela 1: Classificação das PCHs quanto à potência e quanto à queda de projeto.....	6
Tabela 2: Classificação das Centrais quanto à queda.	8
Tabela 3: Inventários e Projetos Básicos de PCHs registrados e em andamento na ANEEL.....	21
Tabela 4: Situação geral das PCHs no Brasil em kW	22
Tabela 5: Estimativa de potencial teórico, em kw	22
Tabela 6: Dados Demográficos, Econômicos e Sociais dos Municípios.....	49
Tabela 7: Índice de Desenvolvimento Humano – Municipal, 1991 e 2000.	51
Tabela 9: Características dos potenciais identificados preliminarmente no rio Sapucaí.	70

Lista de Abreviaturas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASI - *Italian Space Agency*

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CESP - Companhia Energética de São Paulo

CERPCH - Centro Nacional de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas

DLR - <http://www.nasa.gov/> *German Aerospace Center*

GPS – *Global Positioning System*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH - Índice de Desenvolvimento Humano

MDT ou DEM - Modelo Digital de Terreno

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

PIB - Produto Interno Bruto

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

SGH – Superintendência de Gestão e Estudos Hidroenergéticos

TVR – Trecho de Vazão Reduzida

UHE – Central Hidrelétrica com potência acima de 30 MW

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

Lista de Símbolos

P – Potência

H- – Altura de Queda Líquida

NM – Nível de Montante

NJ – Nível de Jusante

Q – Vazão

HB – Queda Bruta

g – Aceleração da Gravidade

D - Diâmetro

n – Rotação da Turbina

Pel – Potência Elétrica

nqa – Rotação Específica no Sistema Internacional

ρ – Massa Específica da Água

η_T – Rendimento da Turbina

η_G – Rendimento do Gerador

\bar{Q} – Vazão Média

μ CH – Micro Central Hidrelétrica

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

Qmlt – Vazão Média de Longo Termo

UHE – Usina Hidroelétrica

AD – Área de Drenagem

1. INTRODUÇÃO

Energia é uma das principais preocupações mundiais, é o vetor de desenvolvimento responsável pelo crescimento e manutenção da economia dos países. O Brasil está inserido neste contexto, possuindo demanda crescente por energia elétrica. O consumo de energia per capita no Brasil quadruplicou desde 1970, de 491 kW para 2.242 kW atualmente.

Num ritmo menor ao da demanda, porém também crescente, os investimentos no setor elétrico nos últimos anos apresentam um aquecimento, especialmente no tocante às Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).

Segundo Thiago Filho (2006), estima-se que o potencial hidrelétrico teórico ainda não inventariado no Brasil aproxima-se dos 15,5 GW, que somado ao potencial conhecido e a ser explorado de 10,4 GW, resulta em um potencial total de 25,9 GW, ou seja, algo em torno de 10% do potencial hídrico nacional, que é estimado em 260 GW.

Como conseqüência do cenário atual de aumento da demanda por energia elétrica e dos investimentos no setor, vários estudos vêm sendo desenvolvidos. Estudos estes que têm a finalidade de auxiliar a tomada de decisão desde as etapas iniciais de busca de potenciais, às fases finais de implantação dos aproveitamentos.

Das diversas etapas de registro de um estudo na ANEEL, o inventário é um dos estudos que mais exigem eficácia e rapidez nos resultados, no tocante à definição da partição de queda existente em um curso d'água.

Mesmo em etapas anteriores ao inventário de um determinado rio ou bacia hidrográfica, estudos de prospecção de potenciais hidrelétricos são executados, e atualmente têm-se enfrentado dificuldades nesta atividade.

Trata-se de um trabalho extenso e dispendioso, tanto em tempo quanto em investimento, já que o método clássico utilizado na prospecção baseia-se em longas campanhas de campo fundamentadas em estudos de cartas topográficas.

O uso deste tipo de material muitas vezes pode mascarar o verdadeiro potencial do rio, pois são poucos os locais do Brasil onde se dispõe de cartas com escalas adequadas que, realmente, indiquem os pequenos e médios potenciais.

Outro problema comum é a falsa existência de um aproveitamento, onde em estudo de escritório identifica-se uma potência e em campo o mesmo potencial não é compatível chegando muitas vezes a ser inexistente.

Frente a estas dificuldades a presente dissertação de mestrado, propõe um modelo de prospecção de potenciais hidrelétricos que se fundamenta em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), com o propósito de auxiliar na tomada de decisão e proporcionar agilidade e eficácia nos resultados.

A ferramenta proposta utiliza novas fontes de dados como é o caso do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), que é um modelo digital de terreno disponível para todo o Brasil.

A base espacial do modelo integrada ao equacionamento desenvolvido é o que garante a inovação da ferramenta, pois além de identificar e localizar o potencial hidráulico do rio, o modelo por si só disponibiliza informações de fundamental importância à viabilidade do empreendimento.

Ao prospectar o potencial de um determinado rio ou região, verifica-se além da potência, informações do tipo de arranjo, do comprimento do reservatório e do desvio do rio, e uma análise preliminar do tipo de máquina hidráulica que melhor se adequa ao aproveitamento identificado.

Nos capítulos, seguem conceitos relacionados às centrais hidrelétricas e às ferramentas de SIG são expostas, com vistas a favorecer o entendimento do modelo proposto.

2. OBJETIVOS

O objetivo do presente estudo é desenvolver uma ferramenta para avaliação e prospecção de potenciais hidrelétricos, levando em conta novas fontes de dados de sensoriamento remoto e ferramentas de SIG.

O objetivo específico do presente estudo é implementar uma metodologia que contemple os seguintes itens:

- Desenvolver metodologia de levantamento cálculo de potencial hidrelétrico, que localize e identifique as principais características do aproveitamento;
- Identificação preliminar do tipo de máquina hidráulica mais adequada a cada potencial identificado no rio;
- Espacialização das informações de potencia e integração ao banco de dados ambiental, contendo informações de áreas restritas à implantação dos potenciais identificados inicialmente;
- Determinação da partição de queda ótimo do rio.

3. PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – CONCEITOS

Na metodologia de prospecção de potenciais hidrelétricos apresentada nos capítulos seguintes, aplica-se os conceitos relacionados aos tipos de centrais hidrelétricas, aos tipos de máquinas hidráulicas, às técnicas de geoprocessamento de dados e estudos hidrológicos, o que motiva a composição do presente capítulo. Descrevem-se em cada item, os conceitos básicos relacionados às centrais hidrelétricas, apontando de forma sucinta, suas principais características.

3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE PCH'S

A Lei nº 9.648, de 27/05/98, autoriza a dispensa de licitações para empreendimentos hidrelétricos de até 30 MW de potência instalada para Auto produtor e Produtor Independente. A concessão será outorgada mediante autorização, até esse limite de potência, desde que os empreendimentos mantenham as características de Pequena Central Hidrelétrica (ELETROBRÁS, 1997).

Em geral, as PCHs podem ser classificadas conforme a sua regularização, quanto ao sistema de adução, operação e quanto à potência instalada e queda de projeto.

3.1.1. Centrais quanto à capacidade de regularização

Quanto à capacidade de regularização, podem ser classificadas como:

- Fio D'água: sendo que esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária à potência a ser instalada para atender à demanda máxima prevista, dispensando estudos de regularização de vazões e barragens normalmente baixas, pois têm a função apenas de desviar a água para o circuito de adução.

Uma central a fio d'água localiza-se em rio perene (com vazão constante durante o ano), onde existam quedas, cascatas ou cachoeiras. É o tipo de aproveitamento

elétrico mais barato, entretanto, só é viável em algumas regiões de África, Ásia, América do Sul e Canadá (Costa *et al.*, 2001).

Algumas centrais a fio de água dispõem de algum armazenamento destinado a compensar eventuais falhas na vazão. Quando existem grandes barragens a montante, que garantam uma vazão perene torna-se possível a construção das centrais por acumulação, combinadas com fio d'água.

- Regularização: esse tipo de PCH é empregado quando as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência. Nesse caso, o reservatório fornecerá o adicional necessário de vazão regularizada. Essa regularização pode ser diária ou mensal, conforme o estudo elaborado. As turbinas trabalham dentro de uma faixa de utilização da água, com o intuito de se manter uma determinada queda.

3.1.2.Sistema de adução

Quanto ao sistema de adução, são considerados dois tipos de PCH:

- Adução em baixa pressão com escoamento livre em canal / alta pressão em conduto forçado;
- Adução em baixa pressão por meio de tubulação / alta pressão em conduto forçado.

3.1.3.Sistema de operação

Quanto ao sistema de operação, existem centrais que são usadas para satisfazer necessidades energéticas repentinas em horários de maior consumo, e que são chamadas horas de ponta ou de pico e as centrais que são caracterizadas pelo funcionamento contínuo e com carga praticamente constante. As que se adaptam melhor a estes requisitos são as de fio d'água.

3.1.4. Quanto à potência instalada e à queda de projeto

As PCHs podem ser ainda classificadas quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação das PCHs quanto à potência e quanto à queda de projeto

Classificação Das centrais	Potência – P (kW)	Queda de projeto – H (m)		
		Baixa	Média	Alta
Micro	$P < 100$	$H < 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
Mini	$100 < P < 1.000$	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
Pequenas	$1.000 < P < 30.000$	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

Fonte: Souza *et al.*, 1999.

De maneira Geral, existem dois tipos básicos de empreendimentos de geração hidrelétrica (Figura 1 e Figura 2), os que formam uma queda artificial e os de queda natural.

Nos empreendimentos que apresentam queda natural, as denominadas central de desvio, são aproveitados os desníveis do trecho do curso d'água para gerar o potencial hidráulico.

Neste caso, a casa de máquinas se localiza afastada da barragem, interligada pelo circuito hidráulico, que desvia a água do rio de seu leito natural, assim a queda é proporcionada, em maior parte, aproveitando-se a queda natural existente no rio.

Nota-se uma enorme redução da área alagada em relação à central de represamento, uma vez que a barragem neste caso não tem mais a função de agregar queda. Entretanto em função do posicionamento do barramento, o Trecho de Vazão Reduzida (TVR) da central de desvio passa a ser fator relevante nos estudos.

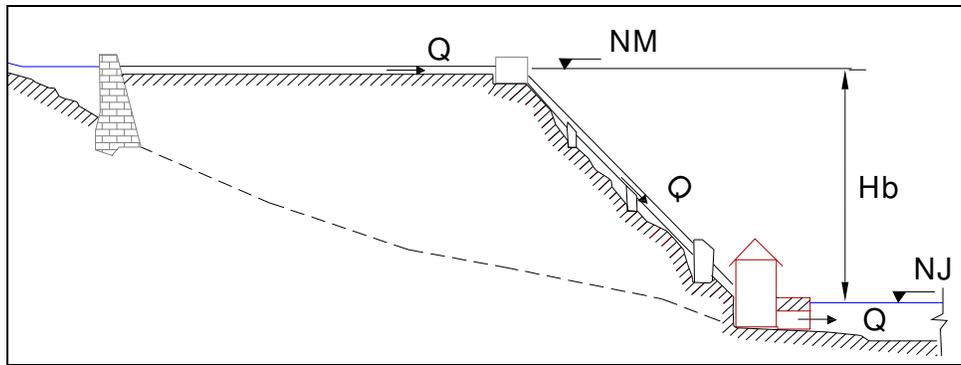


Figura 1: Esquema ilustrativo de uma Central de Desvio.

Fonte: Junior, 2004.

Na Figura 1, verifica-se que uma determinada vazão (Q) é desviada por um sistema de adução, até a casa de máquinas, aproveitando assim toda a queda bruta (H_b) existente entre os níveis de montante e jusante da central (NM e NJ).

O arranjo em desvio é típico para as Pequenas Centrais Hidrelétricas, implantadas nas cabeceiras das bacias hidrográficas, aproveitando-se das quedas naturais desses rios para geração de energia em escala reduzida.

Os empreendimentos hidrelétricos de queda artificial são formados com a construção de barramentos de maiores alturas, e, neste caso, a barragem, vertedor, tomada d'água e casa de força encontram-se integrados, ocupando todo o leito do rio.

Este tipo de empreendimento é denominado como central de represamento ou de baixa queda, em que o potencial é proporcionado por uma queda artificial, ou seja, pela altura da barragem, implicando na formação de grandes áreas de reservatório, dependendo da topografia do local. Em contrapartida o trecho de vazão reduzida é totalmente suprimido.

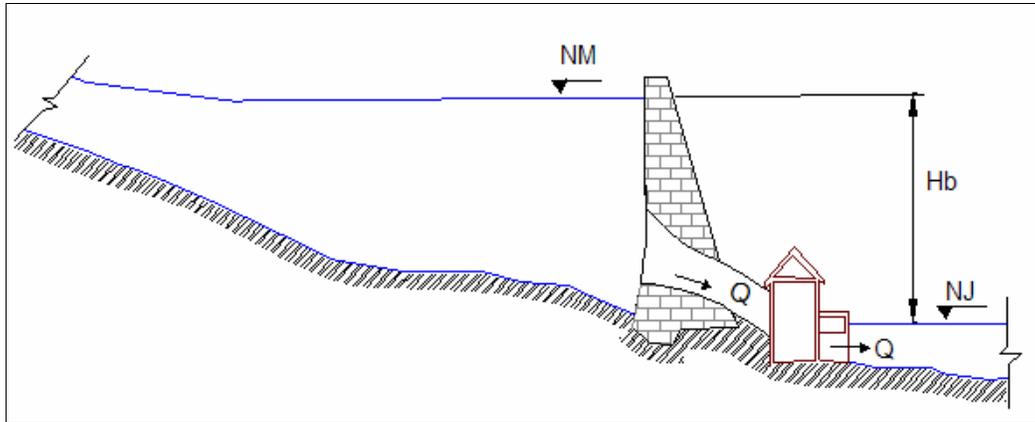


Figura 2: Esquema ilustrativo de uma Central de repesamento.

Fonte: Junior, 2004.

Segundo Souza *et al.* (1999), o conceito clássico de Central Hidrelétrica de Baixa Queda, está vinculado ao seu comportamento em regime transitório, isto é, na variação de características como a frequência, a sobrevelocidade, e a sobrepressão. Os limites para variação da frequência são estabelecidos pelo mercado, os da sobrevelocidade pela atuação do regulador de velocidade e os sobrepressão por custos. Tais considerações estabeleceram os valores da constante – k_a –, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Classificação das Centrais quanto à queda.

Alta Queda	Baixa Queda
$k_a = \frac{v_s \cdot v}{2 \cdot g \cdot H_B} \leq 1$	$k_a = \frac{v_s \cdot v}{2 \cdot g \cdot H_B} > 1$
$v_s = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k_m \cdot \frac{D}{e}}}; \quad v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}; \quad k_m = 0,5 - \text{aço}$	

Fonte: Souza, *et al.*, 1999.

Segundo Souza (1999), com o desenvolvimento e implantação de Centrais Hidrelétricas com Turbinas Hidráulicas Tubulares, este conceito clássico foi complementado tomando-se como limite superior da queda bruta de 30 m, tendo como

principal justificativa que para abaixo desta, o sistema clássico de Grupo Gerador em eixo vertical com espiral e tubo de sucção em cotovelo, apresenta rendimento que pode chegar a ser 6 % menor, além de, por exemplo, haver substancial redução da casa de máquinas.

A Figura 3 mostra o detalhe deste tipo de Central com o eixo à jusante da Turbina Hidráulica e acoplamento direto ao Gerador Elétrico (GE), no caso da PCH Bortolan em Poços de Caldas - Minas Gerais, com um Grupo Gerador (GG) de $P_{el} = 756 \text{ kW}$, $H=12 \text{ m}$, $Q=7 \text{ m}^3/\text{s}$, $n=450 \text{ rpm}$. Aqui a inércia do GG é completada com um volante.

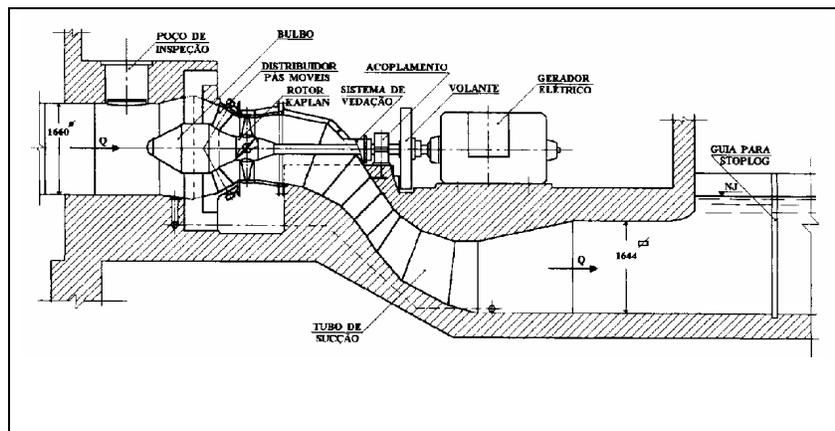


Figura 3: GG da PCH Bortolan em Poços de Caldas.

Uma das primeiras instalações com escoamento axial é representada na Figura 4, e com a Figura 5, podem ser comparados os sistemas típicos de baixa queda e o tradicional.

De uma maneira bastante ampla de construção, pode-se chegar com a configuração de turbina poço, a uma economia na parte civil entre 10 e 18 %, sendo que para quedas de 8 a 10 m a faixa está entre 15 e 25 %. Para quedas maiores, somente estudos comparativos caso a caso, irão indicar se existe ou não economia nesta parte (Souza *et al.*, 1999).

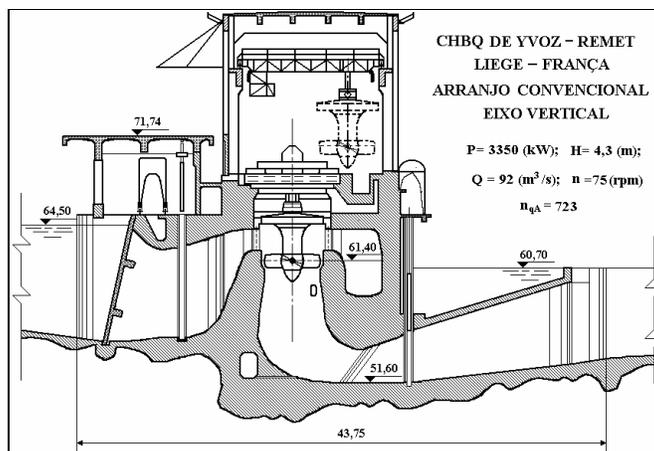


Figura 4: Corte representativo de central de baixa queda com máquina axial de eixo vertical.

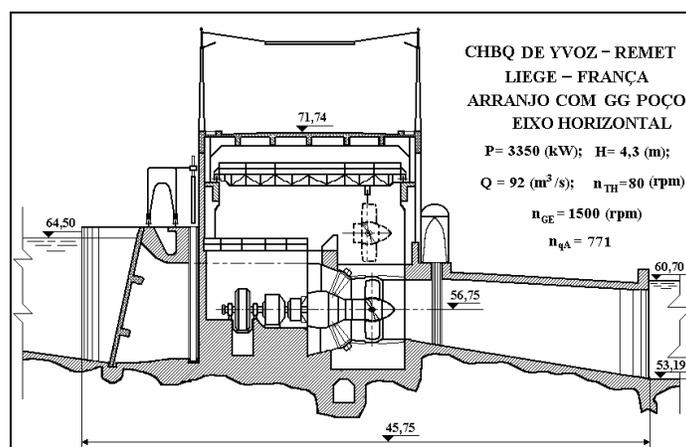


Figura 5: Corte representativo de Centrais de Baixa Queda com máquina poço no circuito hidráulico.

3.2. TIPOS DE TURBINAS E MÉTODOS DE SELEÇÃO

As turbinas Hidráulicas são a parte principal de uma usina hidrelétrica, e é de fundamental importância conhecer os tipos de turbinas existentes para definir qual máquina hidráulica melhor atende as características do aproveitamento.

Na seleção de uma turbina devem ser analisadas questões como cavitação, custos de aquisição e manutenção das mesmas (Souza; Fuchs; Santos, 1983).

Métodos mais sofisticados também são propostos por Filho (2007), que dizem que a escolha dos equipamentos e do número deles também deve levar em consideração aspectos hidrodinâmicos do sistema.

Uma forma de seleção de turbinas hidráulicas é a determinação da rotação específica. Alguns autores como Dias (1997) diz que além do uso da rotação específica devem ser levadas em considerações questões características do escoamento, como por exemplo, a existência de materiais em suspensão.

São muitas as formas de se selecionar turbinas, entretanto na metodologia aqui proposta, adota-se o conceito de rotação específica com o objetivo de verificar preliminarmente, a máquina hidráulica que melhor se adequa aos potenciais identificados, complementando assim, a ferramenta proposta.

3.2.1. Rotação Específica

Segundo Souza *et al.* (1999), a rotação específica de turbinas define o tipo de rotor que melhor atende as características de vazão (Q) e queda (H) de uma turbina. Ela é dada pela equação 1:

$$Nqa = \frac{1000 \cdot n \cdot Q^{1/2}}{(H \cdot g)^{3/4}} \quad (1)$$

Em que:

Nqa – rotação específica no Sistema Internacional [adimensional];

Q – vazão da turbina [m³/s];

H – altura de queda líquida [m];

n – rotação da turbina [rps];

g – aceleração da gravidade.

Na Figura 6 estão representados em função da queda H, os limites da rotação específica Nqa para os diferentes tipos de turbinas hidráulicas.

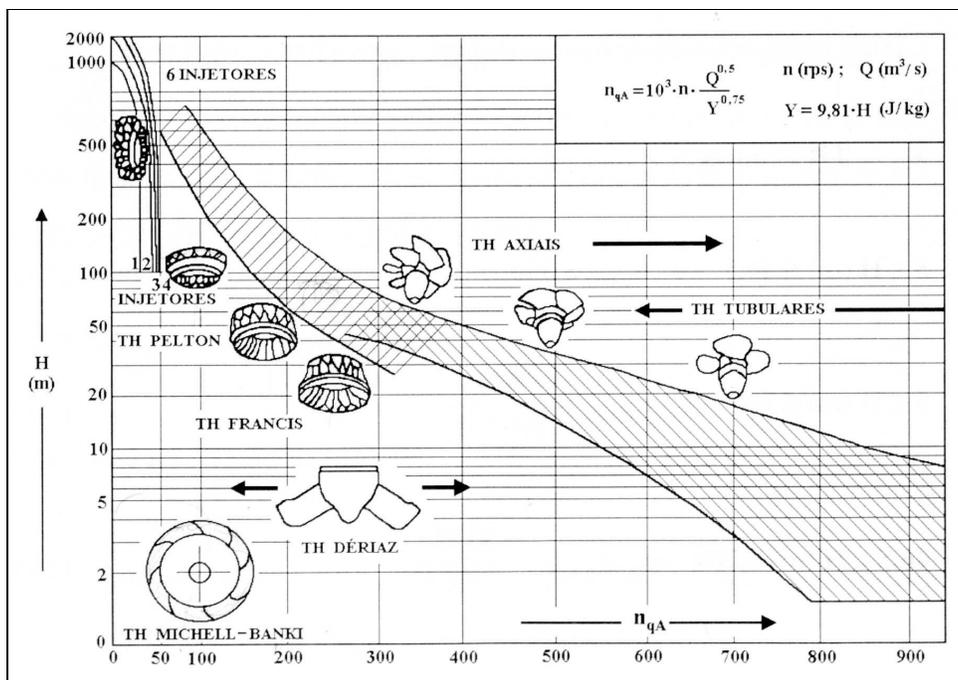


Figura 6: Campo de aplicação das turbinas hidráulicas.

Fonte: Souza *et al.*, 1999.

3.2.2. Turbina Francis

A turbina tipo Francis foi desenvolvida em 1847 pelo engenheiro inglês James Bicheno Francis, quando estava trabalhando nos Estados Unidos. Nessa época, foi incumbido de estudar e projetar uma turbina para o aproveitamento energético do desnível de um rio.

Aproveitando a máquina centrípeta desenvolvida em 1838 por Samuel Dowd, aperfeiçoou-a com um distribuidor de pás móveis cuja função era variar a vazão da turbina. A partir daí, a máquina recebeu o nome de turbina Francis.

As Turbinas Francis são máquinas de reação, com escoamento radial (lenta e normal) e escoamento misto (rápida). São máquinas ideais para médias vazões e quedas. O controle da vazão é realizado no distribuidor ou sistema de pás móveis (Figura 7).

São turbinas rigorosamente centrípetas, e que permitem o uso de um tubo de sucção e podem alcançar altos rendimentos, de 85 a 93%, e é uma das mais utilizadas em mini, pequenas e grandes centrais. Elas podem ser utilizadas inseridas em uma caixa espiral, ou, em instalações de menor porte, sem caixa espiral, em caixas cilíndricas ou em um poço de caixa aberta.

Em instalações com vazões maiores, costuma-se duplicar o rotor em rotores gêmeos, que operam num mesmo eixo, cada uma de um lado de uma caixa cilíndrica ou em caixas espirais separadas, ou unidos pela face anterior, inseridos em uma única caixa espiral. A esse tipo de arranjo, denomina-se turbina Francis gêmea.

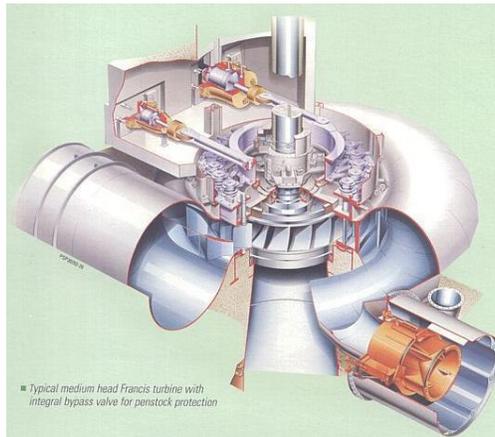


Figura 7: Turbina Francis em perspectiva.

A turbina Francis gêmea é aplicável somente em máquinas com eixo horizontal e tem a velocidade de rotação superior às turbinas com rotor simples e permitem um funcionamento com distribuidor simples, com 40% da vazão nominal.

Este tipo de turbina também pode ser equipado com dois distribuidores, podendo operar com apenas um distribuidor, possibilitando o funcionamento com 20% da vazão nominal.

Na Figura 8 o primeiro rotor, denominado Francis lento, se caracteriza pela baixa rotação específica. Em relação aos outros tipos de máquinas Francis, é a turbina que opera com menos vazão, porém com altura maior.

O segundo tipo de rotor, denominado Francis normal, caracteriza-se pela capacidade de trabalhar com mais vazão e menos altura em relação ao rotor Francis lento. Finalmente, o terceiro tipo de máquina, conhecida como Francis rápida, possui capacidade de operar com vazões maiores, porém com menores alturas, se comparada ao rotor Francis normal.

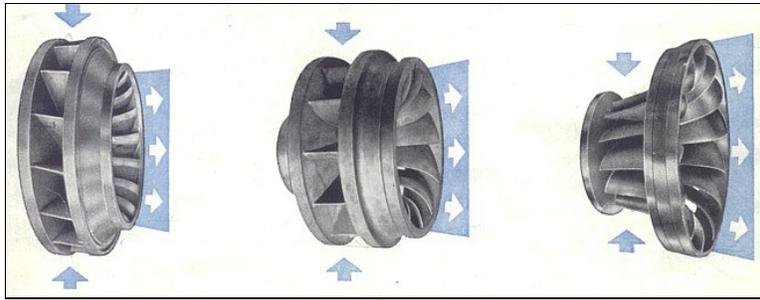


Figura 8: Rotores Francis lenta, normal e rápida.

A turbina Francis gêmea opera com o dobro das vazões, pois tem dois rotores colocados um de costas para o outro. Trabalha com as mesmas alturas de queda dos rotores anteriores, sendo indicada para locais onde se tem uma grande vazão e médias quedas (Figura 9).

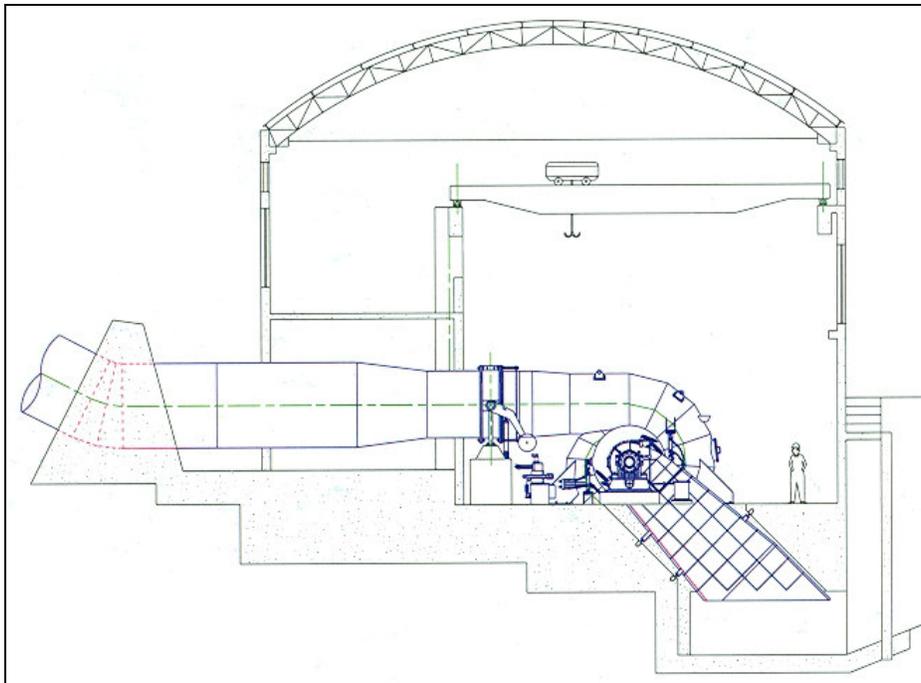


Figura 9: Arranjo geral típico de casa de força – Turbina Francis Horizontal.

3.2.3. Turbina Pelton

As Turbinas Pelton são máquinas de ação e escoamento tangencial. Operam em altas quedas e baixas vazões. Podem ser de um jato, dois, quatro ou seis jatos e podem ser de eixo horizontal ou vertical.

A energia hidráulica é transferida para o rotor pela ação do jato de água que sai do injetor e incide sobre pás bipartidas em forma de cunha. O controle da vazão é realizado na agulha e no injetor. Em PCH utilizam-se turbinas Pelton de no máximo dois jatos (Figura 10).

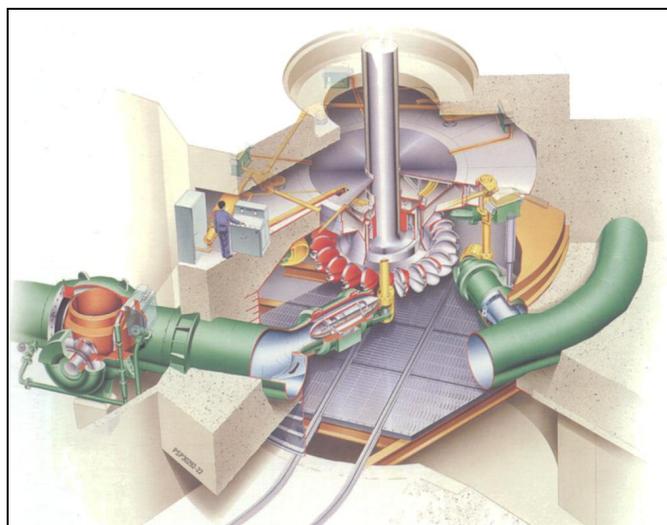


Figura 10: Turbina Pelton em perspectiva.

A turbina Pelton tem um excelente comportamento a cargas parciais, sendo essa uma das justificativas deste tipo de máquina ser amplamente divulgado. Essa turbina foi desenvolvida para suprir a necessidade de construir usinas de altas quedas e baixas vazões, pois as turbinas Francis não operavam bem nessas condições.

3.2.4. Turbinas Axiais

As turbinas axiais são caracterizadas pelo fato do fluxo escoar longitudinalmente ao eixo do rotor. Tais como as turbinas Francis, também são máquinas de reação. São

máquinas que trabalham com baixas quedas e grandes vazões e, basicamente, estão divididas entre dois tipos, denominados Hélice e Kaplan.

A máquina axial foi desenvolvida em 1908 devido à necessidade de se operar em aproveitamentos de baixas quedas. Ela possui as mesmas características da turbina Hélice, exceto pelo fato de haver pás móveis que permitem a regulação da vazão através do rotor e dessa forma, possui dupla regulação. Uma turbina Kaplan e seu respectivo rotor estão ilustrados na Figura 11.

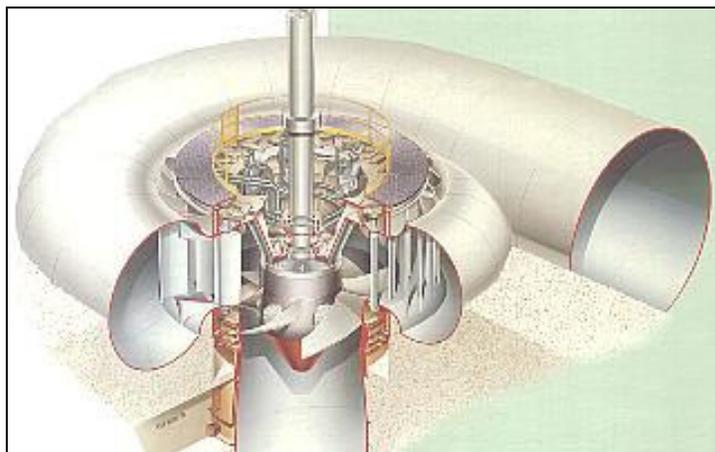


Figura 11: Turbina Kaplan vista em perspectiva.

Em 1912 Victor Kaplan propôs a utilização de um mecanismo para variar a vazão da turbina. Em relação à sua antecessora, ela possui melhor rendimento, mesmo quando há variação da vazão.

Ambas as turbinas podem ser inseridas em uma caixa espiral de concreto ou de aço em caixa aberta, ou em caixa em forma de tubo, onde o escoamento se dá totalmente no sentido axial. Para esse último arranjo, dependendo da configuração do grupo gerador, se dá o nome de turbina tubular, em “S”, sifão ou bulbo.

A Figura 12 e a Figura 13 mostram os diferentes arranjos onde se empregam as turbinas axiais.

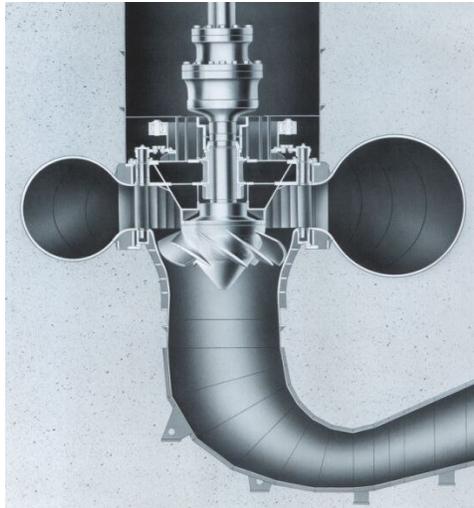


Figura 12: Turbina hélice em caixa espiral.

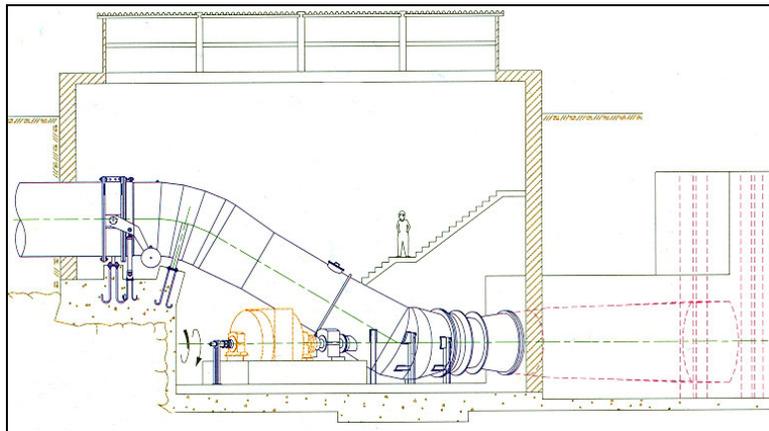


Figura 13: Arranjo geral de casa de força - Turbina Kaplan em S.

A turbina bulbo se caracteriza pelo arranjo compacto, denotado pelo uso do rotor Kaplan, acoplado ao gerador, instalado no interior de um casulo inserido na água, daí o nome “bulbo”.

Para um mesmo diâmetro de rotor, a turbina bulbo absorve uma descarga maior que a Kaplan, resultando daí maior potência a plena carga (Figura 14). É indicada para quedas muito baixas e dispensa a caixa em caracol e o trecho vertical do tubo de sucção.

Durante algum tempo construíram-se turbinas bulbo contendo um conjunto de engrenagens planetárias destinadas a aumentar o número de rotações para o acionamento do alternador. Modernamente, o acoplamento do eixo da turbina ao

alternador realiza-se diretamente. As turbinas bulbo, por poderem funcionar como turbina ou como bomba, têm sido empregadas em usinas maré-motrizes.

Embora seu custo seja mais alto, se comparadas com a Kaplan de eixo vertical, apresentam a vantagem de resultarem em menos obras civis e menores custos de instalação. Entretanto, devido ao seu alto custo, sua aplicação em μ CH e PCH é limitada.

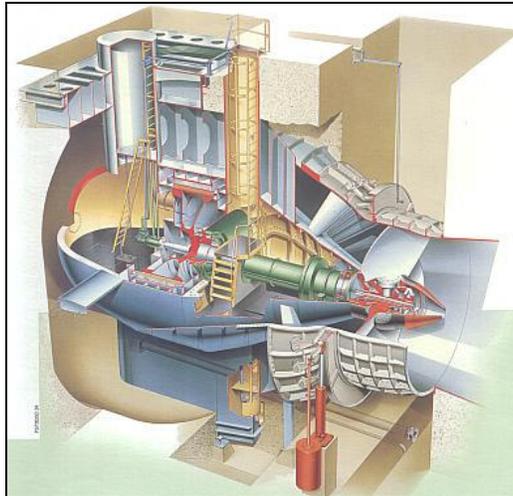


Figura 14: Turbina Bulbo em perspectiva.

Dentro do grupo das turbinas axiais ainda pode-se citar as turbinas tubulares, que são montadas dentro de um tubo que une a tomada de água e o tubo de sucção.

Graças à simplicidade na sua concepção, a turbina tubular é o tipo de turbina axial de menor custo. Normalmente são máquinas de simples regulação, ou seja, rotor com pás fixas e o distribuidor com pás móveis, o casco que contém o rotor é tubular e o eixo é passante, acionando o gerador instalado externamente à turbina. Esse tipo de turbina também pode conter um multiplicador de velocidade interno ao tubo que aciona o gerador, colocado externamente à máquina.

Também indicadas para aproveitamentos de quedas muito baixas, a turbina em "S" se caracteriza pela curva em "S" feita pelo conjunto rotor e distribuidor (Figura 15). Trata-se de uma máquina bastante flexível quanto aos arranjos para instalação e operação, e simplicidades de montagem, acesso e manutenção. Permite que seja construída com o rotor trabalhando a montante ou a jusante, de modo a se ajustar ao arranjo com a posição mais adequada para o gerador.

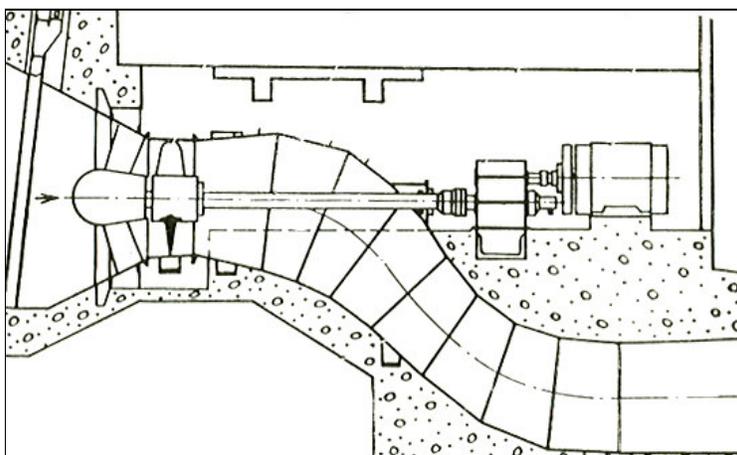


Figura 15: Turbina Axial em “S”.

4. IDENTIFICAÇÃO DE POTÊNCIAS HIDRELÉTRICAS

4.1. POTENCIAL HIDRÁULICO – DEFINIÇÃO E PANORAMA

São variadas as fontes de energia disponíveis, sendo a mais convencional a hidráulica. Este tipo de energia disponível em forma de potencial hidráulico nos rios pode ser transformada em energia elétrica.

O potencial hidráulico é proporcionado pela vazão e pela concentração dos desníveis existentes ao longo de um rio. Isto pode dar-se de uma forma natural, quando o desnível está concentrado numa cachoeira; através de uma barragem, quando pequenos desníveis são concentrados na altura da barragem ou através de desvio do rio de seu leito natural, concentrando-se os pequenos desníveis nesses desvios.

A maior parte dos países desenvolvidos que possuem rios capazes de gerar energia elétrica aproveitam a energia hidráulica para tal finalidade. Na França, praticamente todo o potencial hidráulico foi aproveitado, e nos Estados Unidos cerca de 70% (Clemente, 2001).

No Brasil, o percentual de energia hidráulica explorado é inferior a 30%, e estudos indicam que o potencial hidráulico brasileiro ainda não explorado pode chegar a 260

GW. Deste valor apenas 24% são aproveitáveis, e dos 76% não aproveitáveis, 52% correspondem à região amazônica (www.unicamp.br, 2008).

Segundo Filho (2006), a fonte de energia hidráulica no Brasil encontra-se atualmente representada por três classes distintas de empreendimentos: as Mini Centrais Hidrelétricas – mCHs ($P \leq 1.000$ kW), as Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs ($1.000 \text{ kW} < P \leq 30.000$ kW) e as Usinas Hidrelétricas – UHEs ($P > 30.000$ kW).

A Figura 16 apresenta a potência instalada e respectiva quantidade de empreendimentos hidrelétricos em operação no País.

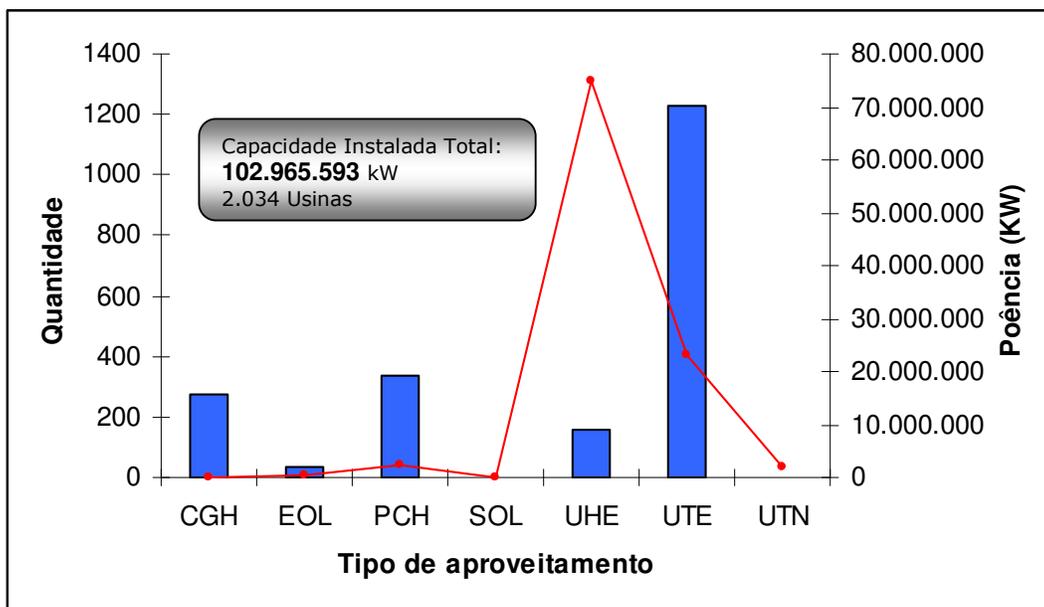


Figura 16: Empreendimentos Hidrelétricos em Operação

Fonte: BIG, acesso em 16 de fevereiro de 2009.

Dentre as três classes, o presente estudo concentra-se nos conceitos e definições ligados às PCHs, como descrito nos capítulos que seguem.

4.2. O CENÁRIO ATUAL DAS PCHS NO BRASIL

As PCHs contribuem atualmente com 1,78% da capacidade total das usinas hidrelétricas em operação, somando aproximadamente 2.5 GW de potência instalada, num total de 320 centrais geradoras.

Dados levantados na ANEEL, mostram que o número de Inventários e Projetos Básicos de PCHs têm crescido, e atualmente cerca de 1.130 estudos encontram-se em fase de análise e aprovação (Tabela 3).

Tabela 3: Inventários e Projetos Básicos de PCHs registrados e em andamento na ANEEL

		Qtde	Potência (MW)
Estudo de Inventário	Em elaboração	37	-
	Em aceite	18	768
	Em análise	80	2031
	Disponíveis	479	2621
Projeto Básico	Em registro	220	1515
	Em aceite	35	331
	Em análise	258	3233

Fonte: ANEEL – Relatório SGH – Março de 2008.

Seguindo esta mesma tendência, verificou-se que os financiamentos neste setor sofreram um acréscimo de 40% em sete anos (Figura 17), o que comprova a boa fase do mercado de PCHs no Brasil.

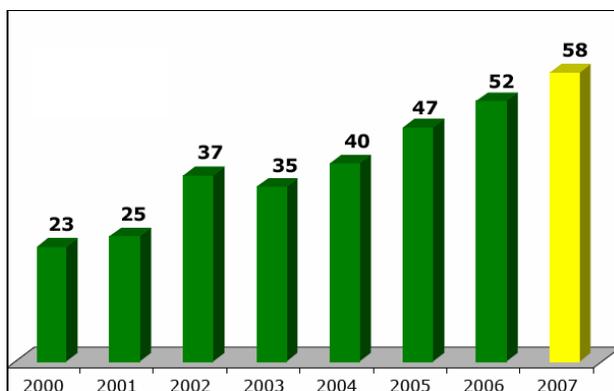


Figura 17: Desembolso de financiamentos para o setor de PCHs em Bilhões de Reais.

Fonte: www.bndes.gov.br, outubro de 2007.

Dados da ANEEL (Tabela 4) mostram que do potencial residual adequado à implantação de PCH conhecido no país, cerca de 11.800 MW, apenas 1.329 MW já foram explorados, ou seja, algo em torno de 10% do potencial hídrico nacional que é estimado em 260 000 MW.

Tabela 4: Situação geral das PCHs no Brasil em kW

Situação	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul	Total
<i>Em operação</i>	76.023	37.353	283.310	583.134	350.090	1.329.900
Com autorização e com LI	237.100	66.800	1.043.040	532.820	567.753	2.447.513
Com autorização e sem LI	7.500	56.300	158.413	794.592	456.094	1.472.899
Com projeto em análise na ANEEL	63.800	35.500	283.500	430.420	486.970	1.300.190
Com Projetos em elaboração (registro)	75.500	25.500	155.720	315.560	180.510	752.790
Inventariados - Disponíveis	388.700	521.590	1.167.190	1.201.460	1.207.580	4.486.520
Total	848.623	743.043	3.001.288	3.857.986	3.248.997	11.789.812

Fonte: Banco de Informações de Geração da ANEEL – janeiro de 2007.

Estudos desenvolvidos no Centro Nacional de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas – CERPCH resultaram nas seguintes estimativas: o potencial teórico estimado ainda não inventariado no Brasil aproxima-se de 15.500 MW, que somado ao potencial conhecido ainda a ser explorado, 10.400 MW resulta em um potencial total de 25.900 MW (Tabela 5), ou seja, algo em torno de 10% do potencial hídrico nacional que é estimado em 260 000 MW.

Tabela 5: Estimativa de potencial teórico, em kw

	Norte	Nordeste	Centro - Oeste	Sudeste	Sul	BRASIL
Potencial Conhecido	772.600	705.690	2.807.863	3.274.852	2.898.907	10.459.912
Potencial Teórico ²	4.762.560	154.800	3.910.976	3.625.336	2.999.840	15.453.512
Potencial Total	5.535.160	860.490	6.718.839	6.900.188	5.898.747	25.913.424

Fonte: Thiago, 2006.

Apesar do cenário favorável no mercado de PCHs, e da atual disponibilidade de potencial residual conhecido e desconhecido no país, as dificuldades em localizar tais potenciais, têm sido um gargalo aos investimentos no setor, já que os locais de maior aptidão hidroenergética já foram aproveitados, restando em sua maioria, os locais onde as condições energéticas são menos favoráveis, ou seja, aproveitamentos de baixa queda, maiores áreas de inundação e impactos.

Atualmente são poucas as metodologias e estudos que auxiliam no levantamento destes potenciais ainda não conhecidos. Nos itens que seguem, apresentam-se duas metodologias utilizadas na identificação de potenciais hidrelétricos.

4.3. METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE POTENCIAIS

4.3.1. Uso de ferramentas de SIG para inventário preliminar de potenciais

Ávila *et al.* (2007) desenvolveram uma metodologia em ambiente de SIG para determinar as áreas mais propícias para a instalação de pequenas centrais hidrelétricas (PCH).

A determinação do potencial físico para a implantação de PCH deve considerar a conjunção de alguns parâmetros principais: a) estimativa da vazão e b) identificação do desnível topográfico.

Para a aplicação da metodologia é necessário identificar os dados de vazão ao longo do curso d'água levantadas dos estudos de regionalização, e obter a área de contribuição específica a partir de imagem gerada por Modelo Digital de Terreno (MDT).

O aproveitamento das quedas d'água para a implantação de PCH é feito considerando-se duas situações fisiográficas:

- a) o desnível topográfico durante o trajeto do rio, que utilizaria as cascatas naturais;
- b) o desnível topográfico nas margens do rio, que permitem o aproveitamento das áreas com grandes gradientes a partir do desvio do escoamento da água.

Para estas situações, o autor desenvolve-se algoritmos específicos para seu cálculo. O cruzamento destas informações de vazão e o declive médio permitem identificar os

melhores sítios para a implantação de PCHs e analisa a necessidade de desvios do curso d'água.

A metodologia apresentada por Ávila *et al.* (2007), apesar de localizar preliminarmente o potencial hidráulico no rio, possui algumas limitações. Uma delas está relacionada ao uso do MDT, que é gerado a partir da digitalização de cartas topográficas.

Quando a base dos estudos de potencial é fundamentada neste tipo de material, pode-se deparar com certas limitações e dificuldades, como:

- Demora na obtenção dos resultados, especialmente em se tratando de grandes áreas de drenagem;
- Potenciais não identificados em função da escala da carta topográfica, que em determinadas regiões do país, possuem informações somente em escala 1:250.000 ou 1:1.000.000.

4.3.2. Potencial hidrelétrico Equivalente

Estudos desenvolvidos por Souza, Thiago (2008) definem o limite energético aproveitável de um curso d'água, propondo assim, determinar o máximo de potência que, teoricamente, está disponibilizado desde a nascente até a foz do rio.

A modelagem proposta é aplicada em um trecho de um determinado rio, cujo aproveitamento em cascata já se encontra implantado e em operação, de maneira a se verificar a aplicabilidade da metodologia.

Todo o trabalho foi desenvolvido considerando-se que, em uma bacia hidrográfica, o potencial hidráulico é disponibilizado em função dos níveis energéticos existentes entre a seção de montante e a de jusante de um determinado trecho do rio. No limite da bacia hidrográfica, a energia hidráulica será função da diferença de potencial ao longo de todo o trajeto do rio.

Na Figura 18 representa-se a vista em planta e em elevação de um rio, desde a sua nascente (n) até a sua foz (f), com as respectivas altitudes h_n e h_f , cuja diferença de cotas resulta na queda bruta H_{nf} , sendo Q_j a vazão média de longo termo (Q_{mlt}) da seção aleatória j e Q_f a vazão média na foz do rio.

Esquemáticamente na Figura 19, considera-se um único barramento na foz do rio, aproveitando desta forma toda a queda do curso d'água na bacia, e na Figura 20, compara-se para o mesmo trecho, a partição da queda em dois aproveitamentos.

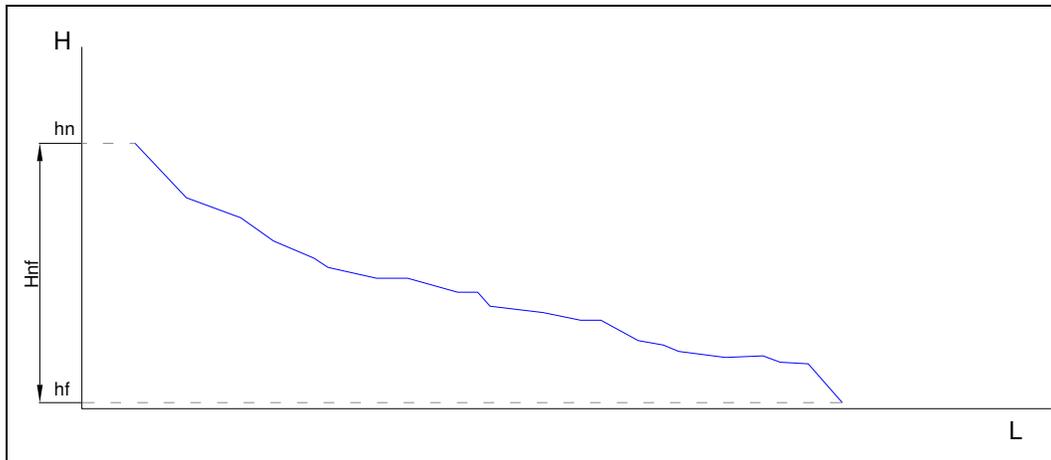


Figura 18: Planta da nascente à foz do rio.

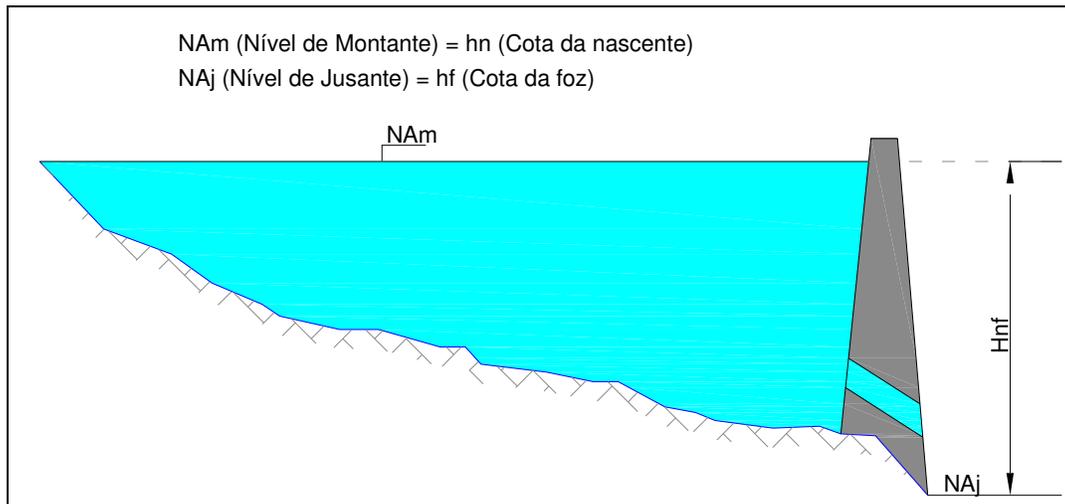


Figura 19: Perfil do rio da nascente a foz com barramento na foz da bacia.

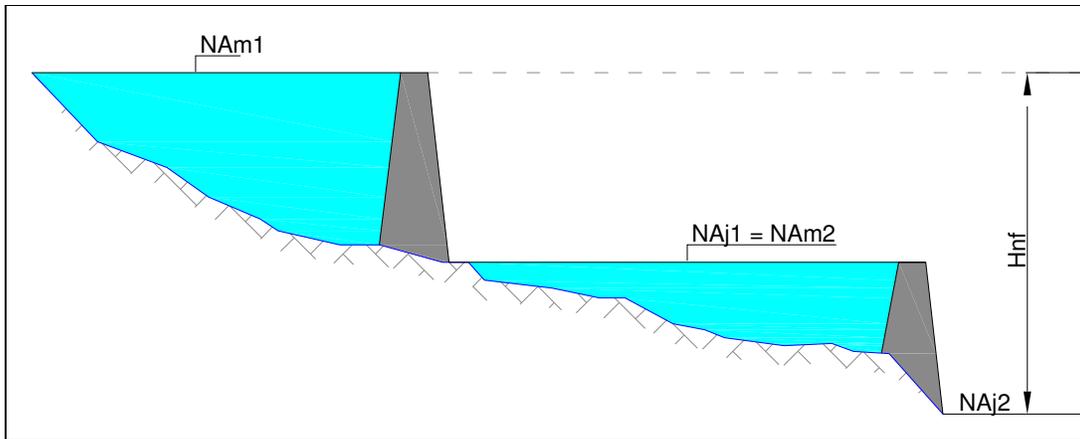


Figura 20: Perfil do rio da nascente a foz com partição da queda em dois aproveitamentos.

Conclui-se com a aplicação desta metodologia que é possível verificar se um determinado curso d'água possui ou não aptidão hidroenergética. Além disso, observa-se que há um decréscimo de energia em aproveitamentos em cascata em função do número de barramentos implantados no rio (Figura 21).

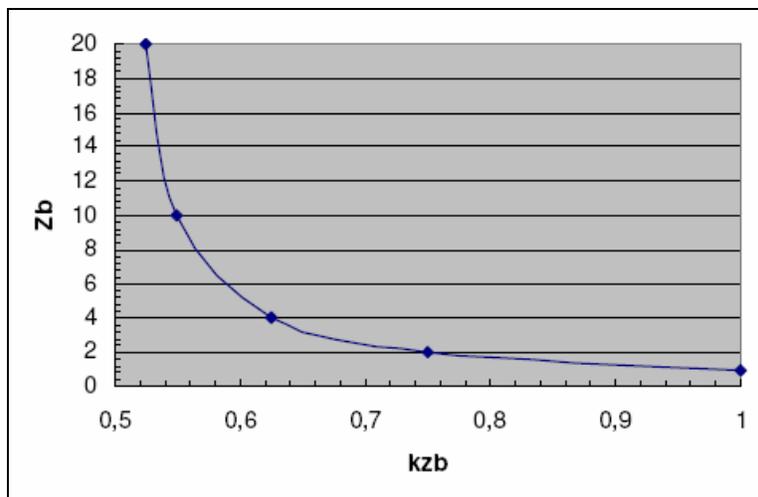


Figura 21: Comportamento da energia (Kzb) em aproveitamentos em cascata em função do número de barramentos (zb). Fonte: Souza, Thiago (2008).

Tal metodologia auxilia no levantamento de rios com aptidão energética, porém não localiza os aproveitamentos no curso d'água, dificultando a tomada de decisão em relação ao particionamento da queda.

A prospecção de potenciais hidroelétricos vai além da existência de quedas no rio, pois variáveis como meio ambiente e socioeconomia, devem ser levadas em conta no momento dos estudos.

Tão importante quanto verificar a aptidão hidroenergética de um rio, é definir a partição de queda do mesmo através da localização dos potenciais ao longo do curso d'água, para que desta forma, seja possível avaliar a existência e viabilidade do potencial de forma consistente, considerando, além das variáveis energéticas, os fatores sócio-econômicos e ambientais.

4.3.3. Localização de Potencial Hidroelétrico – Método clássico

Outra forma utilizada na prospecção de potenciais hidrelétricos é o estudo de cartas topográficas associado às campanhas de campo, onde se verifica a informação levantada nos estudos de escritório.

Apesar da simplicidade da metodologia, sua utilização requer tempo e mão-de-obra disponíveis para os levantamentos. Mas a principal desvantagem da utilização desta metodologia está relacionada aos custos com as longas campanhas de campo, já que é necessário verificar se as informações levantadas nas cartas topográficas são reais.

Experiências realizadas no presente estudo utilizando tal metodologia mostraram que muitas vezes, o potencial existente na carta topográfica não existe, ou possui queda inferior ao levantado em escritório, inviabilizando o aproveitamento inicialmente estudado.

Uma campanha realizada em 19 de Setembro de 2007 no rio Grande, mostra através das informações levantadas com GPS Geodésico que, o potencial de 25 m indicado na carta topográfica, possuía apenas 6 m.

Outra dificuldade de aplicação desta metodologia, é a escala das cartas topográficas existentes, onde, dependendo da região do País, a distância entre as curvas de nível, pode esconder a informação de queda.

Frente a todas estas dificuldades, à limitação das poucas metodologias de prospecção existentes e ao cenário favorável do mercado de energia no Brasil, propõe-se nesta Dissertação de Mestrado o desenvolvimento de uma metodologia que auxilie na tomada de decisão, em relação à prospecção de novos potenciais hidrelétricos.

4.4. NOVAS FONTES DE DADOS

No desenvolvimento e aplicação da metodologia é necessário preparar o banco de dados básicos, cujo objetivo final, é calcular ponto a ponto, as potências ao longo de um determinado curso d'água. Para isso, deve-se efetuar um estudo das vazões para a bacia hidrografia e determinar as variações de queda do rio.

Nos itens que seguem, descrevem-se as fontes e estudos relacionados à formação deste banco de dados, o qual é a base para o desenvolvimento da ferramenta de prospecção de potenciais hidrelétricos proposta no presente estudo.

4.4.1. SRTM – conceito e aplicações

O SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* foi o nome dado a uma missão espacial liderada pela *National Aeronautics and Space Administration* -<http://www.nasa.gov/> NASA com parceria da *German Aerospace Center* - DLR e a *Italian Space Agency* (ASI), realizada durante 11 dias do mês de fevereiro de 2000 visando gerar um modelo digital de elevação quase-global, ou seja, a cobertura está disponível entre as latitudes +60° e -60°. Para as zonas entre as latitudes 90° a 60° ao norte e ao sul, podem ser utilizados os dados da missão GTOPO30 ou SRTM30.

Corresponde a um radar (SAR) a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, que adquiriu dados sobre mais de 80% da superfície terrestre, nas bandas C e X e fazendo uso da técnica de interferometria (Figura 22).

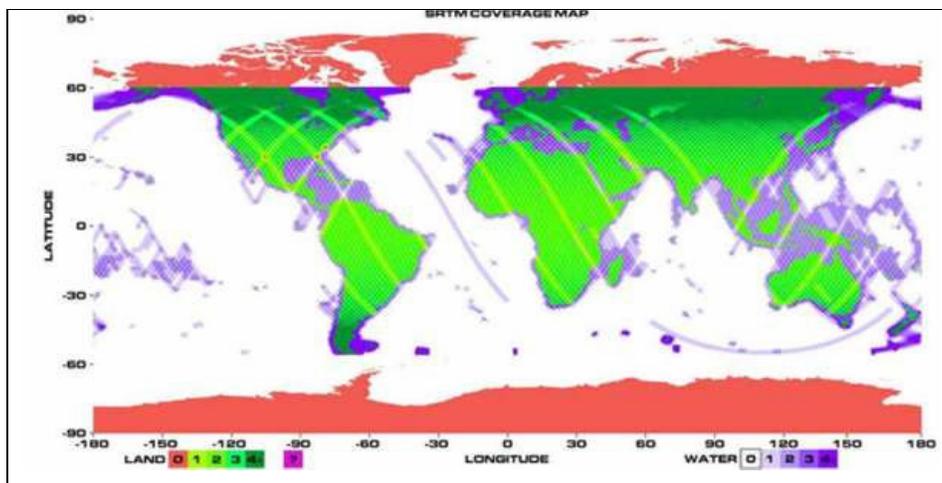


Figura 22: Ilustração da Superfície levantada pela missão SRTM (verde) e GTOPO (vermelho).

Fonte: <http://srtm.usgs.gov/data/coveragemaps.php>, acesso em fevereiro de 2008.

Segundo Barros (2005), nesta técnica a altitude é obtida através da medição da diferença de fase entre duas imagens de radar sobre um mesmo local na Terra (CCRS, 2004). Podem ser utilizadas imagens adquiridas em datas diferentes ou em uma mesma órbita, caso haja duas antenas de recepção separadas a bordo da plataforma.

O sistema SRTM contava com duas antenas de recepção, separadas por um mastro de 60 m (Figura 23), o que possibilitou a aquisição dos dados em uma mesma órbita, garantindo a melhor qualidade dos mesmos.

Os DEMs relativos à banda C estão sendo distribuídos pela NASA, já se encontrando disponíveis gratuitamente para as Américas do Sul e do Norte, com resolução espacial de aproximadamente 90 x 90 m. Há a possibilidade de se adquirir dados com resolução de 30 x 30 m dependendo de acordos analisados individualmente pela NASA.

Os dados disponibilizados do SRTM podem ter uma grande aplicabilidade, pois os DEMs de toda a América do Sul já se encontram disponíveis. Um ponto a seu favor – além da gratuidade para a resolução de 90 x 90 m – é o uso da interferometria para o cálculo da altitude, que possui uma maior acurácia se comparada com a técnica da estereoscopia (CCRS, 2004).

Alguns trabalhos indicam que podem ser atingidas precisões melhores do que as estimadas antes do início da missão, como por exemplo, em Valeriano (2005), que estimam em até 6 m o erro vertical. Para atingir tais metas, os dados devem ser processados a fim de se eliminar imperfeições do sistema, tais como valores espúrios

próximos ao litoral e alguns vazios no continente, referentes a áreas de sombra ao sinal.

Schumann *et al.* (2007) em experimentos de campo encontraram erros menores que 5 m na vertical e de 2 a 3 pixels na horizontal, o que chama a atenção para a necessidade de validação também para deslocamentos do dado.

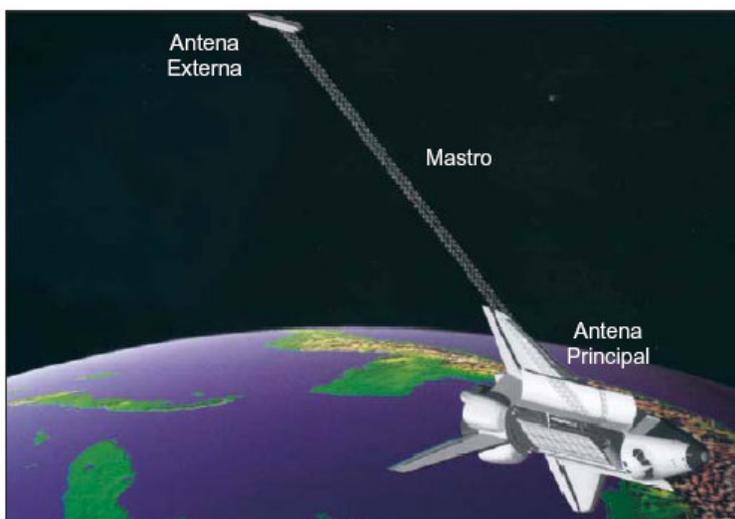


Figura 23: Esquema da aquisição de dados do SRTM – detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita. Fonte: <http://erg.usgs.gov/isb/pubs>, acesso em fevereiro de 2008.

Apesar de todos os pontos positivos apresentados, os dados SRTM apresentam alguns problemas, tais como: valores espúrios (positivos e negativos) nas proximidades do mar e em áreas onde não são encontrados valores. Estas últimas áreas recebem o valor -32768, indicando que não há dado disponível.

São diversas as possibilidades de correção desses problemas, desde substituição de tais áreas por dados oriundos de outros produtos – o GTOPO30 aparece como proposta para substituição em diversos textos – até mesmo o uso de programas que procuram diminuir tais incorreções através de edição de dados. Alguns destes programas são gratuitos e podem ser encontrados na Internet. Esta última opção foi a escolhida neste trabalho.

4.4.2.Regionalização de vazões

A regionalização de vazões tem por objetivo transportar informações de um ponto geográfico para uma área sem dados ou com poucos dados, mas com comportamento hidrológico semelhante.

Isso é possível porque existem processos com comportamentos semelhantes que podem ser identificados através de relações entre variáveis hidrológicas e estatísticas e parâmetros do sistema hídrico que são similares espacialmente.

Um benefício adicional da análise regional da informação é o de permitir o aprimoramento da rede de coleta de dados hidrológicos, à medida que a metodologia explora melhor a informação disponível e identifica lacunas. Estudo realizado por Primo, Peixoto (2003) mostra as etapas a serem seguidas no trabalho de aplicação da metodologia.

O primeiro passo de aplicação da metodologia, é a seleção e análise de dados, que consiste na análise de informações hidrológicas obtidas das estações pluviométricas e fluviométricas presentes na bacia em estudo visando estimar variáveis em locais sem dados.

Os postos fluviométricos podem ser selecionados de acordo com alguns critérios, tais como:

- Disponibilidade de vazão;
- Alterações na série hidrológica;
- Série com pelo menos dez anos de dados;
- Consistência das coordenadas geográficas das estações, ou seja, verificação no mapa da localização real da estação estudada;
- A distribuição espacial das estações que compõem a rede hidrométrica básica deve permitir uma cobertura satisfatória da bacia em estudo.

Após o inventário e seleção das estações de interesse, devem ser obtidos os dados de descargas médias diárias, cotas médias diárias, medições de descargas líquidas, vazões mensais e anuais.

O regime de vazões de uma bacia hidrográfica consiste na análise de diversas características fisiográficas. Porém, de maneira geral, são as condições climáticas que definem a distribuição espacial e temporal do regime de precipitação sobre a bacia,

onde a análise dos regimes pluviométricos é de fundamental importância no estudo de regionalização.

Assim como nas estações pluviométricas, é necessário adotar um critério de seleção dos postos pluviométricos, para que então as análises dos dados de chuva possam ser efetuadas.

Tal análise consiste primeiramente em analisar a série histórica dos dados das estações mediante um diagrama de barras anual, permitindo a visualização de períodos de dados comuns e eliminação dos postos com muitas falhas.

Com postos selecionados para estudo, torna-se possível confeccionar hietogramas das chuvas totais médios mensais e anuais na bacia de interesse, revelando assim, os anos mais e menos chuvosos, bem como o total precipitado para cada período.

Para facilitar a visualização destas informações, pode ser gerado um mapa de isoietas, que tem por objetivo visualizar a distribuição espacial das precipitações sobre a bacia.

A etapa seguinte à seleção e análise de dados, é a estimativa de valores hidrológicos característicos da bacia, tais como: vazão média de longo período, vazão máxima associada a um tempo de retorno de interesse, vazão mínima de 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos, a vazão associada a permanência de 95 %.

O uso de valores médios regionais de variáveis como indicadores é útil para verificar se resultados dos estudos específicos estão dentro da ordem de grandeza de uma determinada região e para permitir uma primeira estimativa dos usos e controles dos recursos hídricos em locais sem dados.

Um indicador regional é um valor médio de uma proporção entre variáveis hidrológicas ou uma variável característica. As variáveis dependem da magnitude da bacia e variam dentro da mesma. Desta forma, a relação entre os mesmos, de forma adimensional caracteriza um indicador que possui menor variabilidade e permite o seu uso com maior abrangência.

4.4.3. Sistema de Informações Geográficas – SIG

O SIG é uma ferramenta muito utilizada no auxílio à tomada de decisão, como no caso do setor elétrico, que a cada dia passa a desenvolver estudos cuja base espacial é de fundamental importância.

Um SIG é um sistema de auxílio por computador para a aquisição, armazenamento, análise e visualização de dados geográficos. Atualmente uma variedade de ferramentas de softwares está disponível para auxiliar nesta atividade, como é o caso do ArcGis, Idrisi, Spring e outros.

Estudos realizados em Portugal (ADEME, 2005), pela Agência de Energia, preparou uma base de dados espaciais utilizando a ferramenta SIG, com o objetivo de identificar pequenas centrais hidrelétricas.

Outro exemplo de utilização da ferramenta de SIG é o estudo aplicado para o Estado de Santa Catarina, onde desenvolveu-se um modelo de planejamento espacial, considerando inserção da geração distribuída tomando como base o banco de dados do sistema de transmissão e distribuição do Estado.

Segundo Santos *et al.* (2003), o modelo de planejamento espacial para geração descentralizada, tem como principal objetivo, proporcionar equilíbrio entre planejamento do sistema elétrico Estadual, com custo mínimo e que seja voltado para o mercado e ao desenvolvimento social.

Muitos estudos vem sendo desenvolvidos com esta ferramenta, que é eficaz tanto na aplicação, em função principalmente de sua aplicabilidade em diversas áreas, como na agilidade e obtenção dos resultados.

Seguindo esta tendência de uso do SIG, aplica-se tal ferramenta no desenvolvimento da presente metodologia, tanto no momento de obtenção e preparação dos dados, quanto da obtenção dos resultados finais, onde verifica-se de forma espacial, todo o potencial hidroelétrico de um curso d'água.

5. METODOLOGIA

A alternativa metodológica aqui proposta trata da elaboração de uma ferramenta capaz de identificar e localizar de forma rápida e eficaz, o potencial hidráulico do rio, com todo processo de prospecção da queda de forma automática, deixando de lado o processo manual de busca ao potencial.

A metodologia foi desenvolvida em duas etapas, sendo na primeira, identificados e localizados os potenciais no curso d'água. Na segunda etapa, define-se para os aproveitamentos identificados, a qualidade hidráulica, ou seja, a metodologia indica, de forma preliminar, o tipo de máquina que pode ser utilizado, dando assim uma visão geral de todo o aproveitamento, tanto no tocante às obras civis quanto à motorização da central.

Na primeira etapa, além de localizar os potenciais ao longo do curso d'água, tal metodologia considera ainda as variáveis ambientais e sociais da região em estudo, através de banco de dados de SIG – Sistema de Informações Geográficas. Tal estudo requereu o desenvolvimento de uma rotina de ações que envolvem planilhas de cálculo e SIG segundo o Fluxograma representado na Figura 24.

A aplicação da metodologia de prospecção de novos potenciais hidrelétricos gera como produto final, um mapa do curso d'água em estudo, indicando por uma escala de cores, os locais e as potências ao longo do rio, que associado aos layers de condições sócio-econômicas e ambientais da região de interesse, auxilia na definição e localização dos potenciais realmente viáveis.

Através da metodologia, podem ser levantadas ainda características do aproveitamento como:

- Tipo de arranjo da central – Desvio ou Represamento;
- Tipo de central – Micro Central, PCH ou UHE;
- Comprimento do Desvio e do Trecho de Vazão Reduzida (TVR);
- Comprimento do reservatório.

Estas informações auxiliam na tomada de decisão, pois antes mesmo de se iniciarem as visitas á campo, os estudos revelam os seguintes resultados:

- Se o aproveitamento possui arranjo de desvio ou represamento;

- A potência do aproveitamento;
- Se o reservatório e/ou desvio da central são muito extensos, podendo ser um fator de grande peso na consideração ambiental.

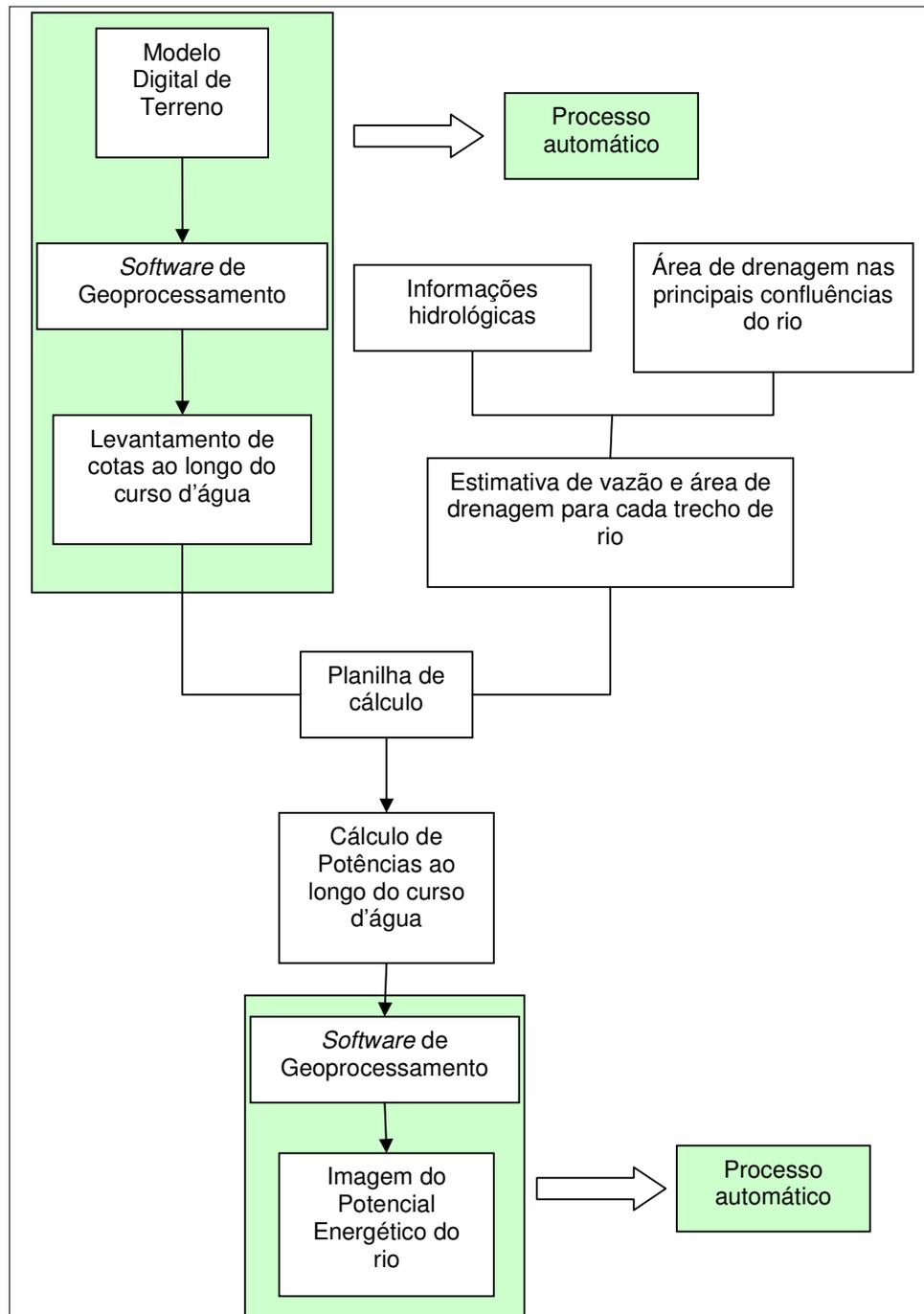


Figura 24: Fluxograma metodológico do levantamento de potencial.

Para o desenvolvimento metodológico da Avaliação do Potencial Hidrelétrico de uma bacia, primeiramente deve-se levar em conta as variações de vazão e queda, conforme a expressão de Potência dada pelas equações a seguir:

$$P = K * Q * H \quad (2)$$

Sendo:

$$K = g * \rho * 10^{-3} * \eta_T * \eta_G \quad (3)$$

Ou ainda:

$$P = 9,81 * \eta * H * Q \quad (4)$$

Onde:

g é a aceleração da gravidade

ρ é a massa específica da água

η_T é o rendimento da turbina

η_G é o rendimento do gerador

η é o rendimento do grupo gerador

Q é a vazão média regionalizada ou vazão de projeto

H é a queda disponível

Conhecendo-se as variáveis de entrada, a rotina de Avaliação do Potencial Hidrelétrico pode ser dividida em etapas, conforme descrito a seguir:

I. Levantamento de dados básicos

Nesta etapa devem ser levantadas informações relacionadas à queda e vazão para toda a extensão do rio. Para a primeira variável, a presente metodologia utiliza o Modelo Digital do Terreno (MDT), que armazena as altitudes da região (superfície) a ser estudada.

Utilizando as cartas topográficas do IBGE, são levantadas, para diferentes pontos ao longo do curso d'água, as respectivas áreas de drenagem e com base nas técnicas de regionalização de vazões, calculam-se as vazões médias associadas.

Deve-se levantar pontos próximos, antes e depois, das desembocaduras de afluentes relevantes, para evitar erros significativos de aproximação das vazões em cada ponto estudado, considerando desta forma, as principais contribuições de vazão ao longo do curso d'água.

II. Digitalização do talvegue

Fazendo uso de *software* de geoprocessamento e de cartas topográficas disponíveis torna-se possível gerar *layers* (camadas) indicando o talvegue do rio e os principais afluentes. Outros *layers* como a localização de cidades, áreas de proteção ambiental, reservas indígenas, acessos, etc, podem ser gerados para auxiliar posteriormente na análise da viabilidade dos potenciais, caso tais informações não existam para o local de estudo.

III. Determinação do perfil longitudinal do rio

A metodologia geralmente utilizada para o levantamento do perfil longitudinal do rio é a medição em carta topográfica das distâncias entre as curvas de nível (ΔL) e a variação de cota entre elas (ΔH), conforme a Figura 25.

Uma das dificuldades deste método está associada à demora para obter-se o perfil do rio, já que toda a medição deve ser feita manualmente, em papel ou mesmo em arquivo digital.

Além disso, no caso do Brasil, o número de cartas topográficas em escalas maiores é restrito, podendo mascarar o levantamento das quedas no rio, quando se faz o uso de material em escala menor.

Um exemplo disso é a omissão de quedas quando se utiliza uma carta topográfica onde as curvas estão eqüidistantes em 50 m, assim quedas menores que este valor não são observadas.

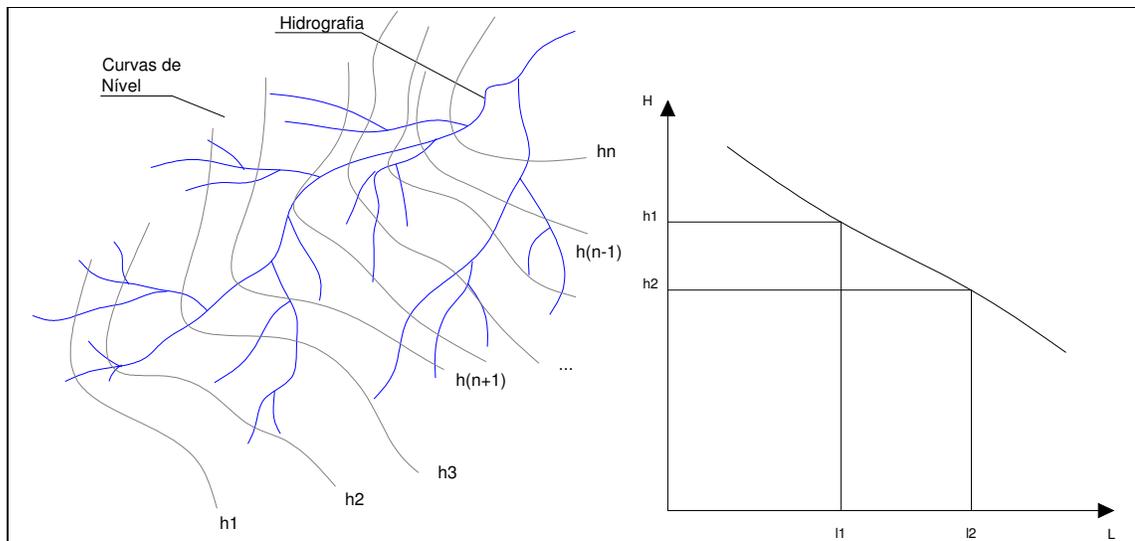


Figura 25: Curso d'água e medição de comprimentos e variação de cotas.

Já na metodologia proposta, além da agilidade de obtenção dos valores de ΔL , a utilização de Modelo Digital do Terreno (MDT) permite o levantamento mais detalhado das quedas (ΔH), quando comparado com os estudos efetuados em carta topográfica.

Os MDTs são disponíveis para todos os continentes, mas certamente possuem suas restrições de uso, tornando impróprio para uso em certos casos, como por exemplo em área de vegetação densa, em que podem acumular grandes erros. Tomando os devidos cuidados, o MDT torna-se um grande facilitador no levantamento de potenciais hidrelétricos.

Na metodologia desenvolvida neste trabalho, o modelo digital é utilizado para levantar de forma automática e muito eficaz, os ΔL e ΔH ao longo de um curso d'água.

Com as ferramentas de geoprocessamento, o talvegue do rio é digitalizado, formando um arquivo com vários trechos e vértices representando o rio.

A cada vértice, associa-se um ponto (Figura 26), nos quais são medidas as distâncias (ΔL) e levantadas às cotas no ponto inicial e final de cada trecho. Os valores de cota são reservados para o posterior cálculo do ΔH .

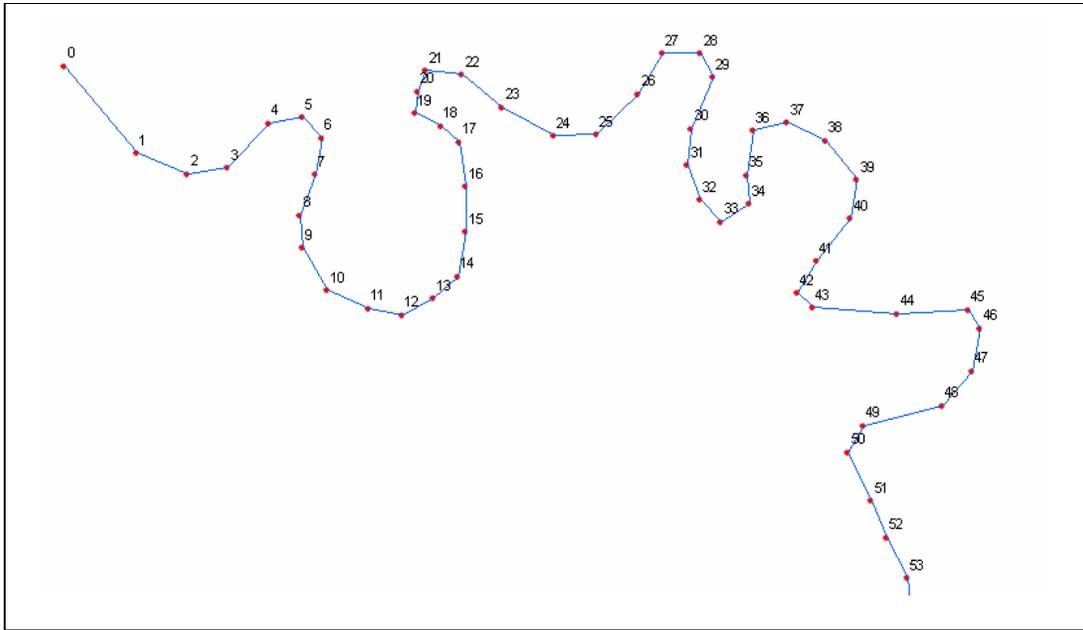


Figura 26: Vértices do curso d'água digitalizado.

IV. Determinação do Potencial Hidráulico

A busca de potencial é feita para os dois tipos básicos de centrais hidrelétricas: centrais de desvio e centrais de represamento ou leito. O primeiro é típico para centrais de mais alta queda e o segundo para centrais de queda mais baixa, embora possam existir variações.

A vazão aduzida nas centrais de desvio corresponde à vazão afluyente na barragem, a qual em certos casos pode ser diferente daquela que aflui na bacia de dissecação a jusante da casa de máquinas. Já, para as centrais de leito, essas vazões são iguais.

O potencial hidrelétrico é avaliado com base na vazão média (\bar{Q}) afluyente na barragem, e na queda (H), a ser estimada para diferentes cenários, além de adotar um rendimento (η) de 90% da equação (4).

Para o cálculo dos cenários de queda em diferentes pontos ao longo do talvegue, admite-se um determinado comprimento de influência sobre o rio (L). Assim, para uma determinada distância L , tem-se que o ponto mais a montante do reservatório está a esta distância L da casa de máquinas, sendo assim, a queda total corresponde à diferença de cotas entre esses pontos.

Desloca-se, então, o ponto onde se situa a casa de máquinas, obtendo-se, para a mesma distância L , quedas distintas (Figura 27).

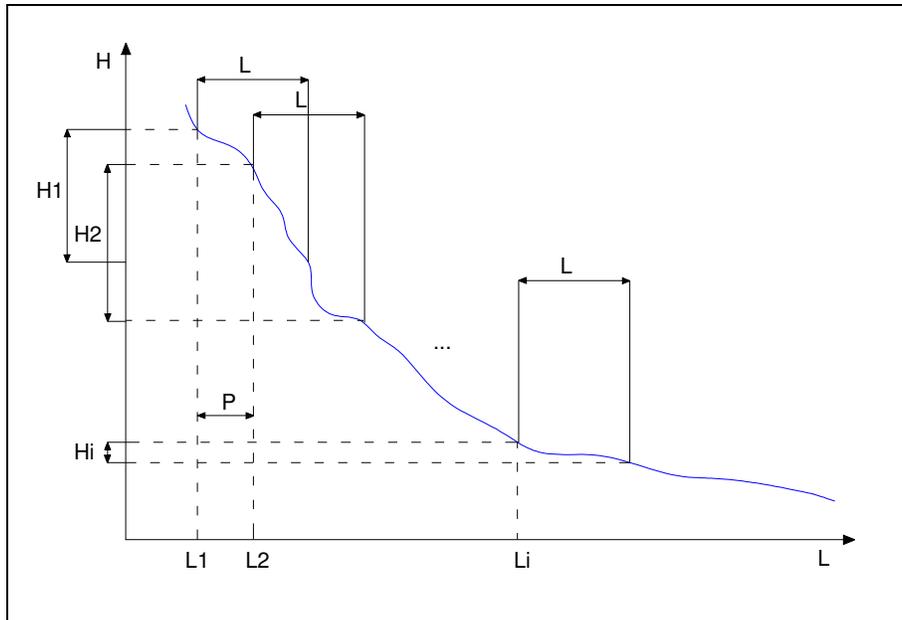


Figura 27: Esquema do processo de busca do potencial utilizando a janela móvel.

Matematicamente, isto corresponde a uma janela móvel, em que L é a largura da janela e P seria o passo a se deslocar. Passos grande pode esconder potenciais, e passos pequeno exige interpolações nem sempre coerentes, além de exigir um esforço de cálculo desnecessário. De maneira geral, a adoção de valores menores para L implica em explorar centrais de mais alta queda. Já as centrais de baixa queda, exigem um valor de L maior.

Para o cálculo da vazão de projeto (vazão média regionalizada), pode-se adotar o ponto de início da janela móvel (Q de montante), que é compatível com central de desvio, ou o ponto final da janela (Q de jusante), que é compatível com centrais de leito. As duas situações devem ser simuladas, pois a princípio, não se sabe qual dos arranjos deve ser adotado (Figura 28).

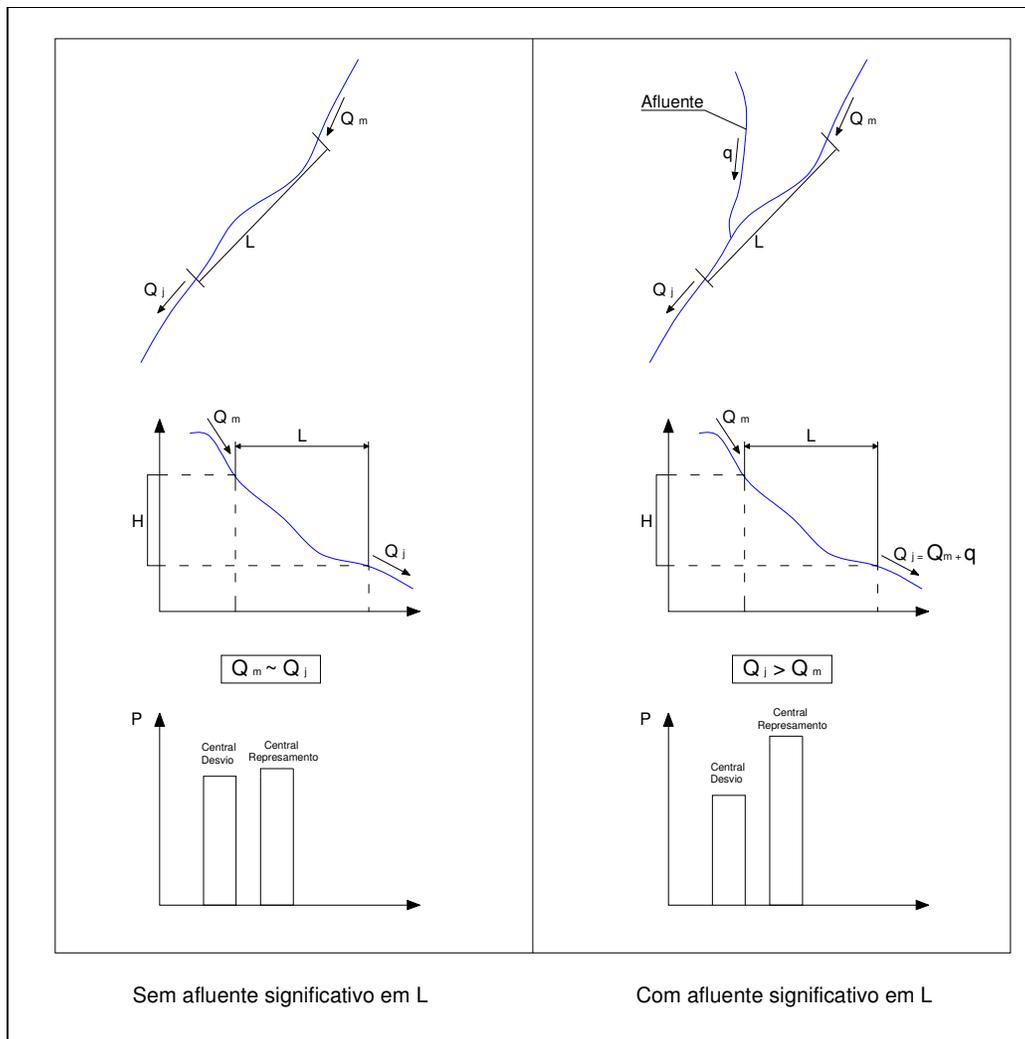


Figura 28: Cálculo da vazão de projeto.

Na segunda etapa da metodologia, define-se o Índice de qualidade Hidráulica (I_{qh}) dos aproveitamentos identificados na fase anterior, o qual é calculado segundo uma variação da equação (1) de rotação específica de turbinas, conforme equação (5).

$$I_{qh} = \frac{H^{0.75}}{P^{0.5}} \quad (5)$$

Onde:

H é a queda bruta (m)

P é a potência (MW)

O objetivo principal de se determinar o Iqh dos aproveitamentos é indicar qual o tipo de máquina hidráulica seria mais apropriada para o aproveitamento, que juntamente com a aplicação da metodologia de prospecção de potenciais, indica preliminarmente, o tipo de arranjo e a máquina mais apropriada para o empreendimento identificado.

6. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso desenvolvido na presente Dissertação de Mestrado, é dividido em duas fases, sendo a primeira aplicada ao rio Sapucaí em Minas Gerais, com o objetivo de levantar e caracterizar a partição de queda do rio, e a segunda, onde aplicou-se a metodologia à bacia do rio Grande com a finalidade de consistir a ferramenta desenvolvida.

6.1. Caracterização da região de estudo

I. Localização geográfica

O rio Sapucaí localiza-se na bacia do Rio Grande e antes da construção da represa de Furnas, o rio Sapucaí desaguava no rio Grande nas proximidades de Alpinópolis. Atualmente, deságua no lago da UHE de Furnas formado por suas águas e as dos rios: Grande e Verde.

A Bacia hidrográfica do Rio Sapucaí integra a Bacia do Rio Grande, localizada na região Sudeste e compreende parte dos dois estados: Minas Gerais e São Paulo, entre os paralelos 22°40'38" e 22°12'33" de latitude sul e os meridianos 45°04'39" e 45°45'33" de longitude oeste. A Figura 29 mostra a área de estudo, caracterizando a localização da bacia do Rio Sapucaí.

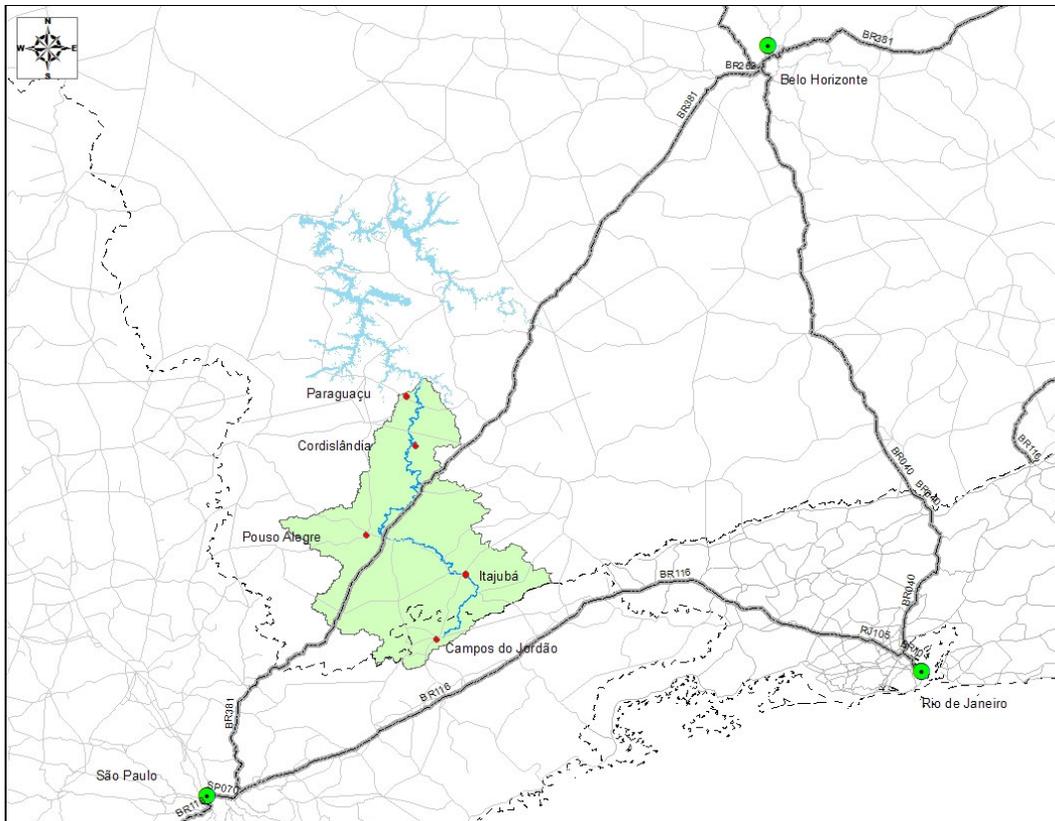


Figura 29: Localização Geográfica da Área de Estudo.

O Rio Sapucaí nasce na Serra da Mantiqueira, na cidade de Campos do Jordão, Estado de São Paulo, a uma altitude de 1650 m, e deságua no Lago de Furnas a 780 m de atitude, e seu comprimento é de aproximadamente 352 km, sendo 34 km dentro do Estado de São Paulo.

Dos 53 municípios que formam a bacia do rio Sapucaí, somente 40 possuem sede municipal inserida na área estudada e destas, destacam-se como mais populosas: Pouso Alegre, localizada na margem esquerda do rio e com aproximadamente 95 mil habitantes, e na margem direita, Itajubá e Santa Rita do Sapucaí, com populações aproximadas de 80 e 30 mil habitantes, respectivamente (Figura 30).

- BR-459: rodovia de ligação entre a Dutra e a Fernão Dias, sendo importante corredor de desenvolvimento econômico regional, interligando os municípios de Pouso Alegre, Santa Rita do Sapucaí e Itajubá.
- BR-267: Rodovia Vital Brasil – é uma via de acesso a Elói Mendes e Machado e importante rodovia federal que corta a região, tendo ligação com a Fernão Dias.
- BR -116: Via Dutra, de interligação aos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

Com relação às rodovias estaduais, vale ressaltar: MG-173: ligação Minas ao Vale do Paraíba; MG-290: ligação de Pouso Alegre com Campinas; MG-179 – Ligação dos municípios da região do lago de Furnas; MG-295 – Via de acesso a Paraguaçu.

A Figura 31 mostra as principais vias de acesso para os municípios da área estudada e a região do entorno do Rio Sapucaí.

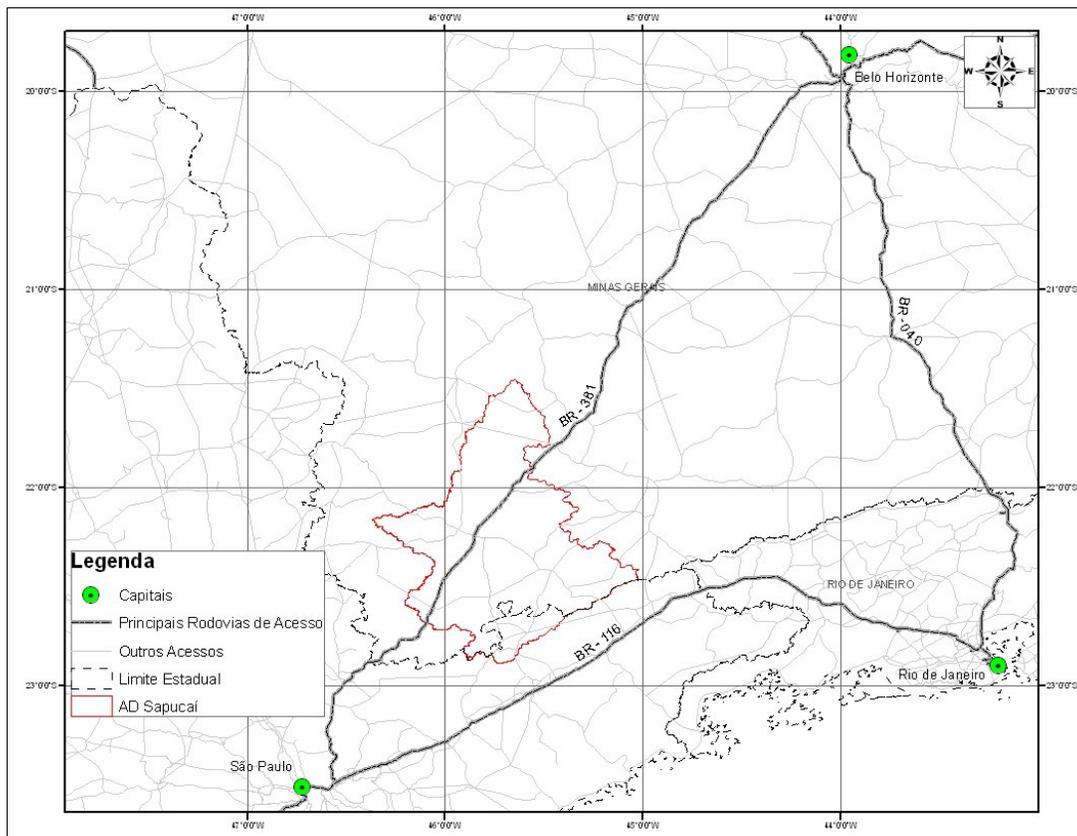


Figura 31: Vias de Acesso da área de estudo.

III. Fisiografia da bacia do rio Sapucaí

A área de drenagem do Rio Sapucaí corresponde a aproximadamente 9.581 km² onde se destacam os seguintes afluentes: Ribeirão dos Marmelos, Ribeirão da Vargem Grande, Rio do Cervo, Rio Sapucaí - Mirim, Ribeirão do Turvo e Rio Dourado pela margem direita, e na margem esquerda os afluentes Ribeirão da Mutuca, Córrego da Fonte Torta, Ribeirão São Vicente, Rio Turvo, Ribeirão São João, Rio do Vintém, Córrego do Inhaúma, Rio Lourenço Velho e Rio Santo Antônio (Figura 31).

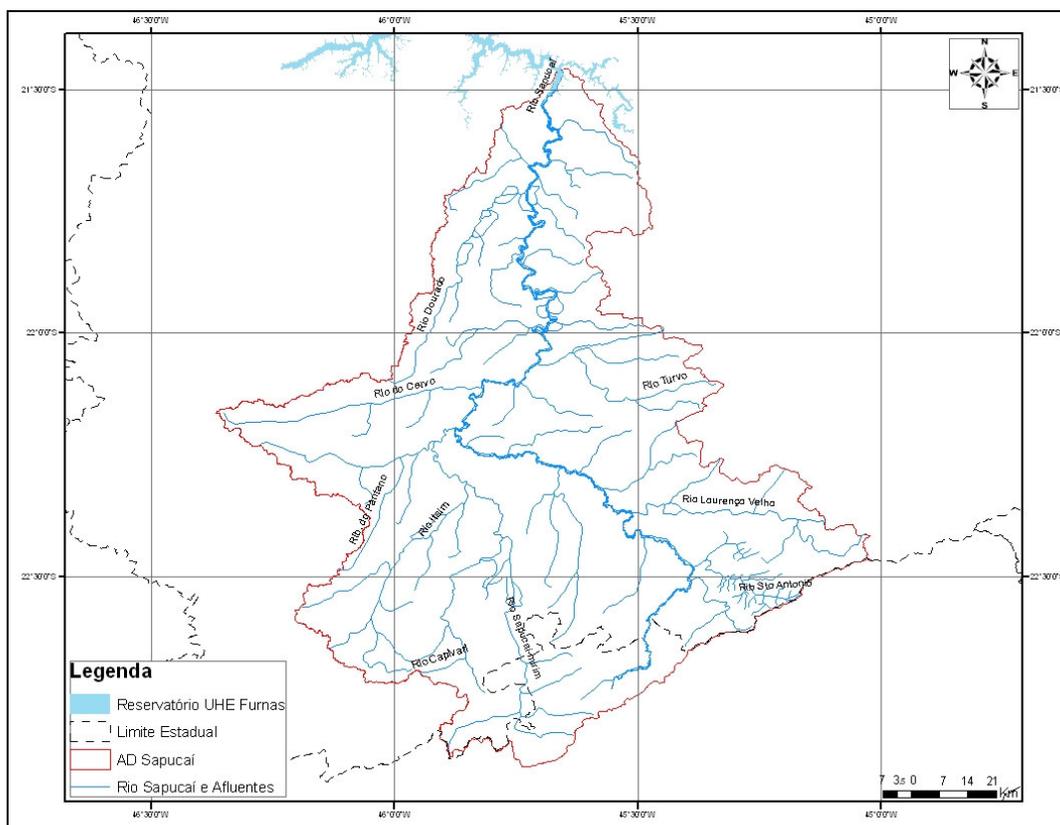


Figura 31: Área de drenagem da bacia do rio Sapucaí e principais afluentes.

As declividades da bacia variam desde extremos máximos de 23%, concentrados principalmente nas regiões próximas ao divisor de águas, até atingir valores médios de 3%, nos trechos de planície.

Na parte sul da bacia, cercada pela serra da Mantiqueira, as altitudes chegam próximo dos 2350 m, decrescendo gradativamente até o encontro com o lago de Furnas, onde a altitude fica em torno dos 780 m (Figura 32).

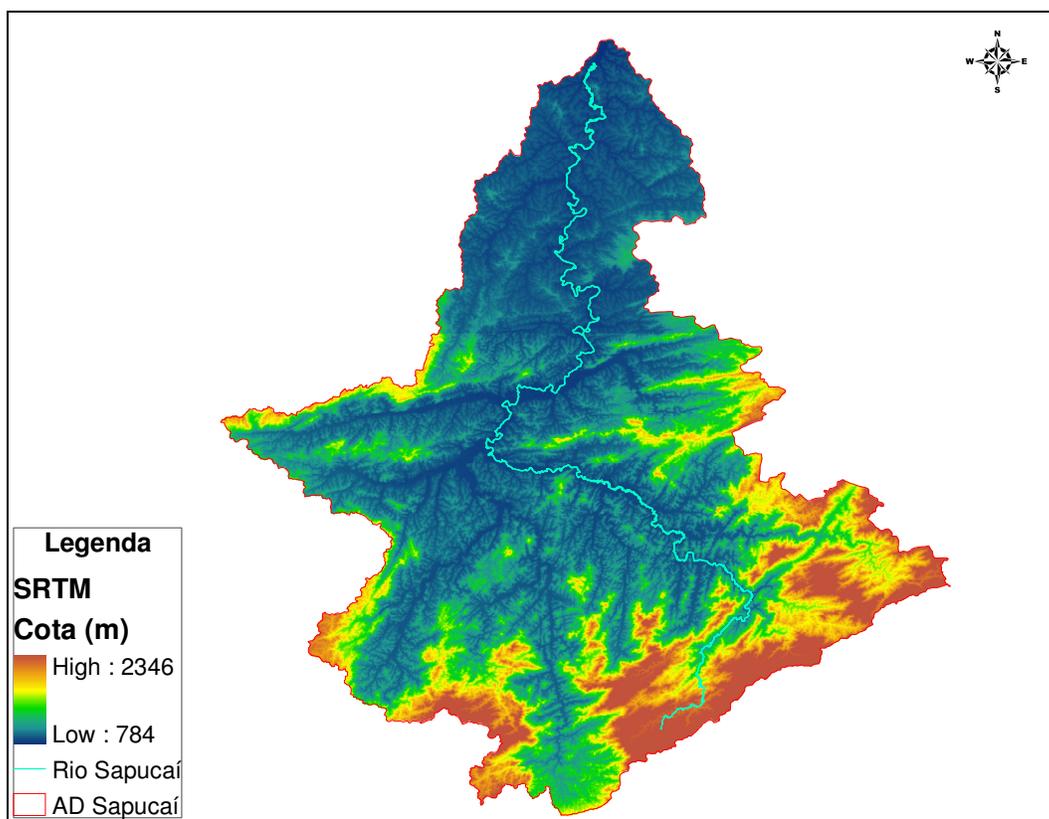


Figura 32: Relevo na bacia do rio Sapucaí.

Na bacia do Rio Sapucaí existe aproveitamentos hidrelétricos em operação, desativados e em fase de licenciamento, como é o caso das PCHs Cristina e Ninho da Águia.

Dos empreendimentos em operação destacam-se a Usina Hidrelétrica da REPI instalada e em operação no Rio de Bicas, a montante da cidade de Wenceslau Braz, a PCH Luiz Dias, operada numa parceria entre CEMIG e UNIFEI, localizada no rio Lourenço Velho, a UHE de São Bernardo, da CEMIG, no Ribeirão São Bernardo e por ultimo a UHE Fojo, da CESP, no Córrego do Fojo que encontra-se desativada.

IV. Clima na bacia do rio Sapucaí

O clima na bacia é tropical subquente úmido com três meses secos, passando a tropical quente semi-úmido, com quatro a cinco meses secos nas suas porções médias e inferiores.

Na cabeceira do rio Sapucaí, o clima é influenciado pela Serra da Mantiqueira, caracterizado por temperatura média anual de 13,6°C e total médio anual de precipitação superior a 1500 mm.

No restante da bacia predominam temperaturas amenas durante o ano todo, com valores médios entre 18°C e 22°C, com precipitação média anual inferior a 1500 mm, podendo ocorrer 1 ou 2 meses sem chuva. Verificam-se duas estações bem definidas: uma estação chuvosa e outra seca.

V. Desenvolvimento sócio-econômico

Os municípios de maior densidade populacional inseridos na bacia do rio Sapucaí são Pouso Alegre, Itajubá, Campos do Jordão, Santa Rita do Sapucaí e Machado, todos com população acima de 30.000 habitantes.

Estes são seguidos por Elói Mendes, Paraguaçu e São Gonçalo do Sapucaí e Cachoeira de Minas que possuem de 10.000 a 20.000 habitantes, sendo todos os outros com população abaixo de 10.000 habitantes, conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Dados Demográficos, Econômicos e Sociais dos Municípios.

Nome Município	Pop Total 2006	PIB 2004	PIB Pcap 2004	IDH 2002
Paraguaçu	19603	138062,452	6836,13	0,788
Eloi Mendes	24161	147584,827	6342,82	0,768
Machado	37571	394059,968	10645,95	0,789
Cordislândia	3570	22605,74	6407,52	0,750
Turvolândia	4891	29872,625	6576,98	0,759
São Gonçalo do Sapucaí	22612	161276,327	6807,21	0,769
Silvianópolis	6014	41106,423	7002,8	0,759
Careaçu	6075	26661,696	4469,69	0,771
São Sebastião da Bela Vista	4891	37402,028	8240,15	0,728

Nome Município	Pop Total 2006	PIB 2004	PIB Pcap 2004	IDH 2002
Pouso Alegre	120413	1275836,839	10670,03	0,826
Santa Rita do Sapucaí	34216	446560,904	13211,08	0,789
São Jose do Alegre	3899	13247,406	3271,77	0,756
Cachoeira de Minas	10810	43586,844	3896,21	0,768
Piranguinho	7771	29211,037	3685,01	0,758
Itajubá	86693	765827,161	8627,09	0,815
Piranguçu	5057	20430,604	3913,91	0,734
Wenceslau Braz	2539	8610,396	3246,76	0,743
Campos do Jordão	44703	277685,316	5796,83	0,820

Fonte: IBGE, 2002.

Dentre estes municípios, observa-se a redução da população rural e um aumento significativo da população urbana, proporcionando uma elevação representativa nos índices de urbanização que era de 52,63% em 1970 e passou a 79,58% em 2000, exercendo uma pressão sobre as áreas urbanas e principalmente sobre os recursos naturais através de uma ocupação desordenada (ALAGO, 2005).

O PIB observado nos municípios de Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Pouso Alegre deve-se ao elevado grau de desenvolvimento científico e tecnológico, por pertencerem à Rota Tecnológica estabelecida ao longo da BR-381 (a Fernão Dias, que com a sua duplicação, favoreceu o maior desenvolvimento da região, atraindo indústrias), além de possuírem Universidades e Centros Técnicos de Desenvolvimento Científico que propiciaram uma maior concentração de economia vinculada ao conhecimento científico.

O PIB de Campos de Jordão deve-se à rota Paulista de acesso e ao investimento maciço na área turística. O município de Machado também merece destaque pela exportação do café de referência nacional e internacional, possuindo também uma Escola Agro-técnica de sustentação científica ao desenvolvimento da área.

Os outros municípios têm seu crescimento econômico baseado na agropecuária, com um PIB intermediário, mas ainda assim em boas condições econômicas e sociais. Observou-se em toda a região que na média, os municípios estão com uma boa renda per capita e a pobreza diminuiu nos últimos anos, considerando o período de 1991 a 2000, mas a desigualdade social persiste.

Conforme a Tabela 6 (p. 47), o Índice de Desenvolvimento Humano – IDH dos municípios em questão estão entre as regiões consideradas de médio desenvolvimento, segundo a classificação do PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, que é a faixa de IDH de 0,5 a 0,8. Observa-se que os

municípios da região apresentam IDH próximos, onde Itajubá, Pouso Alegre e Campos do Jordão apresentam os maiores índices.

No período de 1991 a 2000, o Índice de Desenvolvimento Humano dos municípios da região de estudo apresentou crescimento, devido à melhoria da renda per capita, da educação e da longevidade. Isto pode ser observado na

Tabela 7.

Tabela 7: Índice de Desenvolvimento Humano – Municipal, 1991 e 2000.

Município	IDHM 1991	IDHM 2000	IDHM-Renda 1991	IDHM-Renda 2000	IDHM-Longevidade 1991	IDHM-Longevidade 2000	IDHM-Educação 1991	IDHM-Educação 2000
Paraguaçu	0,683	0,788	0,607	0,71	0,674	0,816	0,768	0,839
Elói Mendes	0,697	0,768	0,656	0,709	0,717	0,796	0,719	0,8
Machado	0,704	0,789	0,66	0,733	0,71	0,785	0,742	0,85
Cordislândia	0,667	0,75	0,591	0,633	0,721	0,803	0,69	0,814
Turvolândia	0,675	0,758	0,594	0,667	0,743	0,808	0,689	0,8
São Gonçalo do Sapucaí	0,701	0,769	0,623	0,686	0,74	0,785	0,74	0,835
Silvianópolis	0,67	0,759	0,613	0,695	0,721	0,765	0,677	0,818
Careaçu	0,688	0,77	0,61	0,68	0,743	0,826	0,711	0,805
São Sebastião da Bela Vista	0,652	0,728	0,606	0,656	0,694	0,764	0,656	0,764
Pouso Alegre	0,764	0,826	0,712	0,769	0,766	0,803	0,813	0,907
Santa Rita do Sapucaí	0,716	0,789	0,672	0,733	0,721	0,792	0,756	0,843
São José do Alegre	0,674	0,756	0,58	0,661	0,698	0,765	0,745	0,843
Cachoeira de Minas	0,68	0,768	0,554	0,658	0,721	0,803	0,765	0,842
Piranguinho	0,667	0,757	0,563	0,653	0,69	0,764	0,748	0,855
Itajubá	0,768	0,815	0,692	0,752	0,762	0,764	0,849	0,928
Piranguçu	0,646	0,734	0,573	0,629	0,69	0,764	0,674	0,808
Wenceslau Braz	0,664	0,743	0,564	0,664	0,69	0,743	0,738	0,821
Campos do Jordão	0,741	0,82	0,716	0,763	0,735	0,846	0,773	0,851

Fonte: Atlas de Desenvolvimento Humano no Brasil, 2002.

VI. Questões ambientais

Com relação às questões ambientais preliminarmente identificadas, merecem destaque os seguintes aspectos:

1. Não foram identificadas no entorno do Rio Sapucaí, áreas indígenas ou de quilombolas.
2. Foram identificadas Unidades de Conservação Ambiental Estadual e Federal de Relevância, como:
 - APA da Mantiqueira;
 - APA de Fernão Dias;
 - APA Sapucaí-Mirim;
 - APA Campos do Jordão;
 - Parque Estadual de Campos do Jordão;
 - Parque Estadual Mananciais.

A. Área de Proteção Ambiental - APA da Mantiqueira

Segundo o Decreto nº91.304 de 03 de junho de 1985, foi implantada a área de proteção ambiental nos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, que corresponde dentre outros, os municípios de Piranguçu, Wenceslau Braz e Campos do Jordão, com as delimitações geográficas constantes do artigo 3º.

Esta área deve ter garantida a conservação do conjunto paisagístico e da cultura regional, preservando as cadeias montanhosas, a flora endêmica e andina, os remanescentes de bosques de araucária, a cobertura vegetal do espigão central e das manchas de vegetação primitiva, além da vida selvagem, principalmente de espécies ameaçadas de extinção.

Na APA da Mantiqueira, estão proibidas implantação de atividades industriais potencialmente poluidoras, capazes de afetar os mananciais; realização de obras de terraplanagem e abertura de canais, que possam alterar as condições ecológicas

locais, protegendo a biota com mais rigor; exercício de atividades capazes de acelerar erosão e assoreamento das coleções hídricas; exercício de atividades que ameacem extinguir espécies raras da biota, principalmente remanescentes dos bosques de araucárias, manchas de vegetação primitiva e as nascentes da região; proibido o uso de biocidas.

B. Área de Proteção Ambiental – APA Fernão Dias

O Decreto de nº 38925 de 17 de julho de 1997, que cria a APA Fernão Dias, declara áreas de proteção ambiental e de interesse ecológico, aquelas situadas nas bacias hidrográficas dos rios Jaguari, Sapucaí-Mirim e Sapucaí.

Abrange diversos municípios dos limites do rio Sapucaí e Sapucaí- Mirim, e apesar de não afetar diretamente os municípios escolhidos, afetam as regiões próximas e que podem representar limitações ambientais. As posições geográficas constam do artigo 3º do referido decreto-lei.

É uma região de montanhas que compõem o relevo típico da Serra da Mantiqueira, domínio da Mata Atlântica, representada pela floresta Ombrófila densa e pela presença das araucárias.

As principais justificativas da criação e implantação da APA foi a produção hídrica da região da Serra da Mantiqueira, que forma no espaço abrangido pela Unidade de conservação, a bacia hidrográfica do rio Jaguari em Minas gerais e as cabeceiras do rio Sapucaí-Mirim, e a presença de importantes remanescentes florestais da Mata Atlântica.

C. Área de Proteção Ambiental - APA Sapucaí-Mirim

A APA Sapucaí-Mirim localiza-se na Serra da Mantiqueira e abrange dois municípios onde se encontra a bacia do rio Sapucaí (São Bento do Sapucaí e Santo Antônio do Pinhal) e ainda cerca de 40 municípios de Minas Gerais, com uma área de 39.800,00 ha.

É uma unidade de uso sustentável criada pelo Decreto Estadual n. 43.285 e tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais.

Sua vegetação apresenta remanescentes da Mata Atlântica, nas partes mais altas, além de Mata de Araucárias e campos de altitude.

D. Parque Estadual de Campos do Jordão

O Parque Estadual de Campos do Jordão se localiza no município de Campos do Jordão, no Vale do Paraíba, com 8.341 hectares de área preservada.

Este Parque pertence ao grupo das Unidades de Uso Sustentável e tem como objetivo básico a preservação de ecossistemas naturais de grande relevância ecológica e beleza cênica, possibilitando a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento de atividades de educação e interpretação ambiental, de recreação em contato com a natureza e de turismo ecológico.

Foi criado em 1941 pelo Decreto Estadual 11.908, para resguardar os últimos remanescentes das florestas de araucária da região. O Parque abriga cerca de 178 espécies de aves catalogadas, muitas das quais ameaçadas de extinção, como o papagaio-de-peito-roxo (*Amazona vinacea*), o arapuçu-de-bico-torto (*Campylorhamphus trochilrostris*) e o saudade-assobiador (*Tijuca atra*). Mas há também mamíferos, alguns de grande porte, como a onça-parda ou suçuarana (*Puma concolor*) e o bugio (*Alouatta fusca*).

E. Parque Estadual dos Mananciais de Campos do Jordão

O Parque Estadual dos Mananciais de Campos do Jordão foi implantado em 1993, pelo Decreto Estadual 37.539 e possui uma área de 502,96 ha. Tem o objetivo de proteger as cabeceiras do Córrego do Coutinho e do Ribeirão das Perdizes, que formam o Rio Sapucaí-Guaçu, afluente do Rio Grande.

Possui flora e fauna semelhantes às do Parque Estadual de Campos do Jordão, que fica a 17 km de distância.

F. Parque Estadual de Campos do Jordão

O Decreto de nº11.908 de 27 de março de 1941 instituiu como Unidade de Proteção Integral, o Parque Estadual de Campos do Jordão ou Horto Florestal, o mais antigo do

Brasil. Possui uma área de 8.341 hectares ocupando um terço da superfície total da Estância de Campos do Jordão.

Neste, são desenvolvidos diversos programas relacionados à pesquisa, educação ambiental, recreação e conservação dos recursos naturais. É uma área de preservação com cachoeiras e matas de araucárias e um ecossistema diversificado.

No Parque Estadual foi instalado um Posto de Salmonicultura, com a finalidade de criação de trutas para o peixamento constante dos rios e lagos da região. O Posto vem cumprindo essa finalidade e a população de trutas na região do Parque vem aumentando.

O sistema de águas do parque é formado por cursos d'água, componentes da bacia do rio Sapucaí-Guaçu, dele fazem parte os córregos do Canhambora, Campo do Meio, Galharada e os Ribeirões Casquilho e Coxim, além do Córrego do Paiol, que está à esquerda do rio Sapucaí-Guaçu. Todos apresentam leito pedregoso, águas límpidas e oxigenadas.

Portanto, dentre as questões ambientais relevantes na área de estudo e que possam vir a configurar como restrições de modo a influenciar a definição dos locais barráveis e a identificação preliminar das alternativas, as Unidades de Conservação representam um importante item a ser avaliado. A Figura 34 especifica as áreas citadas.

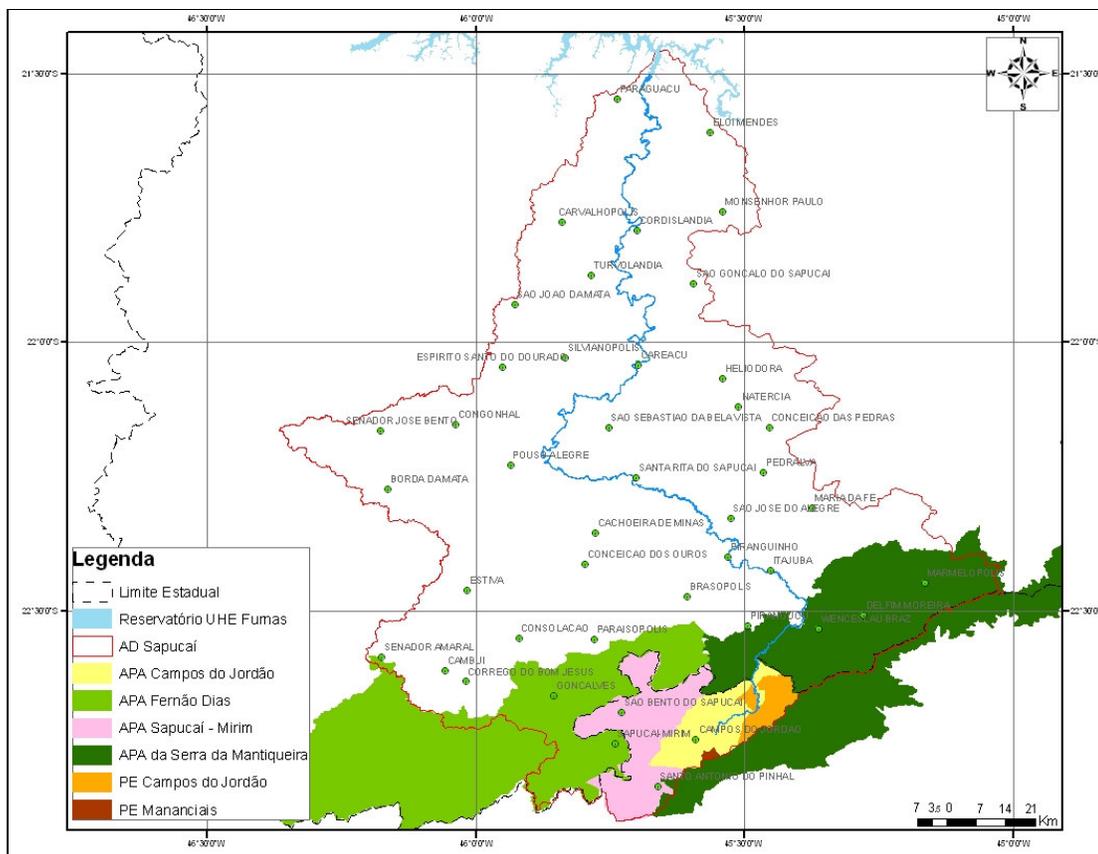


Figura 33: Representação das Unidades de Conservação na área de estudo.

3- Não foram identificadas Unidades de Conservação Municipal de expressividade na região, que constituísse alguma restrição.

4- A região apresenta importância turística, com Campos do Jordão como Estância Climática e no Estado de Minas Gerais, os Circuitos Turísticos: Circuito Turístico do lago de Furnas e o Circuito Turístico do Sul de Minas.

O Circuito Turístico do Lago de Furnas engloba cidades como Paraguaçu e Machado, no entorno do lago de Furnas, com áreas de proteção ambiental e de potencial turístico.

Já as cidades de Itajubá, Wenceslau Braz, Piranguinho e Piranguçu, pertencem ao Circuito do Sul de Minas, apresentam importância paisagística e serras remanescentes de Mata Atlântica, além de representarem potencial turístico.

O circuito turístico compreende um conjunto de municípios com relativa proximidade em determinada área geográfica caracterizado pela predominância de certos

elementos da cultura, da história e da natureza, que permita um maior desenvolvimento regional, ao mesmo tempo em que preserva os atrativos e as áreas que devem ser preservadas (ALAGO, 2005).

5 - Outros Aspectos importantes

Podem ser elencadas outras interferências que possam configurar impactos ambientais na área de estudo, cuja efetivação dependerá de levantamentos mais acurados, que se intensificarão nas pesquisas de campo. Podem ser citadas:

- **Meio Físico:** necessidade de inundação de áreas agricultáveis, com cultura de ciclo curto e pastagens, já que as culturas de café, de maior expressão econômica estão em cotas mais altas; desapropriação e/ou indenização de uso de terras e a criação de faixa de preservação; atingimento de algumas áreas edificadas de propriedades agrícolas marginais, entre residências-sede de fazendas, depósitos, currais e instalações; possibilidade de inundações de pontes e alguns trechos de estradas vicinais; inundação de áreas de vegetação e matas nativas remanescentes; inundação de pequenas propriedades rurais, podendo demandar medidas compensatórias adicionais, além de indenização, a serem confirmadas com levantamentos e cadastramentos futuros.
- **Meio Biótico:** possibilidade de perda de matas nativas remanescentes atingidas pelo(s) reservatório(s), considerando-se a vegetação ciliar e das ilhas a serem inundadas; necessidade de recomposição vegetal e criação de novos habitats para fauna local; perda de habitats aquáticos e terrestres para os grupos de avifauna, mastofauna e herpetofauna ocorrentes na área, por expulsões temporárias dos locais hoje ocupados; atingimento e modificação da ictiofauna do rio Sapucaí e afluentes pela alteração do ambiente aquático; possível alteração das características limnológicas existentes e qualidade físico-química da água.
- **Aspecto Sócio-Econômico:** perda das áreas agricultáveis e de pastagens com reflexos na economia da área a ser afetada; inundação de estradas vicinais com alteração nas atividades, percurso, cotidiano e cultura das populações rurais das áreas; atingimento de áreas edificadas com realocação e/ou mudanças para outras áreas ou cidades; possibilidade de geração de emprego para a mão de obra nos locais barráveis.

6.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NO RIO SAPUCAÍ

Seguindo os passos da metodologia proposta, a primeira etapa realizada, tratou do levantamento de dados básicos relacionados à queda (H) e vazão (Q) para toda a extensão do rio Sapucaí.

No levantamento das quedas foi utilizado como base o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), que é o Modelo Digital de Terreno (MDT) desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NGA (*National Geospatial-Intelligence Agency*), nos Estados Unidos no ano 2000.

Para o cálculo da variável vazão, primeiramente foi realizado o levantamento das áreas de drenagem (AD) em pontos localizados próximos, antes e depois, das desembocaduras de afluentes relevantes da bacia em estudo.

Este critério deve ser seguido para evitar erros significativos de aproximação das áreas, já que pontos localizados logo a jusante das entradas de afluentes, geram grande variação na AD quando comparados com pontos logo a montante da confluência. Cartas topográficas do IBGE georreferenciadas, são a base para a delimitação e medição das ADs.

Para cada uma das áreas de drenagem medida, e com base nas técnicas de regionalização de vazões, calculam-se então as vazões médias associadas.

A próxima etapa proposta na metodologia é a digitalização do talvegue do rio Sapucaí e de seus afluentes, gerando arquivos vetoriais georreferenciados. Fazendo uso do *software ArcView 9X* e de cartas topográficas do IBGE (resolução 1:50.000), foi possível gerar além do *layer* do talvegue do rio, as seguintes camadas:

- Localização das sedes municipais
- Limites municipais por onde o rio Sapucaí percorre
- Áreas de proteção ambiental
- Área de drenagem da bacia
- Principais vias de acesso

Tais *layers* podem ser gerados para auxiliar as análises posteriores de viabilidade dos potenciais, bem como na localização e definição das estruturas dos arranjos das centrais hidrelétricas.

Com o vetor do talvegue do rio Sapucaí, foi feita a sobreposição do mesmo com o SRTM (raster), e fazer um cruzamento entre eles. O resultado disso é um *layer* vetorial contendo 772 pontos (um para cada vértice do rio Sapucaí) com as informações de elevação do SRTM.

Com o *ArcView*, calculou-se as distâncias entre os pontos e os valores foram armazenados junto ao banco de dados de elevação já gerado. O *ArcView* captura ainda as coordenadas geográficas dos pontos e atribui a eles, um identificador (ID), facilitando a manipulação das informações.

Para gerar o perfil longitudinal do curso d'água, foi necessário importar a tabela de atributos gerada no *ArcView* para o *Excel*, e que só então os valores de Área de Drenagem e Vazão foram adicionados.

Antes de iniciar os cálculos, atribuiu-se um valor de AD a cada um dos 772 pontos no rio Sapucaí, ajustando as áreas de drenagem médias a uma equação que melhor se ajusta ao comportamento dos pontos, para que posteriormente os valores de vazão pudessem também ser ajustados.

Com as informações de comprimento acumulado (L_{ac}) e variação de cota, construiu o perfil longitudinal do rio, da nascente à foz (Figura 34), permitindo a identificação e visualização das quedas.

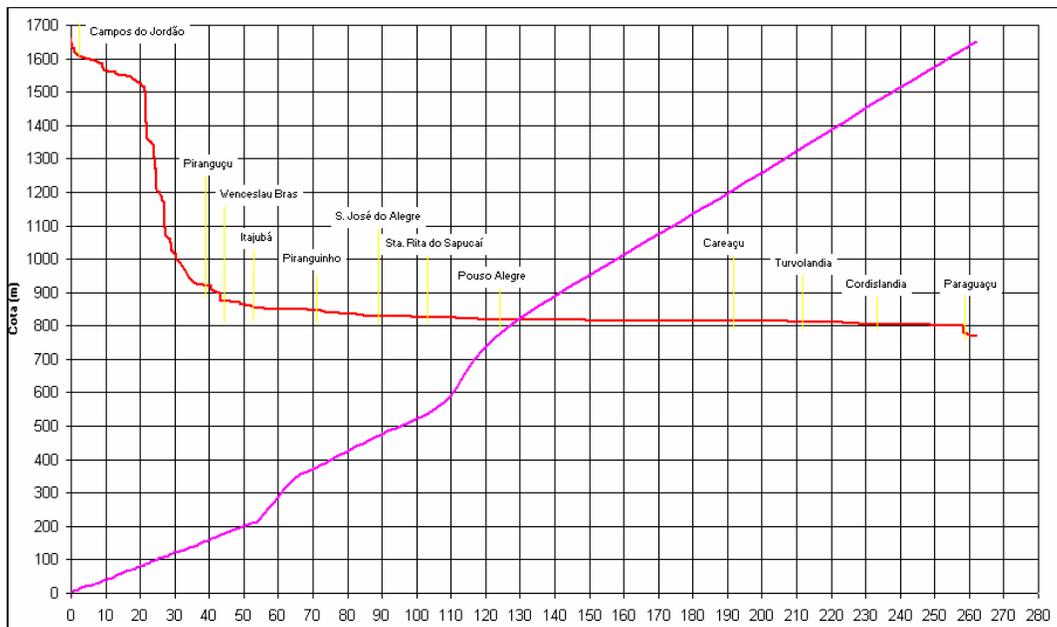


Figura 34: Perfil longitudinal do curso d'água e acréscimo de vazão ao longo do mesmo.

Para o cálculo das Potências nos pontos levantados ao longo do talvegue do Sapucaí, foram simuladas quatro janelas móveis (D), as quais determinam os comprimentos de influência sobre o rio, desta forma, adotaram-se os seguintes valores: 2 km, 4 km, 10 km e 20 km.

O último passo antes de iniciar a etapa de geoprocessamento, é o cálculo dos Índices de Qualidade Hidráulica nos pontos, portanto ao término de todos os cálculos, cada ponto estudado no rio Sapucaí, possui um banco de dados contendo as seguintes informações:

- Coordenadas geográficas dos pontos
- Comprimento dos trechos entre os pontos cuja soma é igual ao comprimento total do rio;
- Área de drenagem;
- Queda;
- Vazão;
- Potência;
- Índice de Qualidade Hidráulica – Iqh.

Com a avaliação deste banco de dados, pode-se definir as características básicas dos aproveitamentos localizados ao longo do rio, tais como tipo de arranjo e máquinas, comprimento de reservatórios e rios.

A fase final de geoprocessamento é a responsável pela visualização dos dados gerados e a que auxilia na tomada de decisão, pois torna-se possível visualizar os potenciais e as possíveis interferências relacionadas a cada um dos aproveitamentos identificados.

6.3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA NA BACIA DO RIO GRANDE

Para a bacia do rio Grande, aplicou-se a metodologia da prospecção de potenciais hidrelétricos para identificar e localizar os potenciais ao longo da hidrografia. Com o uso das ferramentas de SIG, sobrepôs-se o layer com a localização das usinas existentes, verificando desta forma, se os potenciais encontrados na prospecção coincidem com os aproveitamentos já em operação localizados na bacia, consistindo portanto na metodologia aqui desenvolvida.

A Bacia do Rio Grande (sub-bacia 61) é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Paraná (06), e abrange parte dos Estados do Mato Grosso, de Minas Gerais e de São Paulo. A Bacia Hidrográfica do Rio Grande pode ser visualizada na Figura 35.

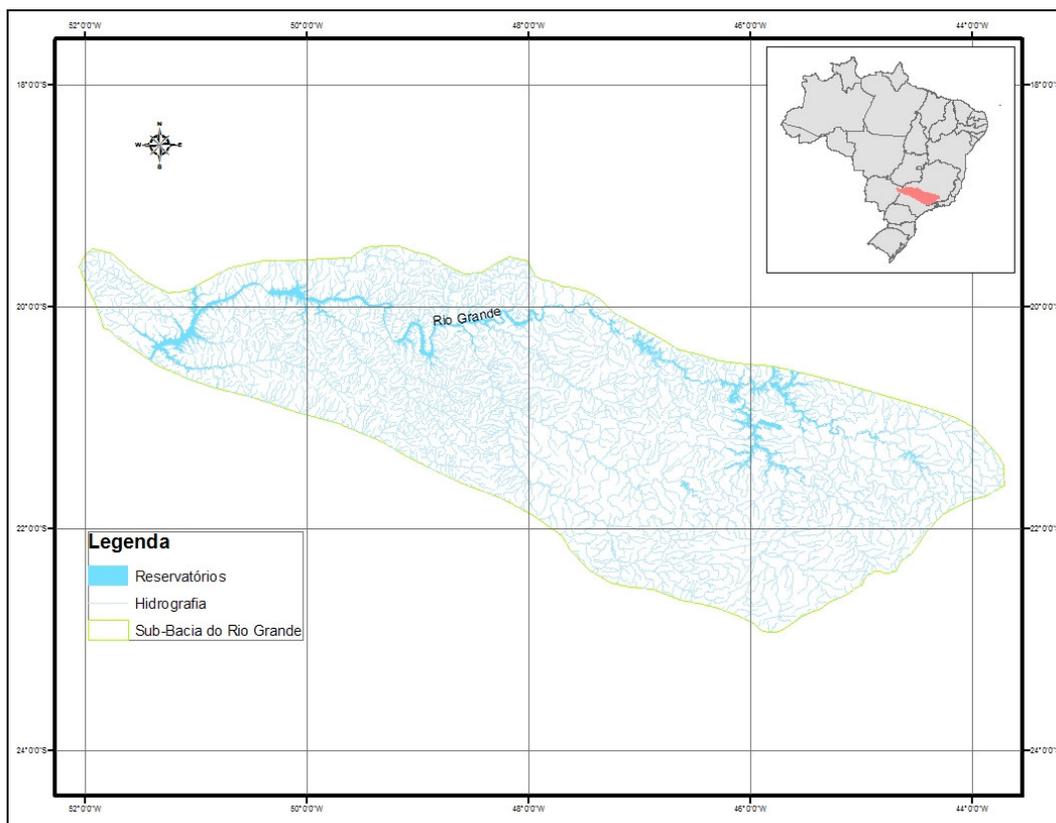


Figura 35: Localização da Bacia Hidrográfica do rio Grande.

A aplicação da metodologia de prospecção realizou-se em três etapas, conforme descrição que segue:

1. Seleção dos rios que possuem comprimento longitudinal superior a 25 km;

2. Cálculo do potencial hidráulico natural para os rios selecionados, de acordo com as etapas descritas a seguir:
 - a. Transposição de vazões para os corpos hídricos que não dispunham de dados;
 - b. Cálculo da vazão média de longo termo no exutório da bacia;
 - c. Determinação do comprimento do rio e áreas de drenagem (total e parcial por afluente);
 - d. Cálculo da declividade média dos rios selecionados – desconsiderando 25% dos extremos;
 - e. Cálculo da Potência Hidráulica Natural para os rios selecionados, adotando um rendimento global de 90%;
3. Aplicação da metodologia de prospecção de potenciais hidrelétricos.

7. RESULTADOS

7.1. RIO SAPUCAÍ

Com os resultados das simulações, construíram-se gráficos representando a variação das Potências e do Iq_h ao longo do rio Sapucaí (Figura 36 e Figura 37).

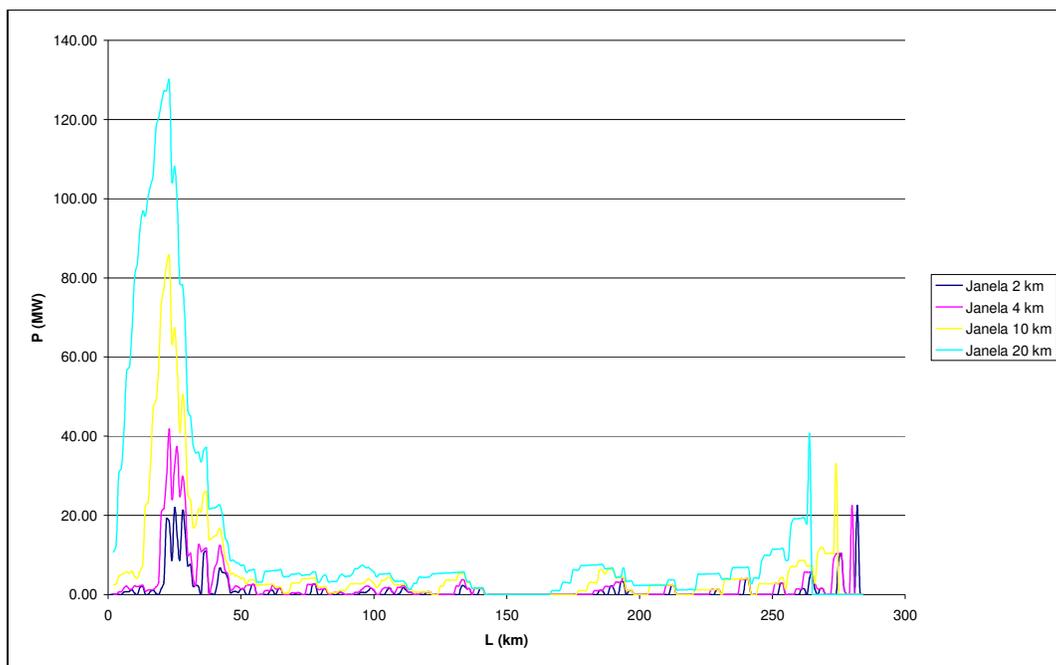


Figura 36: Potências no rio Sapucaí utilizando as vazões de jusante nas janelas de 2, 4, 10 e 20 km.

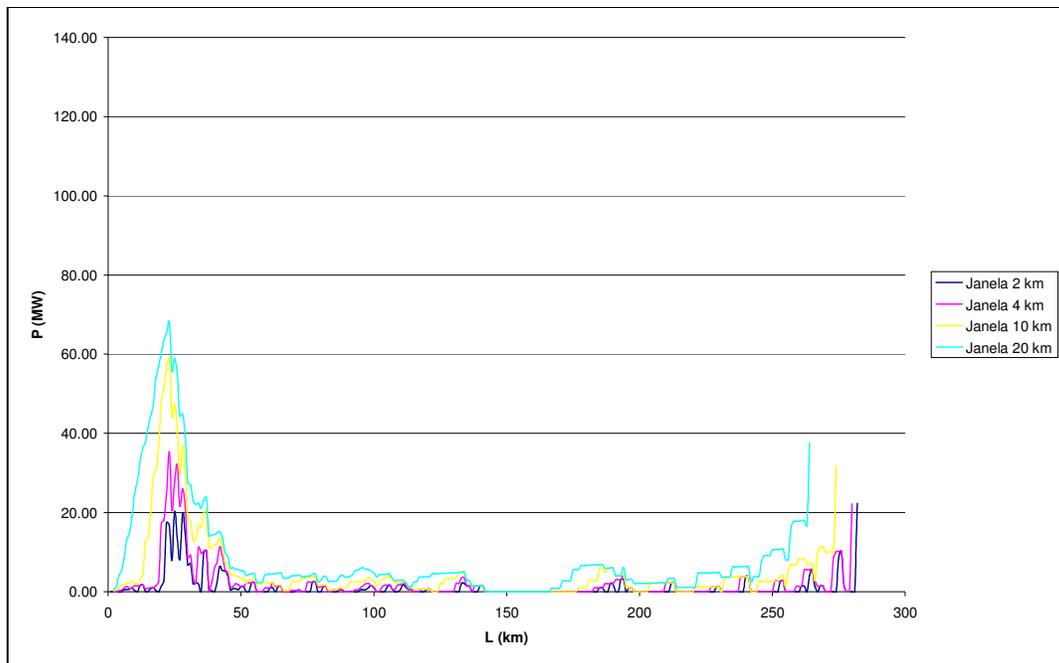


Figura 37: Potencias no rio Sapucaí utilizando as vazões de montante nas janelas de 2, 4, 10 e 20 km.

Observa-se na Figura 36, para D igual a 20 km, um grande potencial a montante de Itajubá (L=50 km). Entretanto, ele é ineficaz, dada a altura da barragem. Para o mesmo D, vê-se perto da foz (L=250 km), um significativo potencial de baixa queda, o que é mais viável. Quando se reduz o D, observa-se uma diminuição dos potenciais de jusante, mas, os de montante podem-se tornar viáveis. Entretanto, eles exigiriam um arranjo de desvio.

Na Figura 37 vê-se que os potenciais de montante diminuem, mas se tornaram viáveis, pois suas barragens serão pequenas. Entretanto, existem trechos de vazão reduzida (TVR), que neste caso, corresponde à distância D. Assim, avalia-se que trechos superiores a 4 km poderão ser inviáveis, restringindo a busca a Ds de 2 Km e 4 km para este tipo de centrais.

Com a utilização das ferramentas de GIS, os gráficos representados nas Figuras acima foram convertidos em vetores para melhor visualizar os resultados. Da Figura 38 a Figura 45 representa-se à variação das potencias ao longo do rio Sapucaí para as diferentes janelas móveis.

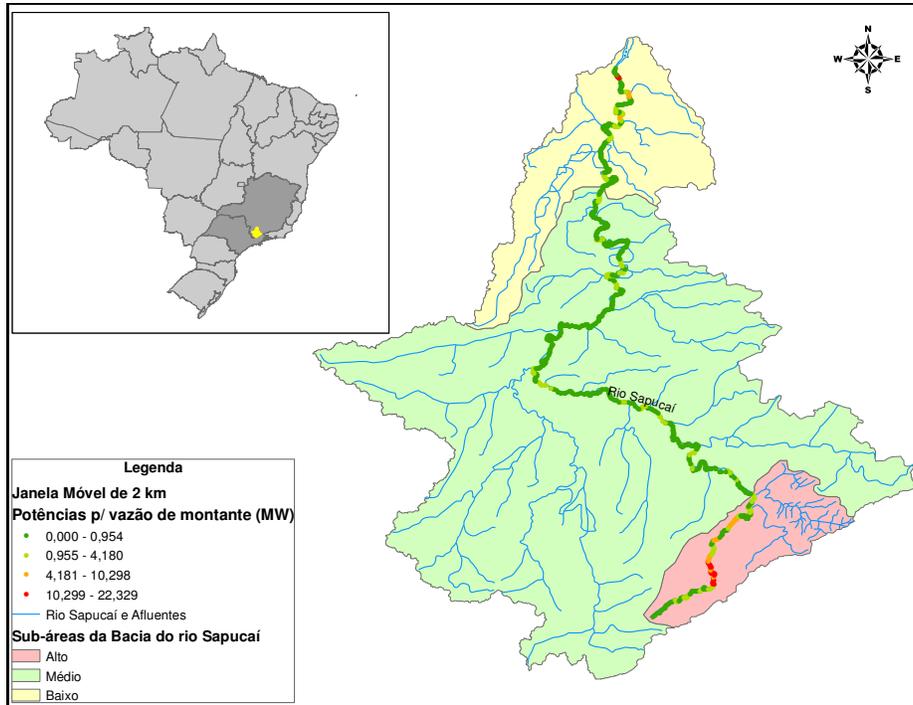


Figura 38: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 2 km e vazão de montante.

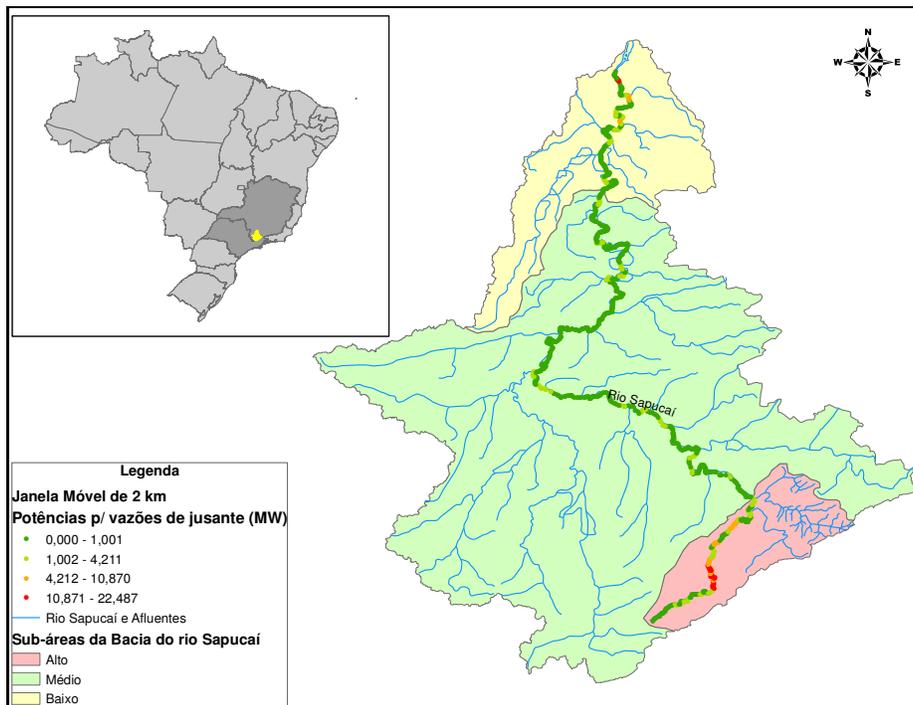


Figura 39: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 2 km e vazão de jusante.

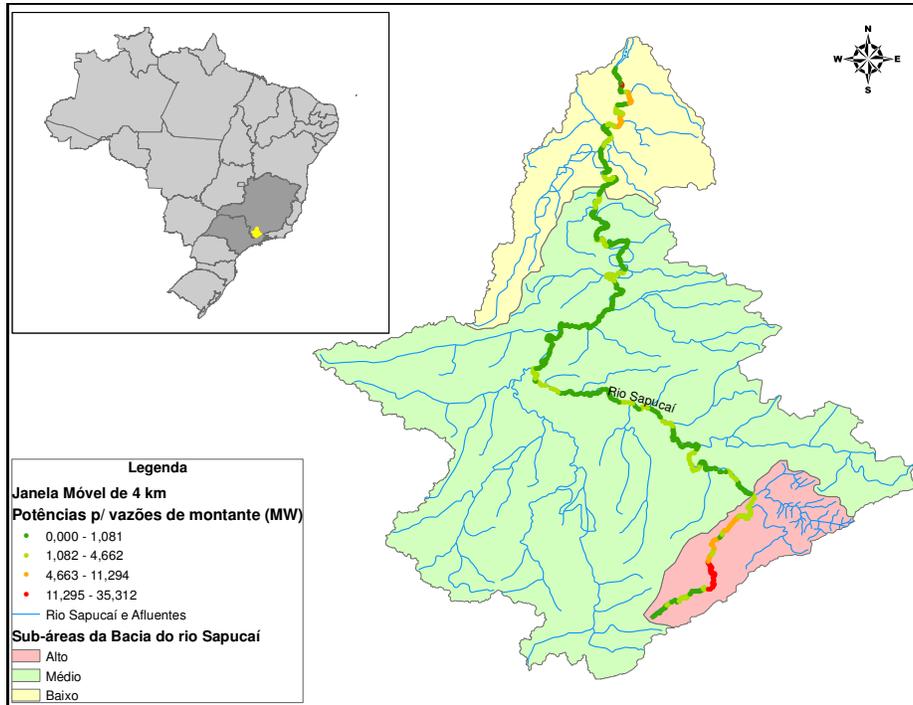


Figura 40: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 4 km e vazão de montante.

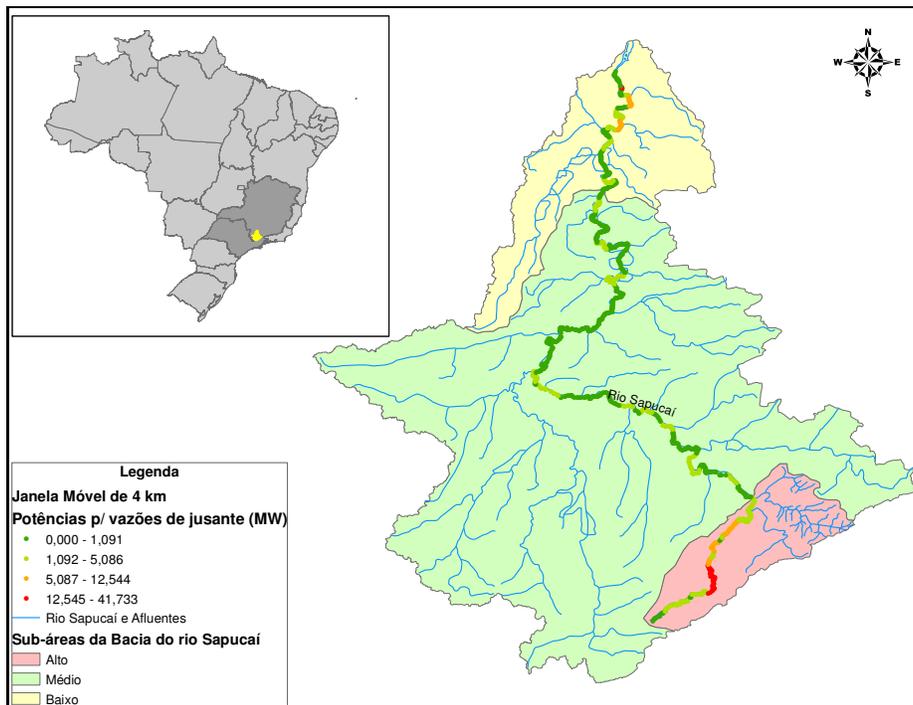


Figura 41: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 4 km e vazão de jusante.

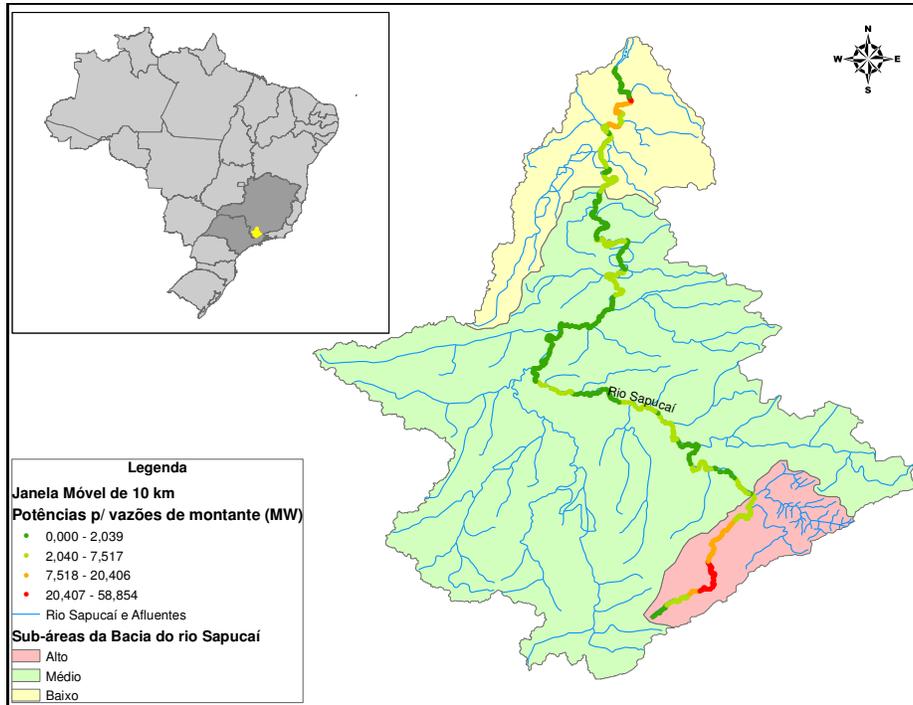


Figura 42: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 10 km e vazão de montante.

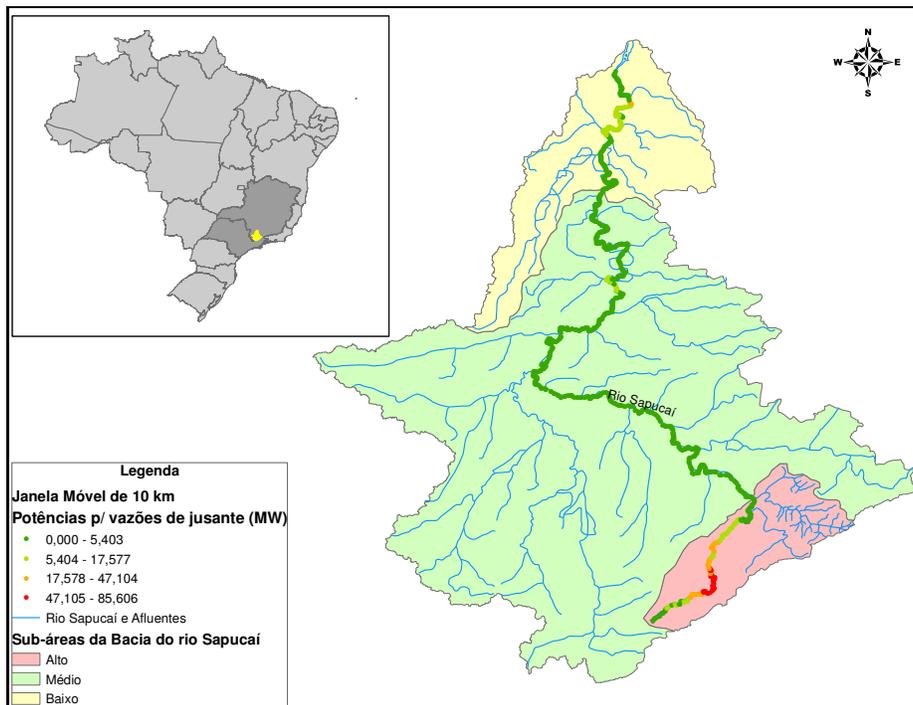


Figura 43: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 10 km e vazão de jusante.

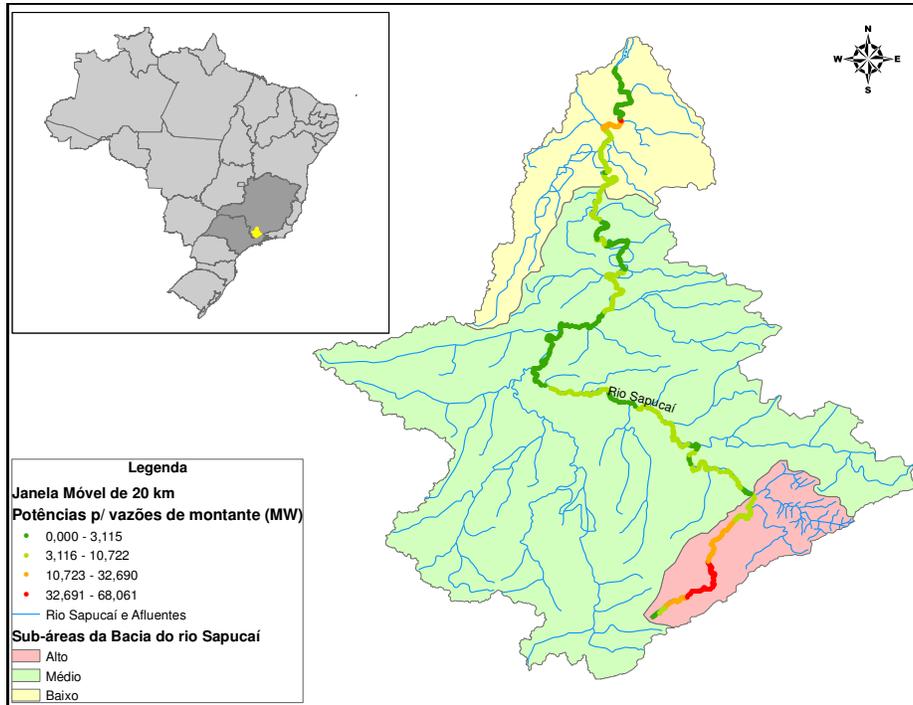


Figura 44: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 20 km e vazão de montante.

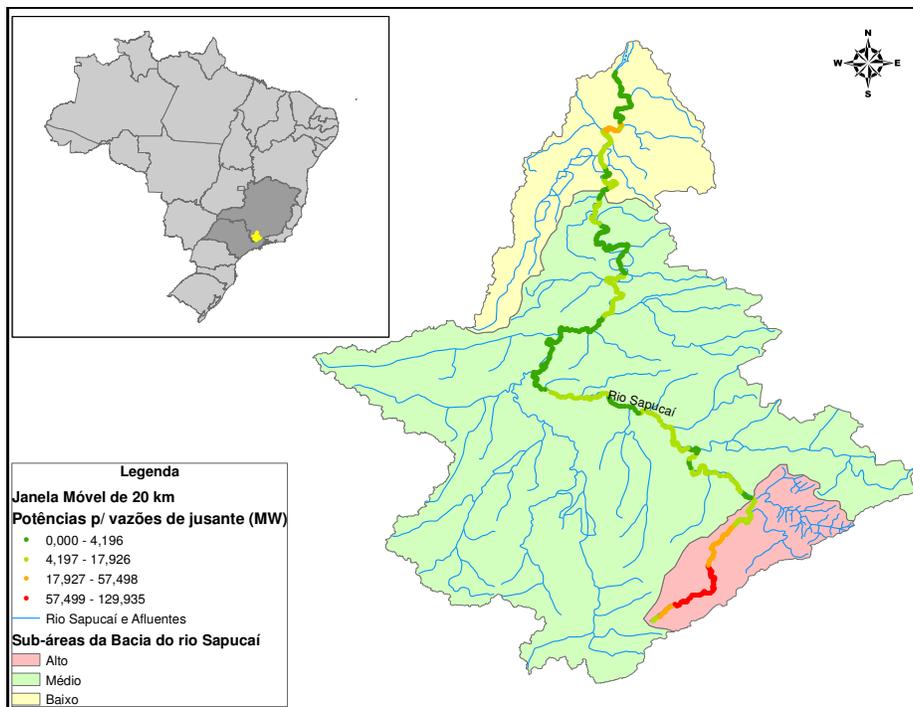


Figura 45: Variação das potências ao longo do rio Sapucaí utilizando a janela móvel de 20 km e vazão de jusante.

Observando-se as Figuras 37 a 44, nota-se que independente da janela e da vazão utilizada, os potenciais hidrelétricos identificados concentram-se nas regiões próximas da nascente do rio Sapucaí, variando não a localização dos potenciais, mas sim a amplitude das potências, indicadas pela variação do range de cores.

As cores em vermelho e laranja indicam as maiores potências identificadas no rio, e ao aproximar-se dos tons verdes, entende-se que as potências são as mais baixas ou até mesmo nulas, indicando assim, as regiões de m potencial e menor aptidão hidrelétrica.

Como as informações de potências são georreferenciadas, torna-se possível avaliar neste ponto, as questões socioeconômicas, ambientais e até mesmo de infra-estrutura existente na região, como acessos aos locais dos aproveitamentos e interligação à rede de Transmissão.

Com a aplicação da metodologia de prospecção de potenciais no rio Sapucaí, identificou-se inicialmente um conjunto de 10 potenciais (Figura 46), cujas características seguem na Tabela 8.

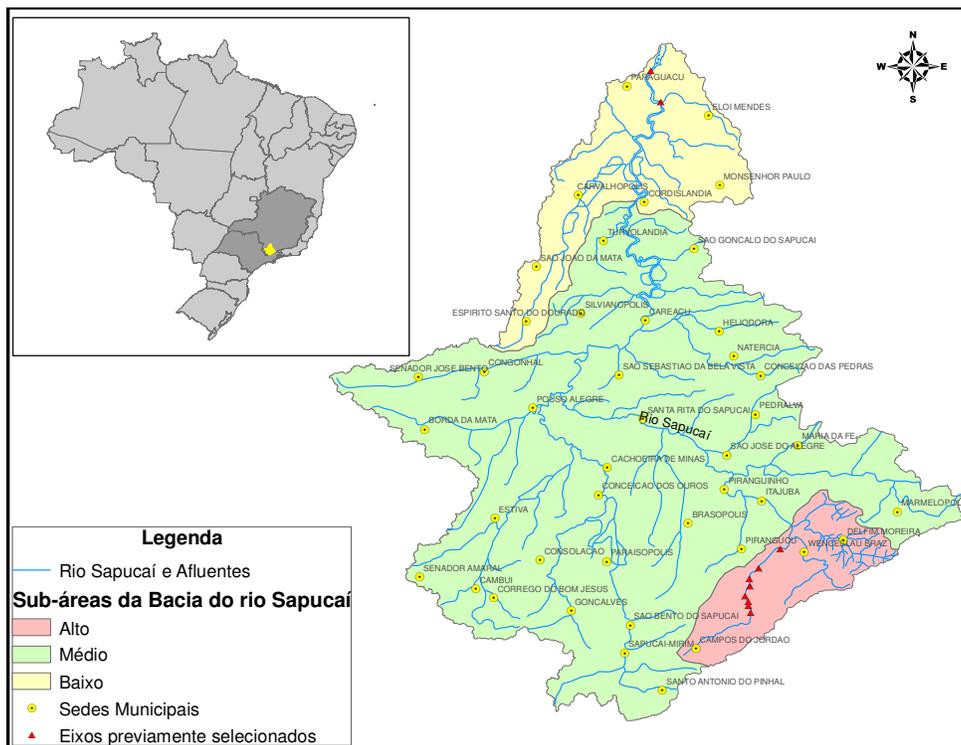


Figura 46: Partição de queda inicial no rio Sapucaí.

Tabela 8: Características dos potenciais identificados preliminarmente no rio Sapucaí.

Empreendimento	H bruta (m)	TVR (km)	Dist. Foz (km)	Ares (km ²)	AD (km ²)	Q (m ³ /s)	P (MW)
PCH 1	13,00	0,00	0,00	3,16	9502,0	181,28	23,50
PCH 2	16,00	0,00	9,50	10,30	9429,0	179,89	29,00
PCH 3	45,00	0,08	305,16	0,77	413,82	12,68	6,20
PCH 4	30,00	0,00	315,41	1,10	380,52	11,66	4,70
PCH 5	45,00	0,01	319,12	0,26	265,52	8,14	4,00
PCH 6	55,00	1,56	321,72	0,11	259,32	7,95	4,80
PCH 7	125,00	1,65	324,44	0,07	193,82	5,94	8,00
PCH 8	25,00	0,00	324,75	0,24	166,32	5,10	1,70
PCH 9	135,00	2,00	328,77	0,12	162,82	4,99	7,40
PCH 10	155,00	1,32	332,35	0,03	157,00	4,81	8,20

Após a sobreposição de layers ambientais identificou-se que os eixos 8, 9 e 10 estão inseridos em Área de Proteção Ambiental, o que inviabiliza a implantação dos mesmos. Desta forma, a partição de queda existente no rio Sapucaí conta com a presença de 7 aproveitamentos hidrelétricos, sendo 5 na região próxima a nascente, e 2 na foz do rio Sapucaí, próximo ao lago de Furnas (Figura 47).

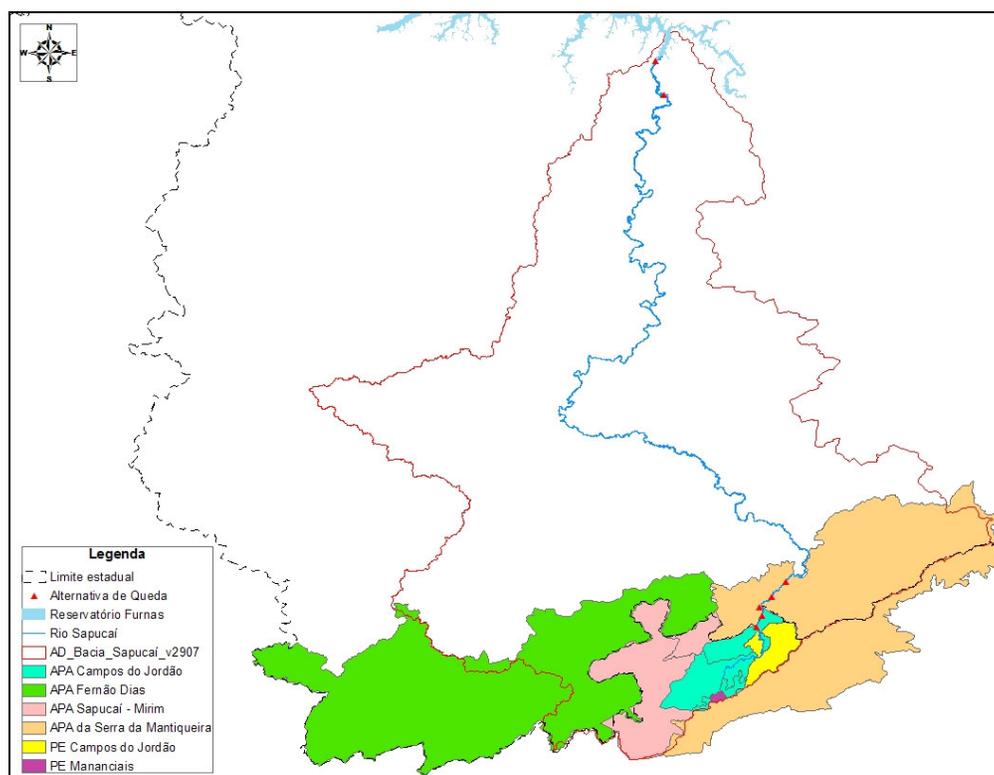


Figura 47: Variável ambiental e a seleção dos potenciais hidrelétricos no rio Sapucaí.

A mesma análise pode ser feita utilizando-se outros layers como acesso, linhas de transmissão, terras indígenas, sedes municipais e outras variáveis. O geoprocessamento, aliado aos resultados da prospecção, auxilia na tomada de decisão, já que com estas ferramentas torna-se possível avaliar a viabilidade dos potenciais encontrados.

As análises devem integrar ainda o Iqh, em que verifica-se a qualidade hidráulica dos aproveitamentos. A Figura 48 que segue, relaciona tal índice à variação de cotas do rio Sapucaí.

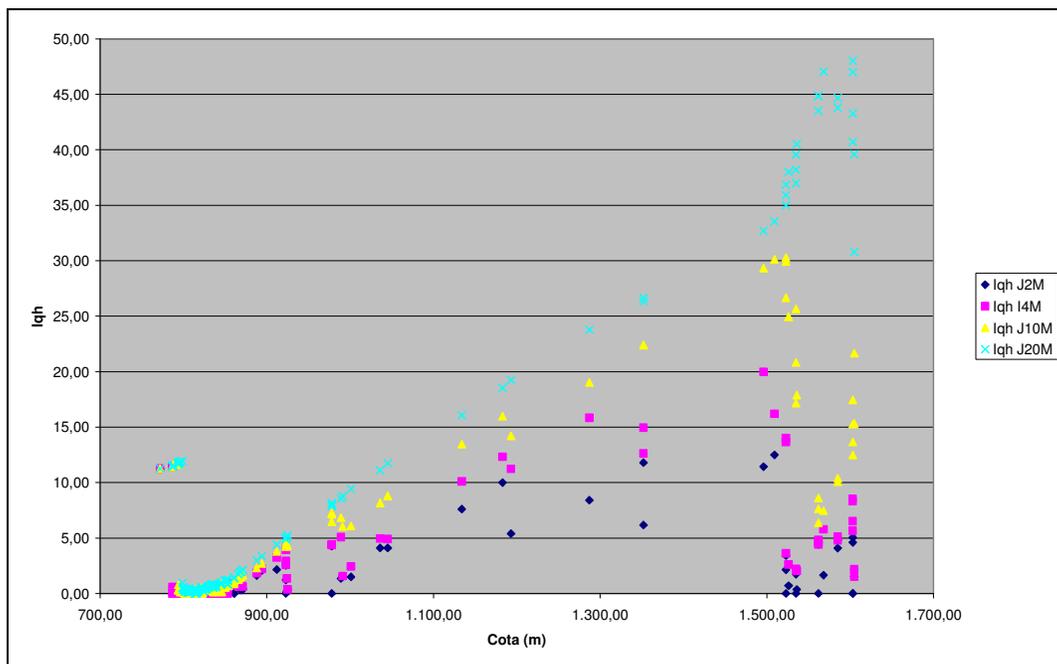


Figura 48: Iqh ao longo do rio Sapucaí.

Na Figura 47, observa-se que independente da janela móvel utilizada, o Iqh nas cotas mais elevadas (entre 1500 e 1700 m), ou seja, na região da nascente do rio Sapucaí, registra valores maiores quando comparados com os índices relacionados às cotas entre 750 e 900 m, que são típicas da foz do rio em estudo.

Isso significa que em aproveitamentos de desvio, ou seja, que possuem queda natural concentrada e vazões menores, as máquinas hidráulicas podem ser menores e mais baratas, e para esse caso, as turbinas tipo Francis operam com eficiência.

Já nas regiões em que os Iqh's são baixos, os potenciais possuem pouca queda e grandes vazões, o que requer máquinas maiores e mais caras, do tipo axial.

Entende-se desta forma que o I_{qh} é um índice que auxilia na definição preliminar do tipo de máquina a ser utilizada, e que valores mais altos ou mais baixos remetem somente a qualidade hidráulica do aproveitamento ou os futuros investimentos com as turbinas.

7.2. BACIA DO RIO GRANDE

Aplicou-se a metodologia de prospecção de potenciais hidrelétricos como forma de verificar os resultados obtidos comparado com o cenário atual dos aproveitamentos existentes na bacia.

A base em SIG, proporciona a sobreposição das informações de potência dos 150 rios onde aplicou-se a metodologia, aos layers de usinas existentes, como forma de comparar se a metodologia indica os locais onde as centrais já encontram-se implantadas.

Verificou-se que além da coincidência de localização dos potenciais existentes na bacia, a potência destas centrais também foi confirmada com a aplicação do modelo, consistindo o modelo tanto no tocante a espacialização quanto na metodologia desenvolvida para obtenção e cálculo das potências nos rios. A Figura 49 ilustra os rios estudados na bacia do rio Grande.

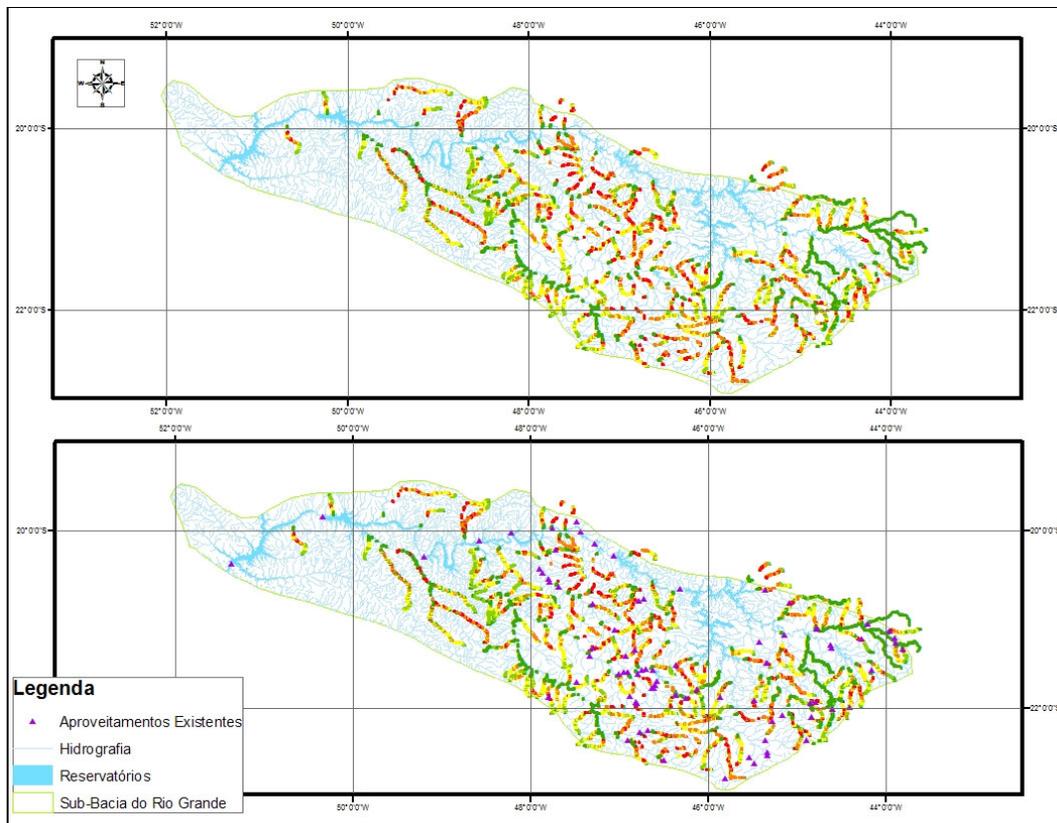


Figura 49: Resultado da aplicação do modelo e comparação com as centrais hidrelétricas existentes.

Na observação da Figura 49, verifica-se o potencial ainda disponível na bacia, que podem variar desde centrais com baixa queda, a potenciais com grandes quedas concentradas, ambos com uma ampla escala de potencias variando desde micro centrais hidrelétricas a grandes aproveitamentos.

8. CONCLUSÕES

O modelo proposto foi aplicado ao rio Sapucaí e à bacia do rio Grande. Na primeira área de estudo, o objetivo principal foi verificar a existência de potenciais hidrelétricos no curso d'água, e compara os resultados obtidos com os estudos mais detalhados realizados na região.

Na bacia do rio Grande, o principal objetivo foi de consistir a metodologia, através de um comparativo entre os resultados obtidos com a aplicação da ferramenta de prospecção de potenciais e as usinas existentes na bacia, verificando a coincidência dos mesmos.

Os resultados obtidos mostram que além de localizar espacialmente as potências calculadas no curso d'água, a metodologia gera informações do tipo de arranjo, do comprimento do reservatório e do desvio do rio, e uma análise preliminar do tipo de máquina hidráulica que melhor se adequa ao aproveitamento identificado.

Em relação às outras metodologias utilizadas com o mesmo propósito, a ferramenta aqui proposta, apresenta vantagens ligadas principalmente à agilidade de obtenção de resultados e a garantia de eficiência de identificação dos potenciais.

As diversas metodologias descritas na presente dissertação apóiam-se em estudos de escritório e campanhas de campo, bem como na utilização de dados que podem mascarar a realidade do potencial de um rio, como é o caso dos modelos que utilizam cartas topográficas na prospecção.

Além disso, tais modelos não geram informações espaciais de extrema importância como localização de potenciais juntamente com as questões sócio-econômicas e ambientais da região de interesse, bem como a definição preliminar do arranjo e das máquinas hidráulicas dos aproveitamentos da partição de queda identificada.

Uma das vantagens e inovações do modelo proposto é a utilização de ferramentas de SIG e modelos digitais de terreno (SRTM), que garantem a eficácia e a agilidade da metodologia.

O SRTM apresenta algumas limitações, sendo que a de maior relevância para o presente modelo é a questão da região de estudo. Em certos casos, onde a área é densamente vegetada, o SRTM pode entender a cota altimétrica como sendo a do topo das árvores, gerando informações inconsistentes em relação às centrais identificadas.

Entretanto, este fato não gera desvantagens como no caso dos outros modelos utilizados, já que mesmo com o valor de altitude alterado, o presente modelo consegue identificar o potencial no rio, o que não é a realidade das outras ferramentas, visto que em certas regiões do País as cartas topográficas disponíveis apresentam escala inadequada para as prospecções. Assim após a identificação preliminar dos potenciais em regiões que possuem áreas densamente vegetadas, recomenda-se um serviço de apoio de campo.

Finalizando, segue aqui algumas sugestões de melhoria do modelo de prospecção de potenciais hidrelétricos.

- Automação do processo de obtenção das áreas de drenagem para cada ponto do rio;
- Integrar as ferramentas de GIS ao processo de calculo das janelas móveis, em interface amigável;

9. BIBLIOGRAFIA

- Ávila, C.J.C.P., et al. Uso de ferramentas de SIG para inventário preliminar de potenciais remanescentes. Departamento de Geografia – Universidade de Brasília, 2007.
- ADEME, *Energie-Cités Splash Spatial Planning for Small Hydro*, 2005.
- Atlas do desenvolvimento humano no Brasil, perfil municipal, 2002.
- Barros, R. S.; et al. Avaliação do modelo Digital de Elevação do SRTM na ortoretificação de imagens LandSat 7 – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. Artigo apresentados no XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 2005.
- Clemente, L. Seleção da potência instalada ótima de PCHs no contexto de mercados competitivos. Dissertação apresentada na Universidade Federal do Paraná, 2001.
- Costa, T.; et al. Cap. 5 - Turbo máquinas hidráulicas. Escola superior de tecnologia universidade do Algarve. Área departamental de engenharia civil, núcleo de hidráulica e ambiente, 2001.
- Diagnóstico das condições de saneamento dos municípios do entorno do lago de Furnas – MG, Forum-Lago. ALAGO, 2005.
- DIAS, J. J. G., Avaliação Técnica e Econômica da Implantação de Geradoras Hidrelétricas Descentralizadas, dissertação de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.
- ELETROBRAS. Diretrizes para projetos de PCH. Cap 2 - Tipos de pequenas centrais hidrelétricas, 1997.
- Filho, R. F. F. Avaliação do Potencial Hidráulico em Bacias Hidrográficas por meio de Sistemas de Informações Geográficas. Dissertação defendida na Universidade Federal de Viçosa, 2007.
- Filho, G.L.T; et al. Um Panorama das Pequenas Centrais no Brasil; Simpósio de Pequenas e médias centrais hidrelétricas , Florianópolis, 2006.

- Junior, L. U. R.; Contribuições metodológicas visando a outorga do uso de recursos hídricos para geração hidrelétrica. Dissertação de Mestrados defendida na Universidade Federal de Itajubá, 2004.
- Primo, K. R.; Peixoto, A. S. P. Regionalização de vazões para a Bacia Hidrográfica do rio Sapucaí, Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba – PR, 2003.
- Santos, A.H.M., Filho, G.L.T., Metodologia Simplificada para Estudos Dinâmicos de Centrais Hidrelétricas, Visando a Determinação das Turbinas, paper publicado na Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH, Vol. 2 Nº.2 Jul/Dez 1997.
- Santos, et al. Diagnóstico Energético e Recomendações para a Geração de Energia Elétrica no Estado de Santa Catarina, Sistema CELESC, 2003.
- Souza, Z., Fuchs, R.D., Santos, A. H. M., Centrais Hidro e Termelétricas, São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá, MG: Escola Federal de Engenharia, 1983.
- Souza, Z. PCH de Baixa Queda. Trabalho apresentado na 5º Reunião do Grupo de Trabalho Sobre Hidromecânica, Uruguai, 1999.
- Souza, Z.; Santos, A.H.M.; Bortoni, E.C. Centrais Hidrelétricas: Estudos para Implantação. Centrais Elétricas Brasileiras S. A. – ELETROBRÁS, 1999.
- Souza, Z.; Filho, G. L. T. O limite energético aproveitável de um potencial hidroenergético de um curso d'água. Artigo apresentado no VI Simpósio brasileiro sobre pequenas e médias centrais hidrelétricas, Belo Horizonte – MG, 2008
- Schumann, G. et al. *Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM*, 2007
- Valeriano, M. M. *Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data*, 2005.

Acessos aos Sites:

<http://srtm.usgs.gov/data/coveragemaps.php>, acesso em Fevereiro de 2008.

www.unicamp.br, acesso em abril de 2008

www.aneel.gov.br, acesso em Março de 2008 e Janeiro de 2007

www.bndes.gov.br, acesso em Outubro de 2007

[//erg.usgs.gov/isb/pubs](http://erg.usgs.gov/isb/pubs), acesso em fevereiro de 2008.

www.ibge.org.br, acesso em 2002.