

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DAS BACIAS DOS RIOS MADEIRA E TOCANTINS E SUA RELAÇÃO COM CLIMA ATUAL E PROJEÇÕES FUTURAS

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)

Lucas Chilelli da Silva
(Universidade Federal de Itajubá, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: chilelli.unifei@gmail.com

Daniel Andres Rodrigues (CCST/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: daniel.andres@inpe.br

Rita de Cássia Silva von Randow (CCST/INPE, Colaboradora)
E-mail: rita.vonrandow@inpe.br

CACHOEIRA PAULISTA
JULHO DE 2013

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DAS BACIAS DOS RIOS MADEIRA E TOCANTINS E SUA RELAÇÃO COM CLIMA ATUAL E PROJEÇÕES FUTURAS

Lucas Chilelli da Silva

Relatório final de projeto de iniciação científica apresentado como pré-requisito para conclusão das atividades previstas no cronograma 2012/2013 no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais junto ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq)

Orientador: Daniel Andres Rodrigues

Colaboradora: Rita de Cássia Silva von Randow

CACHOEIRA PAULISTA
JULHO DE 2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, que através de sua luta e dos valores morais a mim passados, tornaram possível chegar aonde cheguei.

Dedico este trabalho também a todos aqueles que através de seu conhecimento, paciência e dedicação transferem suas experiências para o mundo e tornam possível o avanço tecnológico da humanidade, os professores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Dr. Daniel Andres Rodrigues pela oportunidade de desenvolver este trabalho junto ao Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos e por todos os conhecimentos transmitidos ao longo deste projeto. Agradeço também à Dra. Rita de Cássia Silva von Randow por todo o suporte prestado durante o desenvolvimentos das atividades e pelas discussões sempre produtivas. Agradeço à José Lazáro Siqueira Junior por todas as idéias e sugestões oferecidas sempre de bom grado.

Por último, agradeço à minha companheira Laís C. P. Araújo por sempre me incentivar até mesmo nos momentos mais difíceis, e pelas palavras de apoio em todos os momentos.

“... um cientista deve ser como uma criança. Se ele vê algo, deve dizer o que está vendo, independentemente daquilo ser o que ele imaginava ver ou não. Ver primeiro, testar depois. Mas sempre ver primeiro. Senão você só vai ver o que você espera ver.”

Douglas Adams - Até mais, e obrigado pelos peixes!

RESUMO

Um reservatório de água é resultado da ação antrópica no ambiente, seja pela construção de uma barragem, seja pela formação artificial de um lago para os mais diversos fins, como abastecimento de água, aproveitamento hidroelétrico, lazer, entre outros. Os reservatórios formados por usinas hidroelétricas impactam diretamente os ecossistemas da área de entorno, alterando por exemplo os padrões do microclima da região pelo aumento da área disponível para evaporação. Por outro lado, a capacidade de armazenamento pode ser afetada por mudanças climáticas que possam vir a ocorrer, afetando o regime de vazões das quais esses reservatórios são dependentes para manter a finalidade para a qual foram construídos. O setor elétrico brasileiro passa por um momento de contínua expansão e a maior fonte de energia renovável do país é exatamente a hidroelétrica, que corresponde a cerca de 88% da matriz renovável do Brasil. A partir dessa informação é possível perceber a importância do estudo do impacto que as mudanças climáticas terão nos padrões de operação e na disponibilidade hídrica para a geração de energia hidroelétrica. Das duas bacias hidrográficas estudadas a do rio Tocantins já possui grande parte de seu potencial aproveitado, cerca de 90%, enquanto que o rio Madeira constitui um grande potencial promissor para investimento. Atualmente estão em construção duas usinas no curso do rio Madeira, a Usina Hidroelétrica de Jirau e a Usina Hidroelétrica de Santo Antônio, ambas com mais de 3.000 Mw de potência instalada. O objetivo desse trabalho foi montar um banco de dados de vazões obtidos nas agências reguladoras de água e energia do Brasil e a partir desses dados inferir os planos de operação das hidroelétricas do Tocantins e Madeira. Foram geradas equações que relacionam a vazão afluente com a vazão defluente dos reservatórios nas duas bacias. Essas equações poderão ser incorporadas a modelos hidrológicos de grandes bacias como o desenvolvido pelo INPE (MGB/INPE), para que através de simulações de diferentes cenários de mudanças climáticas seja possível prever a disponibilidade hídrica e, por conseguinte avaliar se o potencial de energia hidroelétrica previsto para essas hidroelétricas será mantido. As simulações hidrológicas mostraram que as usinas de fio d'água não afetam as vazões dos rios de forma significativa, porém são muito mais susceptíveis as alterações no ciclo hidrológico e às variações de vazão nos rios, assim a geração de energia desses empreendimentos pode ser seriamente comprometida caso ocorram severas mudanças climáticas.

Palavras-chave: reservatórios, vazões, climatologia.

ABSTRACT

A water reservoir is the result of human action on the environment, either by building a dam, or by the formation of an artificial lake for various purposes such as water supply, hydroelectric, leisure, among others. The reservoirs formed by hydroelectric dams directly impact the ecosystems of the surrounding area, for example, changing the patterns of microclimate by increasing the area available for evaporation. On the other hand, the storage capacity can be affected by climate changes that may occur affecting the flow regime of these reservoirs which are dependent to maintain the purpose for which they were built. The Brazilian electric sector is going through a time of continued expansion and the largest source of renewable energy in the country is exactly the hydropower, which accounts for about 88% of Brazilians renewable matrix. From this information it is possible to realize the importance of studying the impact that climate change will have on patterns of operation and availability of water for hydropower generation. From the two watersheds studied the Tocantins River already has most of its potential tapped, about 90%, while the Madeira River is a major promising potential for investment. Currently there are two plants under construction in the course of the Madeira River, the hydroelectric plant of Jirau and Santo Antonio Hydroelectric Power Plant, both with more than 3,000 MW of installed power. The aim of this work was to assemble a database of flow obtained in the regulatory agencies of water and energy in Brazil and from these data to infer the plans of operation of hydropower dams in Tocantins and Madeira basins. Were generated equations that relate the inflow to the outflow in each reservoir on both basins. These equations can be incorporated into hydrological models of large basins such as that developed by INPE (MGB/INPE), so that through simulations of different climate change scenarios is possible to predict water availability and therefore evaluate if the potential of hydroelectric power planned for such plants will be maintained. The simulations showed that the run-of-the-river dams not affect river flows significantly, but are much more susceptible to changes in the hydrological cycle and the flow variations in rivers, thus generating electricity from these projects can be seriously compromised if severe climate changes occur.

Key-words: reservoirs, flows, climatology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 - Trajetória potencial do índice de aproveitamento dos recursos hidrelétricos nacionais. Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), 2007 ...	3
Figura 1-2 - Bacias do Rio Madeira e Tocantins.	4
Figura 2-1 - Rio Madeira e usinas de fio d'água.	7
Figura 2-2 - Bacia do Rio Tocantins-Araguaia e localização das UHE.....	9
Figura 3-1 - Esquema de reservatório e principais parâmetros.....	12
Figura 3-2- Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem.	16
Figura 3-3 - Esquema de cálculo de uma célula com dois blocos de uso do solo.	17
Figura 5-1 - Vazão média mensal para os trechos dos aproveitamentos hidroelétricos da bacia do rio Madeira.....	23
Figura 5-2– Vazão média mensal no trecho de cada aproveitamento da bacia do Rio Tocantins.	24
Figura 5-3 - Gráficos de vazões regionalizadas e vazões naturais de Jirau e Estreito do Tocantins.....	25
Figura 5-4 - Gráficos de vazão afluente versus vazão defluente dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Tocantins.....	26
Figura 5-5 - Volume médio dos reservatórios da bacia do Rio Tocantins.	27
Figura 5-6 - Comparação entre vazões observadas e simuladas a jusante da UHE Jirau.	28
Figura 5-7 - Comparação entre vazões observadas e simuladas para o trecho a jusante da UHE Santo Antônio.....	29
Figura 5-8 - Volume médio dos reservatórios do complexo do Rio Madeira para o período simulado no MGB.....	30
Figura 5-9 - Vazões críticas e energia firme para os trechos de Jirau e Santo Antônio no rio Madeira.	31
Figura 5-10– Vazões críticas e energia firme para os empreendimentos no rio Tocantins.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Energia assegurada para as UHEs na bacia do rio Madeira e do rio Tocantins. Fonte: ANEEL, 2012.	14
---	----

LISTA DE ABREVIACOES

FGV – Fundação Getúlio Vargas

MMA – Ministério do Meio Ambiente

ANA – Agência Nacional de gua

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	4
1.1.1	OBJETIVO GERAL.....	4
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
2	ÁREA DE ESTUDO.....	6
2.1	BACIA DO RIO MADEIRA.....	6
2.2	BACIA DO RIO TOCANTINS-ARAGUAIA.....	8
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1	USINAS HIDROELÉTRICAS.....	11
3.1.1	ENERGIA FIRME E ENERGIA ASSOCIADA.....	12
3.2	AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO.....	14
3.3	O MODELO DE GRANDES BACIAS.....	15
4	METODOLOGIA.....	18
4.1	SÉRIES DE VAZÕES.....	18
4.2	SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS NO MODELO DE GRANDES BACIAS.....	20
4.3	CÁLCULO DA ENERGIA FIRME.....	21
5	RESULTADOS.....	23
5.1	REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES.....	24
5.2	OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DAS BACIAS DO RIO MADEIRA E TOCANTINS.....	25
5.3	SIMULAÇÃO DO MODELO DE GRANDES BACIAS.....	28
5.4	ENERGIA FIRME E VAZÕES CRÍTICAS.....	31
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	33
7	CONCLUSÃO.....	35
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Os reservatórios de água são resultados de intervenções antrópicas no ambiente, seja pela construção de um barramento, seja pela formação artificial de um lago para as mais diversas finalidades, desde lazer até o aproveitamento hidroelétrico e de abastecimento de uma região (TUCCI, 2005). As vazões defluentes destes reservatórios são controladas e por isso causam um impacto no regime normal do curso d'água principal que abastece tal reservatório.

Devido às características de extensão desses reservatórios, ocorrem impactos no ciclo hidrológico, na dinâmica biológica e social do local de instalação, alterando o regime hidrológico, alterações que por vezes podem ser irreversíveis. Vale lembrar que nem sempre esses impactos são negativos, já que normalmente ocorrem avanços sociais na área do entorno do reservatório, geração de empregos, entre outros.

O planejamento inicial de construção de um reservatório leva em consideração as características naturais da região de instalação, considerando que o regime de precipitação obedeça a certa estacionariedade (CHOW, 1988). Porém, frente às alterações globais nas últimas décadas, não é possível prever com clareza que os regimes naturais continuarão a seguir o padrão que seguiam há cem anos (TUCCI, *et al.*, 1993). Por isso é preciso conhecer melhor as características dos sistemas dos quais a operação de empreendimentos hidráulicos dependem; e não só isso, também é preciso avaliar a viabilidade frente essas mudanças, das atuais políticas de operação de cada reservatório e da implantação de novas políticas que impliquem em benefícios para todos.

O setor elétrico brasileiro passa por um momento de contínua expansão, a maior parte da geração de energia elétrica no país se dá através da geração hidroelétrica, que responde por aproximadamente 88% da parcela referente a energia produzida por fontes renováveis de energia no Brasil. As políticas atuais,

principalmente o Programa de Incentivo às Fontes Renováveis de Energia Elétrica (PROINFA) criado em 2002, incentivam a implantação de empreendimentos alternativos como parques eólicos e pequenas centrais hidroelétricas, além de usinas de biomassa (MME, 2011). No entanto a energia hidroelétrica ainda é o principal foco dos estudos de expansão da geração elétrica no Brasil devido ao enorme potencial ainda inexplorado, principalmente na bacia amazônica, que segundo dados de inventário da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) possui atualmente apenas 10% do seu potencial sendo aproveitado.

As bacias hidrográficas estudadas neste trabalho encontram-se em posições opostas no tocante a sua exploração e aproveitamento, de um lado está a bacia do rio Madeira, que começou atualmente a ser explorada e, do outro, a bacia do rio Tocantins-Araguaia que é uma das principais do país, e que já é explorada desde o século passado.

A bacia do Rio Tocantins-Araguaia, que constitui um importante pólo de geração hidroelétrica no país devido à sua localização geográfica, já está quase em seu limite de exploração legal (EPE, 2007). Grande parte da bacia do Tocantins fica dentro do bioma Cerrado, que é protegido por diversas leis ambientais. Levando em consideração as restrições de caráter ambiental e terras indígenas, a bacia do Tocantins possui apenas mais 10% de seu potencial inventariado passível de aproveitamento (EPE, 2007). Como mostram as projeções para o ano de 2030 haverá aumento considerável no aproveitamento do potencial da bacia do rio Amazonas, onde o rio Madeira é um dos maiores contribuintes para a geração hidroelétrica (EPE, 2007).

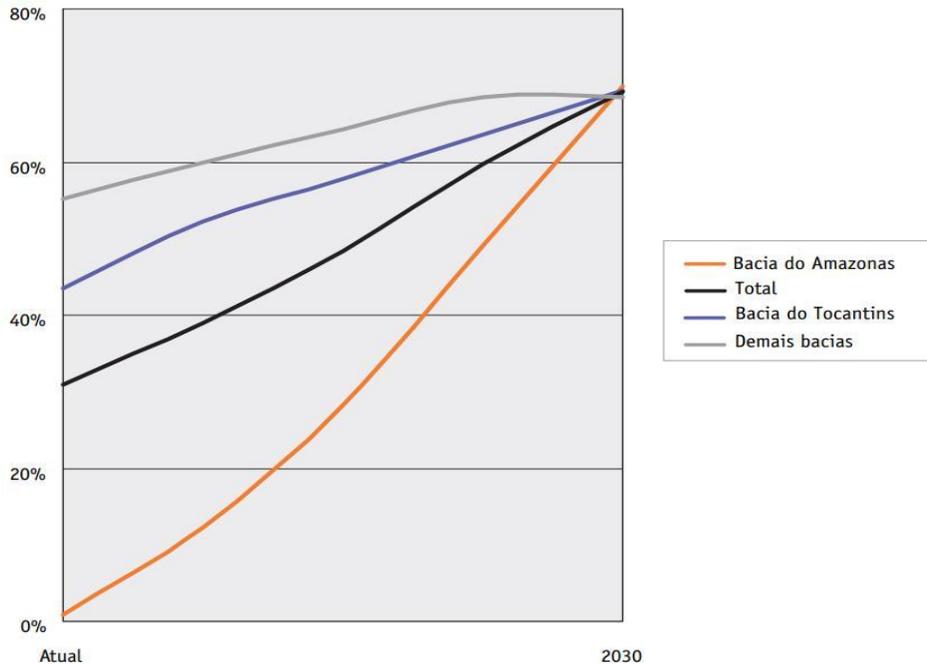


Figura 1-1 - Trajetória potencial do índice de aproveitamento dos recursos hidrelétricos nacionais. Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), 2007

É possível por meio da figura 1-1 perceber o potencial existente na bacia Amazônica e para a bacia do Tocantins-Araguaia, por isso é importante prever quais são as mudanças que poderão ocorrer nos sistemas naturais no decorrer dos anos (FGV, MMA e ANA, 2003). Grande parte dos empreendimentos em projeto para a bacia amazônica consistem em usinas de fio d'água que são aquelas que não possuem reservatórios de grande extensão, aproveitando somente o escoamento do próprio rio para a geração e escoando o excesso através dos vertedouros projetados. As bacias hidrográficas estudadas neste trabalho estão identificadas na Figura 1-2.

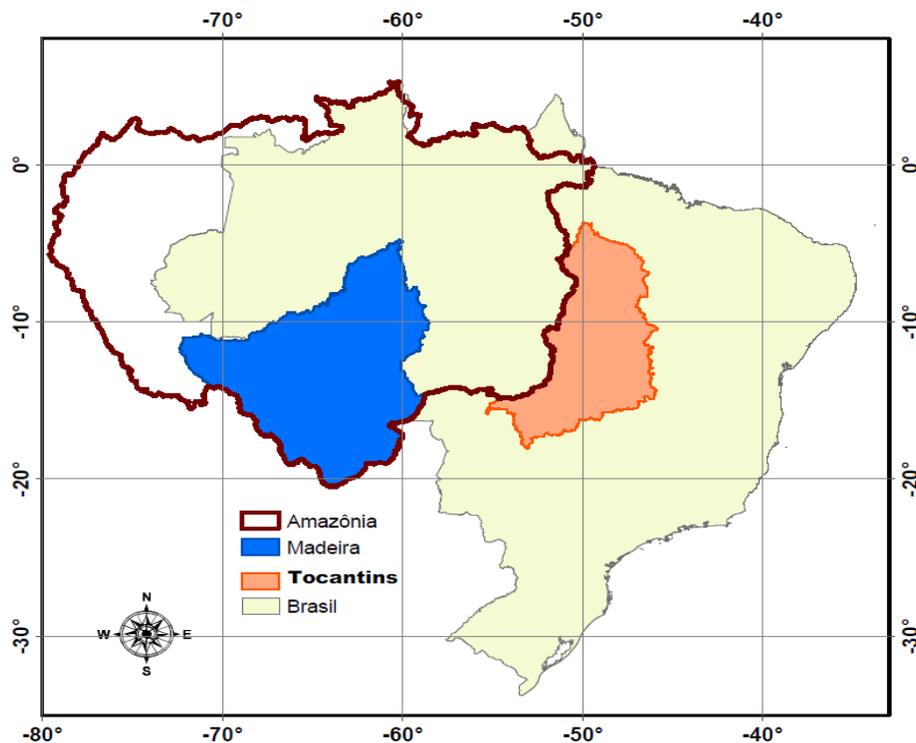


Figura 1-2 - Bacias do Rio Madeira e Tocantins.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho foi montar um banco de dados de vazões obtidos nas agências reguladoras de água e energia do Brasil e a partir desses dados inferir os planos de operação das hidroelétricas do Tocantins e Madeira. Foram geradas equações que relacionam a vazão afluente com a vazão defluente dos reservatórios nas duas bacias. Essas equações poderão ser incorporadas a modelos hidrológicos de grandes bacias como o desenvolvido pelo INPE (MGB/INPE), para que através de simulações de diferentes cenários de mudanças climáticas seja possível prever a disponibilidade hídrica e, por conseguinte avaliar se o potencial de energia hidroelétrica previsto para essas hidrelétricas será mantido.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Montar um banco de dados de vazões “naturais” (aquelas que seriam medidas se não houvesse a existência da barragem) e observadas com a existência da barragem, para as bacias dos Rios Madeira e Tocantins;
- Avaliar os impactos causados pela operação de barragens nas vazões desses dois rios;
- Fornecer subsídios para avaliar os possíveis impactos de mudanças climáticas nas políticas de operação das barragens.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 BACIA DO RIO MADEIRA

A bacia em estudo está localizada na margem esquerda do rio Amazonas, banhando, no Brasil, os estados de Rondônia e do Amazonas. A bacia do rio Madeira possui uma área de drenagem de aproximadamente 1.324.727 km² (MMA, 2006a). A bacia representa 23% do total da bacia Amazônica e se estende pela Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%), possuindo as seguintes unidades proporcionais: Andes (15%), planície Amazônica (44%) e território brasileiro (41%) (MMA, 2006a).

O clima da região da bacia do Rio Madeira, no Brasil, é classificado como variando de úmido a super-úmido, isso devido ao fato de a região receber uma intensidade média anual de chuvas da ordem de 2.460mm (MMA, 2006a). As temperaturas médias anuais situam-se entre 25° e 29° C.

As chuvas na Amazônia, consideradas como provindas essencialmente do Oceano Atlântico, apresentam, no entanto, uma forte reciclagem (cerca de 50%) principalmente na porção central da calha do Amazonas, por evapotranspiração da própria floresta como destacado em SALATI e MARQUES (1984) e apresentado em (MMA, 2006a). O máximo pluviométrico ocorre de dezembro a março.

A bacia do Rio Madeira, localizada na Bacia Amazônica, ainda não é largamente explorada para geração de energia. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (2007), a bacia do Rio Madeira possui um potencial para geração hidroelétrica de aproximadamente 13.144 MW. Atualmente estão em construção dois grandes empreendimentos de geração hidroelétrica, as usinas de Jirau e Santo Antônio, ambas localizadas no município de Porto Velho em Rondônia. Essas usinas constituem um pilar fundamental no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) devido à sua potência prevista de operação.

Os dois aproveitamentos em construção tem potencial para gerar aproximadamente 6.450,4 MW de energia, cerca de 49,7% do potencial estimado da bacia. Com base nestes dados pode-se ver o potencial que a região ainda guarda.

A localização dos empreendimentos hidrelétricos e a parte brasileira da bacia do rio Madeira podem ser observadas na Figura 2-1. Através dessa figura é possível perceber que os dois empreendimentos localizam-se em uma região bem ao sul da bacia, sendo que uma grande extensão ainda pode ser aproveitada para geração de energia. Como foi destacado pela EPE ainda existem cerca de 6.500 MW potencialmente aproveitáveis nesta bacia.

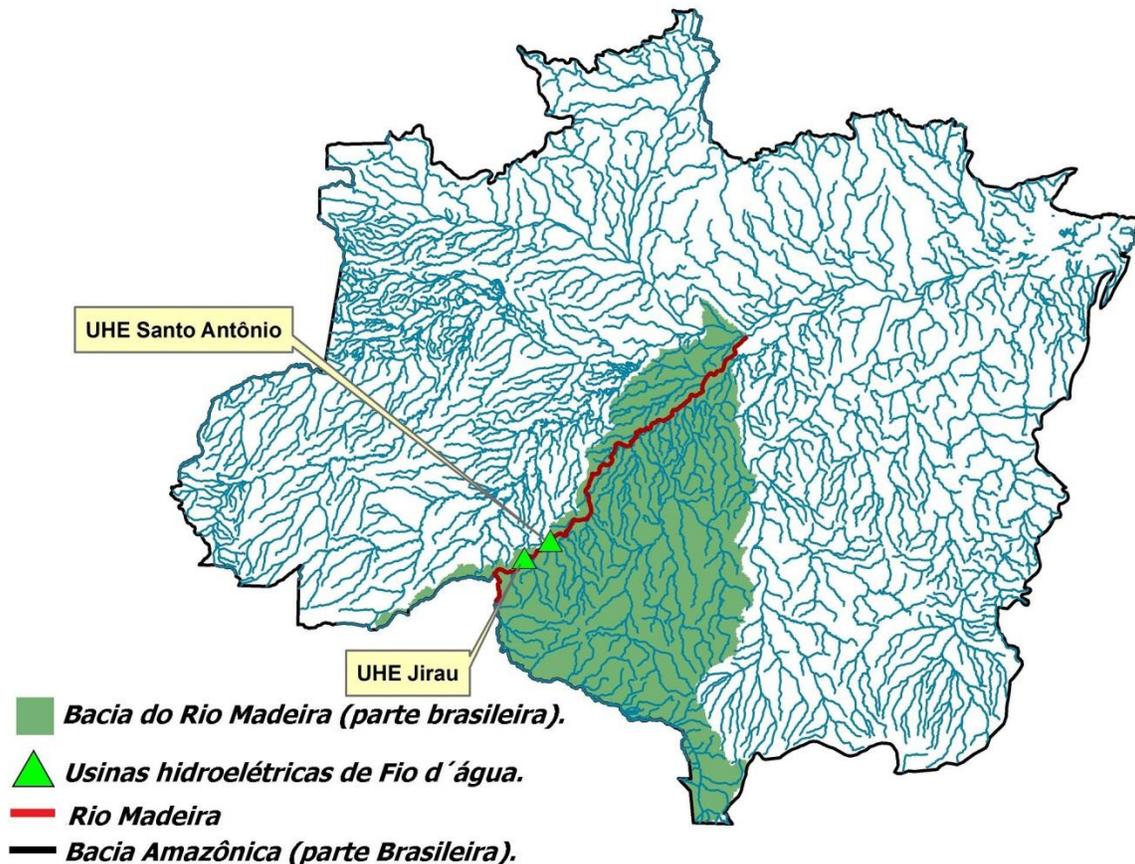


Figura 2-1 - Rio Madeira e usinas de fio d'água.

2.2 BACIA DO RIO TOCANTINS-ARAGUAIA

A bacia do Rio Tocantins-Araguaia, localizada na região Centro-Norte do país e predominantemente dentro do bioma Cerrado é uma das mais importantes do Brasil. Com uma área superficial de cerca de 918.237 km² (aproximadamente 11% do território nacional) constitui um ponto de interligação das redes de distribuição do Centro-Norte com o Sudeste do Brasil.

A região do Tocantins-Araguaia possui o clima Tropical, com temperaturas médias anuais de 26° C e dois períodos climáticos bem definidos: o chuvoso, entre Outubro e Abril onde ocorrem 90% das precipitações do ano, e o seco, de Maio a Setembro com baixa umidade relativa do ar. A precipitação média na bacia é da ordem de 1869 mm/ano, com máximo de 2.565 mm no litoral do Pará, enquanto a evapotranspiração real média é de 1.371 mm/ano (MMA, 2006b).

O regime de precipitações ocorre no sentido sul-norte, ou seja, com a diminuição da latitude. O menor índice de precipitação ocorre na divisa entre Goiás e a Região Nordeste, com médias de 1mm/mês entre Junho e Agosto. A faixa correspondente ao médio Tocantins-Araguaia as precipitações decrescem no sentido oeste-leste, de 1.850 para 1.000 mm/ano (MMA, 2006b).

Os principais fatores que influenciam na variação da temperatura ao longo da bacia do Tocantins-Araguaia é a latitude, que varia desde 2° até 18° Sul e a altitude, que varia entre 1.000 m, no ponto mais ao Sul da bacia, e 70 m na confluência do rio Tocantins com o rio Araguaia (FGV, MMA e ANA, 2003). As médias e máximas mensais são elevadas, porém devido a efeitos da continentalidade, as temperaturas durante a noite são bem amenas. As mínimas térmicas são originadas por frentes frias que avançam no sentido do equador vindas do Sul, raramente a temperatura fica abaixo de 10°C em todas as regiões da bacia.

A bacia do rio Tocantins-Araguaia já está próxima de seu potencial máximo de aproveitamento. Atualmente existem no curso principal (Rio Tocantins) oito

usinas hidroelétricas, entre elas Serra da Mesa e Tucuruí I e II, que estão entre as maiores do Brasil. A figura 2-2 mostra a bacia do Rio Tocantins-Araguaia e a localização dos empreendimentos hidrelétricos presentes no curso principal do Rio Tocantins. O número de empreendimentos nessa bacia cresceu a partir da década de 1990 e atualmente 90% do seu potencial já é utilizado para a geração de energia hidroelétrica. Essa bacia possui uma importante função devido a sua posição geográfica ela atua como um canal de interligação entre as redes Norte e Nordeste e o Sudeste do Brasil (EPE, 2007).

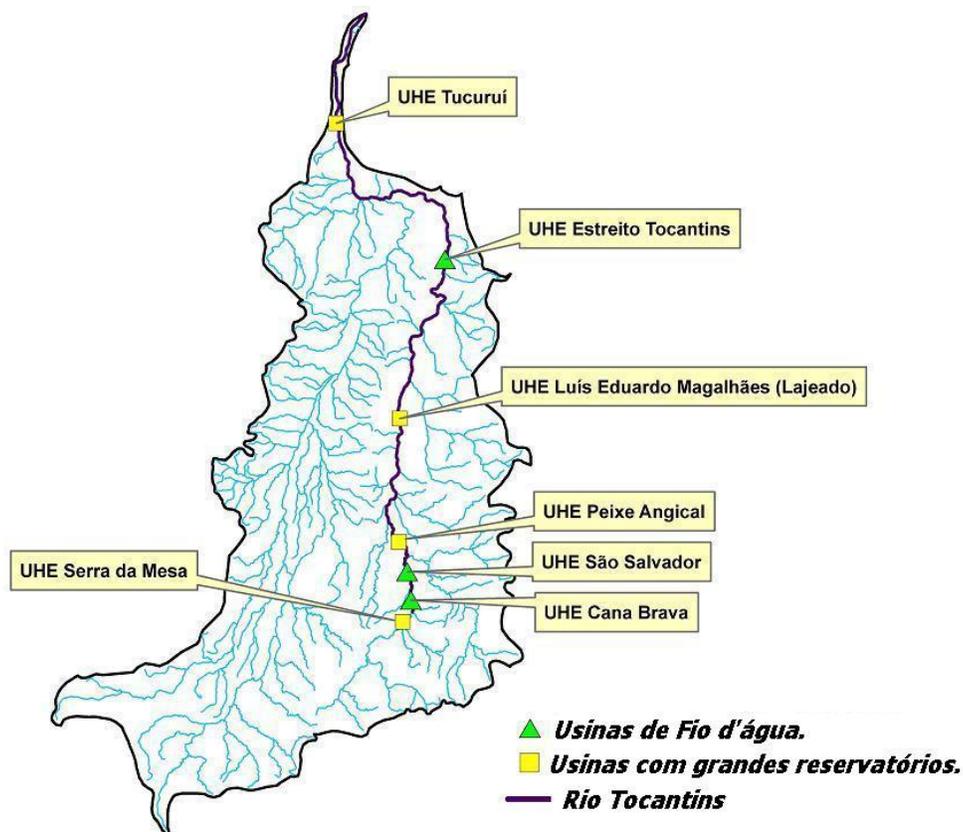


Figura 2-2 - Bacia do Rio Tocantins-Araguaia e localização das UHE.

O potencial hidrelétrico a aproveitar na bacia do Tocantins-Araguaia é avaliado em de pouco mais de 11.297 MW, sendo que os dois cursos d'água

principais da bacia (Tocantins e Araguaia) concentram mais de 75% desse valor (EPE, 2007). Desses 11.297 MW, apenas 910 MW estão disponíveis para aproveitamento direto, sendo que os outros 10.387 MW possuem uma série de restrições ambientais para sua utilização. Segundos dados da EPE (2007) o rio Tocantins, por exemplo, possui ainda um potencial de 5.918 MW, onde apenas 254 MW estão disponíveis para utilização sem alguma restrição ambiental.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 USINAS HIDROELÉTRICAS

Usinas hidroelétricas (UHEs) podem ser definidas como um conjunto de obras e equipamentos que tem como finalidade a geração de energia elétrica, através do aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio. O potencial hidráulico existente no rio deve-se à desníveis existentes entre seções do rio. Esses desníveis proporcionam um acúmulo de energia potencial gravitacional e essa energia é convertida em energia cinética conforme o volume de água se desloca para baixo, movimentando as turbinas da usina, que por sua vez alimenta um gerador que converte a energia mecânica em energia elétrica.

Uma usina hidroelétrica é constituída basicamente das seguintes partes:

- Barragem;
- Sistema de captação e adução de água;
- Casa de força;
- Sistema de restituição de água ao leito natural do rio.

A ANEEL adota três classificações para as usinas: Centrais Geradoras Hidrelétricas (com até 1 MW de potência instalada), Pequenas Centrais Hidrelétricas (entre 1,1 MW e 30 MW de potência instalada) e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE, com mais de 30 MW).

Os principais tipos de empreendimentos hidroelétricos em operação no Brasil podem ser classificados em relação aos seus respectivos reservatórios e são de dois tipos: de acumulação ou de fio d'água. Os primeiros, geralmente localizados na cabeceira dos rios, em locais de altas quedas d'água, dado o seu grande porte permitem o acúmulo de grande quantidade de água e funcionam como estoques a serem utilizados em períodos de estiagem. Além disso, como estão localizados a montante das demais hidrelétricas, regulam a vazão da água que irá fluir para elas, de forma a permitir a operação integrada do conjunto de

usinas. As unidades a fio d'água geram energia com o fluxo de água do rio, ou seja, pela vazão com mínimo ou nenhum acúmulo do recurso hídrico.

Os reservatórios afetam diretamente o regime climático local devido ao aumento da superfície de evaporação e da regularização das vazões defluentes. Os principais parâmetros relativos aos reservatórios estão destacados no esquema a seguir (Figura 3-1).

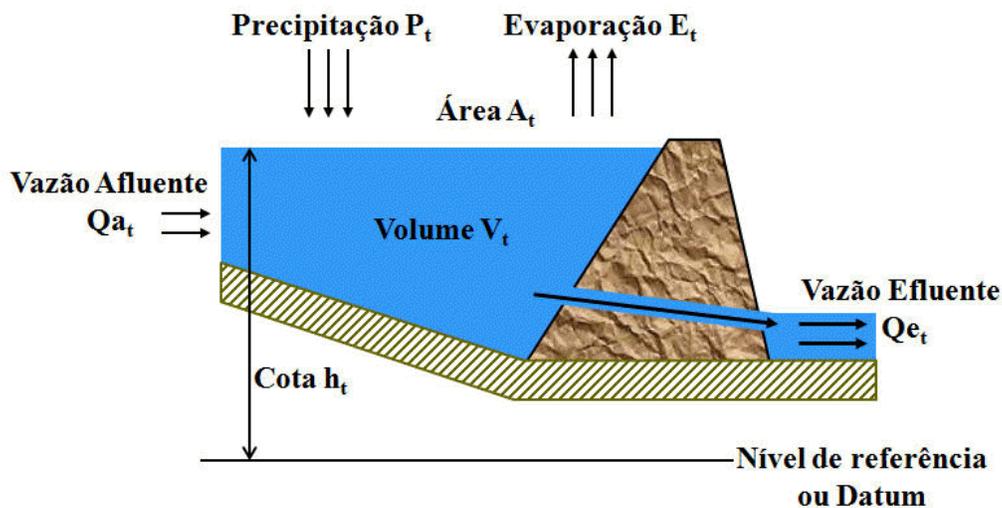


Figura 3-1 - Esquema de reservatório e principais parâmetros.

As UHEs são responsáveis por aproximadamente 70% da energia produzida no Brasil e por 88% da matriz energética renovável, por isso sua grande importância nos estudos relativos à mudanças climáticas e ao planejamento energético brasileiro.

3.1.1 ENERGIA FIRME E ENERGIA ASSOCIADA

A energia firme de uma usina hidrelétrica corresponde à máxima produção contínua de energia que pode ser obtida, supondo a ocorrência da seqüência mais seca registrada no histórico de vazões do rio onde ela está instalada (ANEEL, 2005). Os registros tanto do rio Madeira quanto do Rio Tocantins contam com uma série histórica de 35 anos, o que confere ao estudo boa confiabilidade. A energia firme pode ser calculada de forma simplificada através da seguinte expressão:

$$E_f [MW_m] = 0,0088 \times H_m \times Q_m \quad (1)$$

Onde:

E_f = Energia firme em Mega-Watts médios;

H_m = Queda Líquida média [metros];

Q_m = Vazão Líquida média [metros cúbicos por segundo].

0,0088 = Coeficiente correspondente ao produto da massa específica da água (1.000kg/m³), pelos rendimentos da turbina (0,93) e do gerador (0,97), pela aceleração da gravidade (9,81m/s²) e pelo fator 10⁻⁶ que permite expressar a energia em MW médios.

O cálculo da energia firme de aproveitamentos a fio d'água é mais simples porque a altura da queda não varia. Consequentemente, a queda líquida média é igual a queda nominal (GUILHERME, 2012). Neste caso, a energia firme passa a depender apenas da vazão.

Segundo a definição da ANEEL (2005), a energia assegurada do sistema elétrico brasileiro é a máxima produção de energia que pode ser mantida quase que continuamente pelas usinas hidrelétricas ao longo dos anos, simulando a ocorrência de cada uma das milhares de possibilidades de sequências de vazões criadas estatisticamente, admitindo certo risco de não atendimento à carga, ou seja, em determinado percentual dos anos simulados, permite-se que haja racionamento dentro de um limite considerado aceitável pelo sistema. Na regulamentação atual, esse risco é de 5%.

A energia assegurada dos principais empreendimentos das bacias de estudo está apresentada na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Energia assegurada para as UHEs na bacia do rio Madeira e do rio Tocantins. Fonte: ANEEL, 2012.

Usina Hidrelétrica	Bacia hidrográfica	Energia assegurada (MW médios)
Jirau	Rio Madeira	2184,60
Santo Antônio	Rio Madeira	2218
Lajeado	Rio Tocantins	510,1
São Salvador	Rio Tocantins	147,8
Serra da Mesa	Rio Tocantins	671
Peixe Angical	Rio Tocantins	271
Estreito Tocantins	Rio Tocantins	532,7
Tucuruí I e II	Rio Tocantins	4140
Cana Brava	Rio Tocantins	273,5

3.2 AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E O SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

Devido ao perfil da matriz energética brasileira que é predominantemente renovável e, portanto, dependente das variáveis ambientais, o entendimento das tendências globais de mudanças climáticas e seus efeitos no planejamento do setor energético brasileiro são de grande importância.

As mudanças climáticas podem afetar, por exemplo, os regimes de vazões de uma certa localidade alterando o período de secas ou as vazões máximas e mínimas, conseqüentemente a geração hidrelétrica da bacia será seriamente afetada. Um estudo recente de Stickler et al. (2013) simulou as vazões em diversos cenários de desmatamento da floresta Amazônica e na bacia do rio Xingu para prever a vazão do rio Xingu, os resultados mostram que o aumento do desmatamento ocasionam uma redução significativa, em torno de 15%, nas precipitações da bacia. Como os empreendimentos em construção nessa bacia são de fio d'água, sendo assim dependentes do regime natural do rio, a

diminuição das precipitações afetaria seriamente a disponibilidade hídrica e energética para essa bacia.

Os impactos que a mudança do clima global pode ter sobre o sistema hidrelétrico brasileiro variam consideravelmente. Segundo Schaeffer et al. (2008) esse impactos viriam das alterações no comportamento médio das vazões nas bacias dos rios que produzem energia, ou de alterações na probabilidade de ocorrência de eventos extremos (como tempestades e secas extremas).

As reduções nas vazões não devem ter um efeito proporcional sobre a geração de energia porque os reservatórios agem como amortecedores, gerenciando a quantidade de água disponível (SCHAEFFER, *et al.*, 2008). Uma boa gestão de reservatórios pode compensar uma parte da perda de vazão. Por outro lado, a elevação na temperatura teria um impacto sobre a evaporação de água dos reservatórios, particularmente naqueles de dimensões muito grandes. Assim, uma análise das mudanças na evaporação em consequência de temperaturas mais altas também é importante. Mas isso teria de ser investigado em futuros estudos.

3.3 O MODELO DE GRANDES BACIAS

O modelo de grandes bacias é um modelo de simulação hidrológica desenvolvido através da integração entre diversas metodologias de cálculo de parâmetros como evapotranspiração, escoamento no solo, balanço de água no solo, entre outros. De acordo com COLLISCHONN (2001) o modelo é composto pelos seguintes módulos:

- balanço de água no solo;
- evapotranspiração;
- escoamentos: superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula;
- escoamento na rede de drenagem.

A bacia hidrográfica é dividida em células ligadas entre si por canais de drenagem. Toda a bacia é classificada segundo grupos que contêm as combinações mais frequentes de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo (COLLISCHON, 2001).

O tamanho das células é suficientemente grande para se considerar que o escoamento entre células se faça apenas através da rede de drenagem, ou seja, pelos principais rios. A precipitação e os dados climatológicos em uma célula são obtidas por interpolação dos dados dos postos de chuva e dos postos climatológicos mais próximos. O balanço hídrico no solo é realizado de maneira independente para cada bloco de uso, utilizando as características e os parâmetros do bloco. A figura a seguir mostra como o modelo discretiza a bacia através de células quadradas ligadas entre si apenas pelos canais de drenagem.

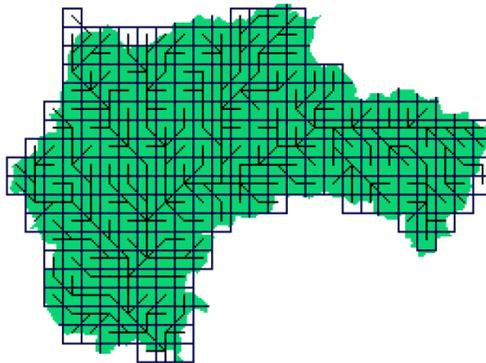


Figura 3-2- Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem.

Fonte: COLLISCHON, 2001.

Na rede de drenagem o escoamento é propagado e somado, conforme as características dos rios e das confluências, chegando ao exutório da bacia. Os hidrogramas de vazão podem ser avaliados no exutório da bacia bem como em qualquer outro ponto ao longo da rede de drenagem representada. O modelo divide a bacia hidrográfica em células quadradas. Cada célula, por sua vez, é dividida em blocos, definidos pela cobertura e pela capacidade de armazenamento do solo.

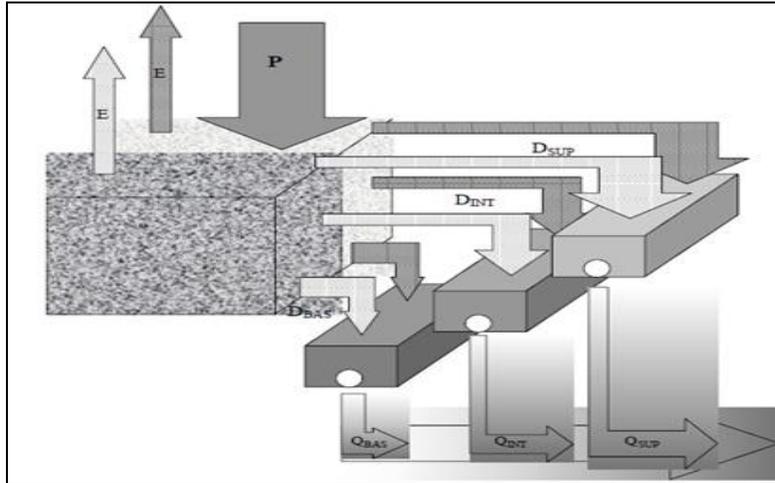


Figura 3-3 - Esquema de cálculo de uma célula com dois blocos de uso do solo.

Fonte: COLLISCHON, 2002.

O balanço de armazenamento no solo é realizado de maneira independente para cada um destes blocos. A figura 3-3 mostra o esquema de cálculo do escoamento e evaporação em uma célula que contém dois blocos de uso do solo.

4 METODOLOGIA

4.1 SÉRIES DE VAZÕES

Para que seja possível estudar o efeito das mudanças climáticas no regime de vazões é preciso primeiro estudar o comportamento dessas vazões ao longo do tempo. Para isso foram obtidas as séries históricas de vazões naturais, aquelas que deveriam existir se não houvesse intervenção antrópica na bacia, e as vazões observadas, aquelas medidas diretamente *in situ*, das duas bacias hidrográficas estudadas. Essas séries têm início no ano de 1970 e vão até o ano de 2010, totalizando 40 anos de dados, o tamanho da série permite que as simulações reflitam de forma confiável o comportamento hidrológico das bacias.

Os dados de vazão foram organizados de forma a fornecer o perfil de vazões durante o período de dados. Dessa forma, foram obtidos as vazões máximas e mínimas, os períodos de cheias e secas e a série crítica de vazões.

Para os locais onde não haviam dados de vazão observados, foi utilizada uma metodologia de regionalização de vazões através da interpolação linear, apresentada pela ELETROBRÁS (1985) a qual obtém as vazões relativas à seção de interesse utilizando as vazões correspondentes às seções fluviométricas mais próximas. Assim, quando a seção de interesse encontra-se entre dois postos fluviométricos a vazão na seção de interesse é igual à vazão na seção de montante mais um incremento da vazão proporcional ao aumento da área de drenagem entre a estação de montante e a de jusante e é dado pela expressão a seguir:

$$Q_z = Q_m + \left(\frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} \right) (Q_j - Q_m) \quad (2)$$

Onde:

Q_z = vazão na seção de interesse, m³/s

Q_m = vazão no posto de montante, m³/s

Q_j = vazão no posto de jusante, m^3/s

A_z = área de drenagem na seção de interesse, km^2

A_m = área de drenagem do posto de montante, km^2

A_j = área de drenagem do posto de jusante, km^2

A operação dos reservatórios obtida através de dados fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) foi utilizado para estimar a série de vazões de operação de cada reservatório das bacias estudadas, de forma que fosse possível estabelecer relações de vazões afluentes (a montante do reservatório) versus vazões defluentes (vazões a jusante do reservatório), essa vazões são utilizadas pelo MGB para simular as vazões de saída das células que contém algum reservatório. A partir destes dados também foi possível obter as séries de volumes mensais dos reservatórios.

Os aproveitamentos hidrelétricos na bacia do rio Madeira ainda estão em fase de construção, não se dispõem de séries de operação dos mesmos, portanto para estimar sua operação foram feitas análises de semelhanças entre os empreendimentos de fio d'água presentes na bacia do rio Tocantins. Essas análises levaram em consideração a altura da queda de água, o número e tipo das turbinas e o regime de vazão do trecho do rio. Através de uma extrapolação do perfil de vazões do rio Tocantins para os volumes do rio Madeira, assumindo um regime de estacionaridade, foram obtidas as vazões de operação dos reservatório desta bacia. O aproveitamento hidroelétrico de São Salvador foi o escolhido para representar os dois aproveitamentos da bacia do rio Madeira. As características principais para essa escolha foram:

- Queda líquida, no caso 22 metros, enquanto que Jirau possui queda de 19 metros e Santo Antônio, uma queda de 15,1 metros.
- Tipo de reservatório, no caso todas elas são de fio d'água.
- Perfil de vazão no trecho considerado: elas apresentam o mesmo perfil de vazão diferindo apenas nos volumes.

Com base nos dados de operação da UHE São Salvador, foram feitas as devidas adaptações para as usinas do rio Madeira, como por exemplo, número de turbinas utilizadas e a vazão nominal destas.

Para o estudo da operação dos reservatórios das bacias do Tocantins-Araguaia e do rio Madeira, foram obtidas as políticas de operação desses reservatórios, que estabelecem as vazões mínimas por período e as vazões máximas para determinadas épocas do ano.

Para se saber a confiabilidade das equações de vazão afluente versus vazão defluente foi utilizado um parâmetro que serve para descrever o grau de relação entre os valores emparelhados x e y de uma amostra, esse parâmetro é chamado de coeficiente de correlação de Pearson (R^2) e seu valor é calculado pela expressão (3). Sendo que se o valor de R^2 está próximo de zero então não há relação significativa entre os dados da amostra, porém se os valores de R^2 estiverem próximos de 1 concluímos que existe uma correlação significativa entre os dados da amostra.

$$R = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (3)$$

Onde: n =número de pares de dados, $\sum x$ representa a soma das amostras do eixo x e $\sum y$ a soma das amostras do eixo y .

4.2 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS NO MODELO DE GRANDES BACIAS

A partir das relações de vazões afluentes versus vazões defluentes, foi possível estabelecer polinômios de primeira ordem que representam a vazão defluente de cada reservatório nas bacias estudadas. Essas equações foram incorporadas ao MGB junto com uma rotina de leitura dos dados de entrada e simulações dos reservatórios.

As rotinas inseridas no MGB tem a função de a cada iteração nas células que contém reservatório calcular a vazão de saída dessa célula em função do polinômio que representa a vazão do respectivo reservatório. A linguagem de programação utilizada foi o FORTRAN 90.

As simulações efetuadas no MGB foram efetuadas para o período iniciando no ano de 1970 até o ano de 1990. Esse período foi escolhido por ser o período escolhido para a calibração do modelo para futura utilização na análise de mudanças climáticas. Alguns gráficos comparando as vazões simuladas e as vazões observadas estão apresentadas no capítulo 5.

Como não houve tempo hábil para calibrar o modelo MGB referente à bacia do rio Tocantins, não foi possível obter resultados do modelo utilizando a inserção dos reservatórios desta bacia.

4.3 CÁLCULO DA ENERGIA FIRME

O cálculo da energia firme de cada reservatório levou em consideração os conceitos apresentado do item 3.1.1. Para os reservatórios de fio d'água o cálculo se faz bastante simples já que a altura da queda d'água é considerada constante.

O período crítico para a bacia do rio Madeira foi considerado como sendo o conjunto de menores vazões já registradas para cada mês do ano. Como os aproveitamentos hidrelétricos dessa bacia são de fio d'água, o deplecionamento do reservatório será a variação na descarga do próprio rio (ANEEL, 2005).

Para a bacia do rio Tocantins, considerou-se como período crítico as médias da série de vazões, e o cálculo da energia firme levou em consideração o valor médio de volume do reservatório para ter uma queda líquida fixa que gere um resultado que abranja tanto os períodos onde os valores são maiores, quanto os que os valores são menores que a média. A equação utilizada para o cálculo da energia firme foi a expressão **(1)**.

O cálculo de energia firme para os aproveitamentos de fio d'água dessa bacia levou em consideração os mesmo fatores que os da bacia do rio Madeira (Queda Líquida e vazão do período crítico).

5 RESULTADOS

Com o banco de dados de vazões formado, o primeiro resultado obtido foi o perfil médio de vazões ao longo do ano. A figura 5-1 mostra o regime de vazões para os trechos dos dois aproveitamentos hidroelétricos no rio Madeira. A bacia do rio Madeira apresenta as mínimas vazões usualmente no mês de setembro, enquanto as máximas vazões ocorrem no mês de Março. A figura mostra as vazões observadas em duas estações próximas aos locais dos aproveitamentos.

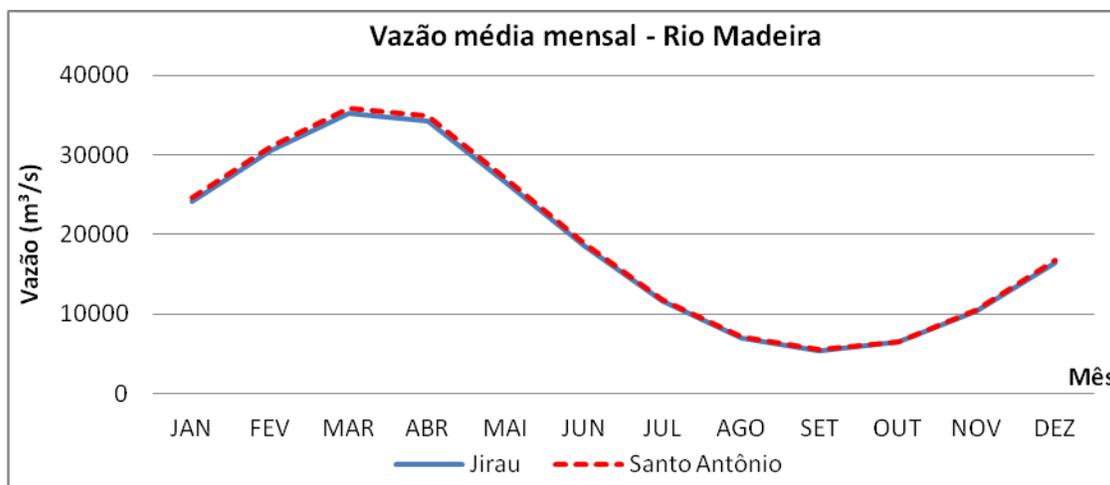


Figura 5-1 - Vazão média mensal para os trechos dos aproveitamentos hidroelétricos da bacia do rio Madeira.

As vazões máximas na bacia do Tocantins ocorrem no mês de fevereiro para todos os trechos exceto Tucuruí, onde as máximas ocorrem em março, enquanto as mínimas vazões ocorrem no mês de outubro. O perfil de vazões do rio Tocantins está apresentado na figura 5-2.

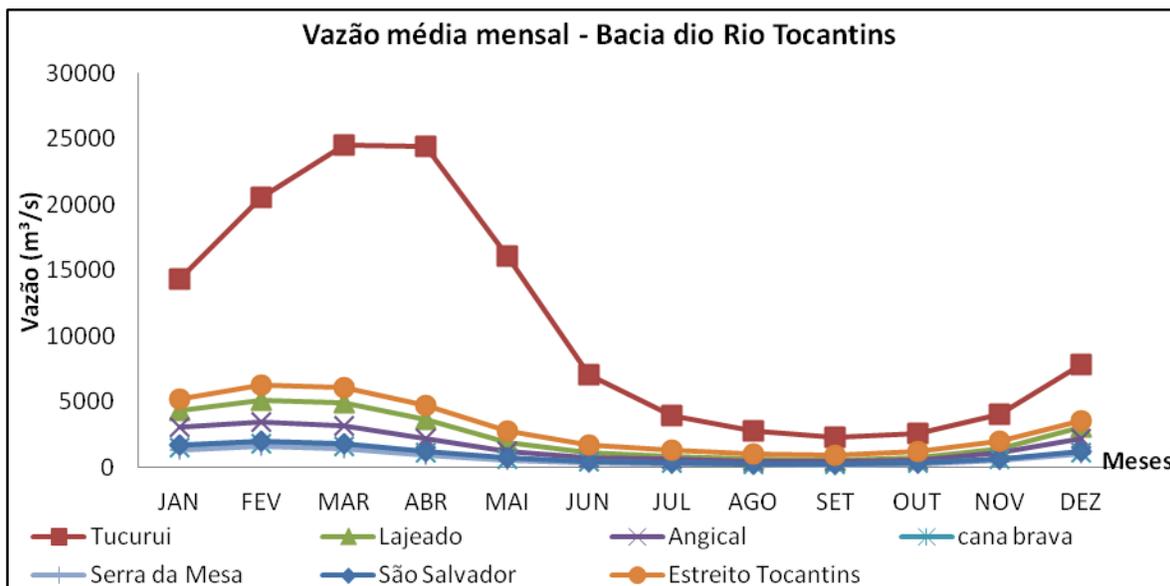


Figura 5-2– Vazão média mensal no trecho de cada aproveitamento da bacia do Rio Tocantins.

5.1 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

A regionalização foi aplicada em dois pontos com os dados de vazões observadas de um ponto a jusante e outro a montante, como descrito na metodologia do item 4.1. Esses pontos foram o local de instalação do Aproveitamento Hidrelétrico Jirau e para o Aproveitamento Hidrelétrico de Estreito do Tocantins, as vazões regionalizadas foram comparadas com as vazões naturais apenas a título de se ter um parâmetro de avaliação da confiabilidade dos dados. Os gráficos que mostram as vazões regionalizadas e naturais estão apresentados a seguir (figura 5-3). Estes pontos podem ser visualizados nos mapas das bacias (Figura 2-1 e Figura 2-2).

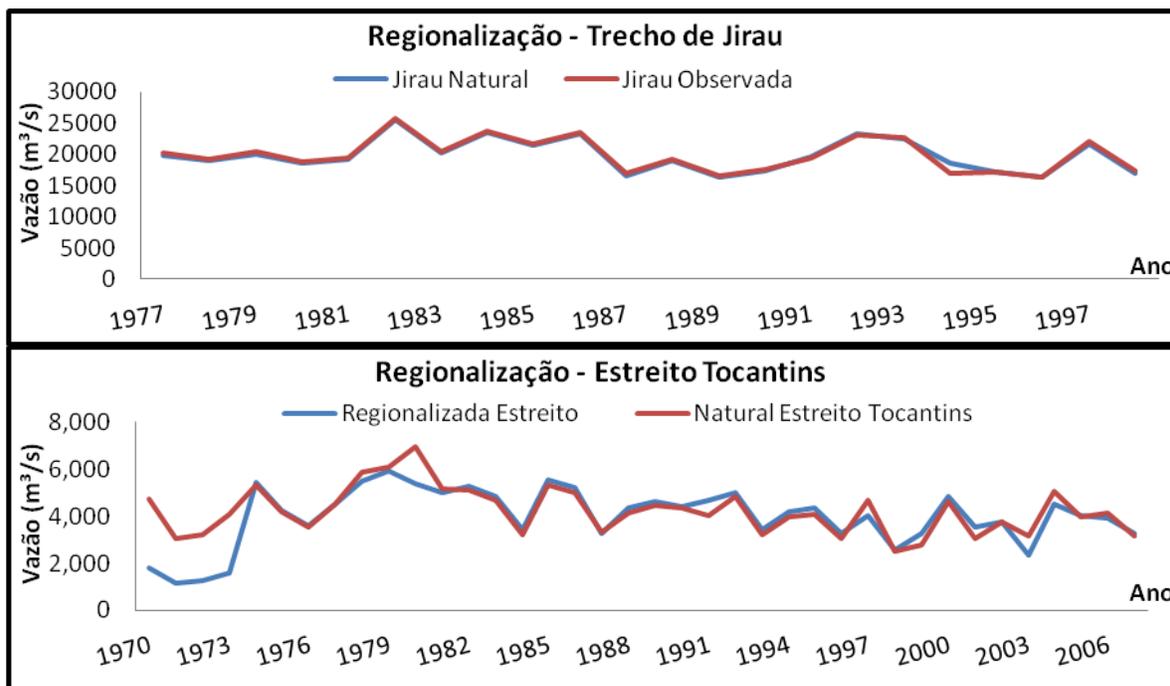


Figura 5-3 - Gráficos de vazões regionalizadas e vazões naturais de Jirau e Estreito do Tocantins.

5.2 OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DAS BACIAS DO RIO MADEIRA E TOCANTINS.

A partir dos dados de vazão observada e dos dados de operação dos reservatórios foram estabelecidos gráficos de vazão afluente versus vazão defluente de cada aproveitamento e a partir disso foram estabelecidas equações que representam o funcionamento de cada aproveitamento. Os gráficos apresentam o polinômio de primeiro grau do tipo $y=ax+b$, onde x é a vazão afluente que representa a operação de cada um dos reservatórios. Também são apresentados os coeficiente de Pearson.

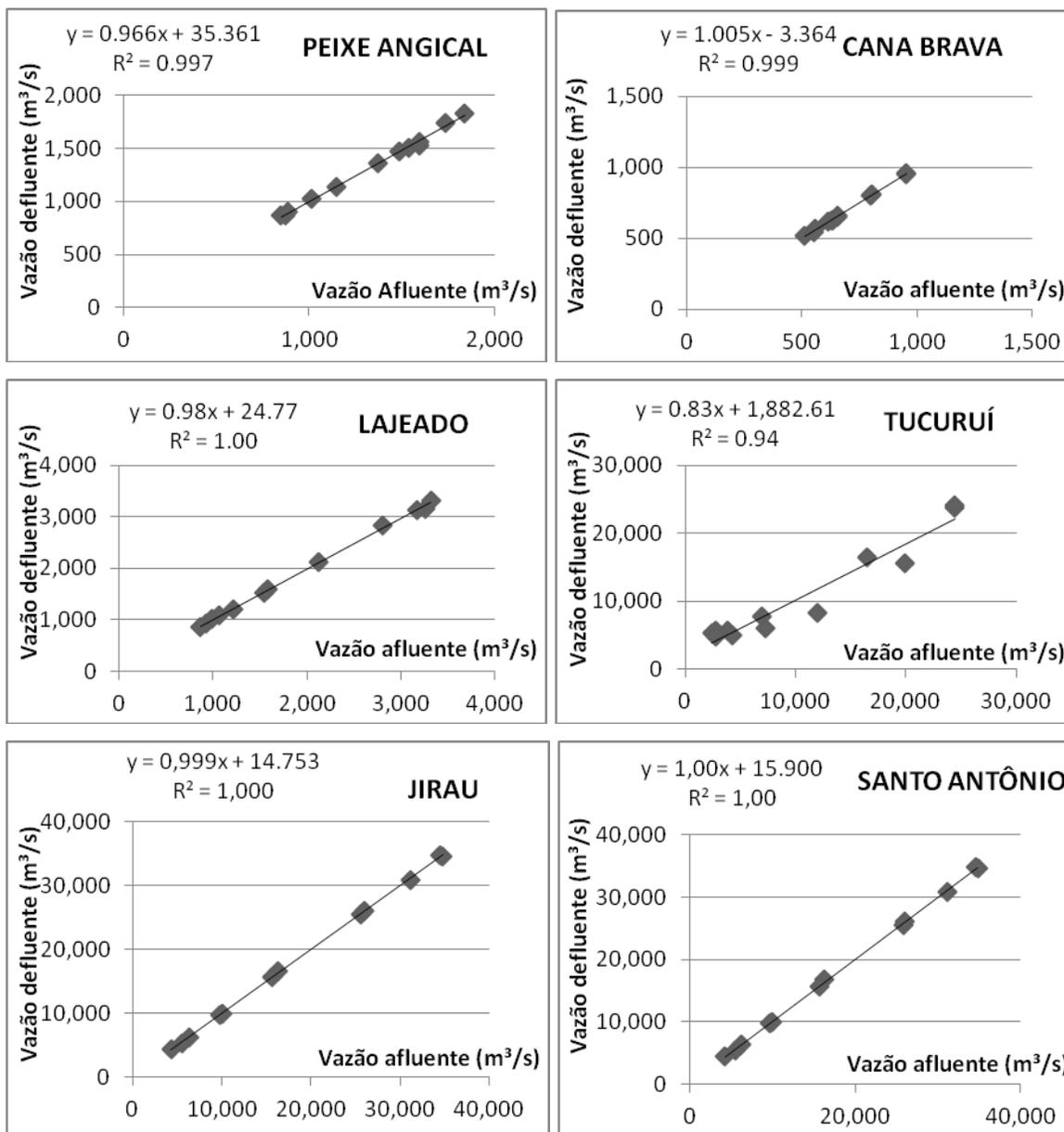


Figura 5-4 - Gráficos de vazão afluente versus vazão defluente dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Tocantins.

A série de dados passível de aproveitamento para o estabelecimento das relações apresentadas na Figura 5-4 foi pequena, devido ao fato de que a grande maioria dos empreendimentos entrou em operação recentemente, a maior parte no ano de 2002. Dessa forma obteve-se uma série com pouco mais de 10 anos de

dados, portanto, com o passar dos anos novos valores serão incrementados aos gráficos e as equações serão constantemente melhoradas, até que representem com grande confiabilidade o comportamento operacional desses reservatórios. A UHE Estreito Tocantins, ainda não possuía dados de operação, por isso não está apresentada na figura 5-5.

Os volumes médios mensais calculados a partir dos relatórios de operação dos respectivos reservatórios, fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) são apresentados na figura 5-5. A partir desta figura fica claro que o volume mais afetado pelo regime do rio é exatamente o de Tucuruí, que é constituído por reservatório de acumulação, enquanto que o volume referente às usinas de fio d'água não é consideravelmente afetado em um período longo de tempo. O período de dados é de 2002 até 2011.

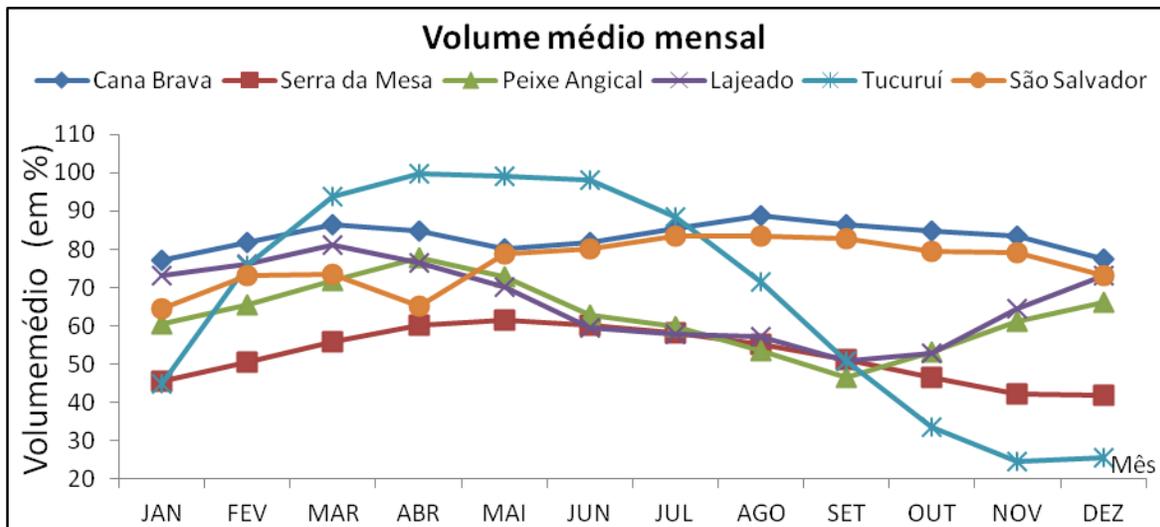


Figura 5-5 - Volume médio dos reservatórios da bacia do Rio Tocantins.

Como esses dados são referentes à média de apenas 10 anos de operação, alguns eventos críticos de tempos de retorno maiores acabam não aparecendo, como por exemplo, os eventos referentes ao ano de 2001, ano aquele em que houve racionamento devido à demanda maior que a oferta de energia. A operação dos reservatórios da bacia do rio Madeira foi obtida através

de simulações utilizando o MGB, com operação baseada na operação de São Salvador, e são apresentadas no próximo item.

5.3 SIMULAÇÃO DO MODELO DE GRANDES BACIAS

As simulações do modelo de grandes bacias mostraram que durante a operação das usinas de fio d'água não ocorrem variações significativas nas vazões do rio no qual elas operam. A Figura 5-6 e a Figura 5-7 mostram as vazões simuladas através do MGB e as vazões observadas *in situ* de dois pontos a jusante dos empreendimentos hidrelétricos Jirau e Santo Antônio na bacia do rio Madeira. As simulações foram feitas de forma a colocara UHE Jirau operando desde o ano de 1976 até 1990 e a UHE Santo Antônio operando de 1980 a 1990 para testar a operação desses empreendimento em relação a um dado real de vazão. Essa operação pode ser feita sem prejuízos aos resultados pois os mapas de uso do solo utilizados pelo MGB levam em consideração as alterações na bacia até o ano de 1990.

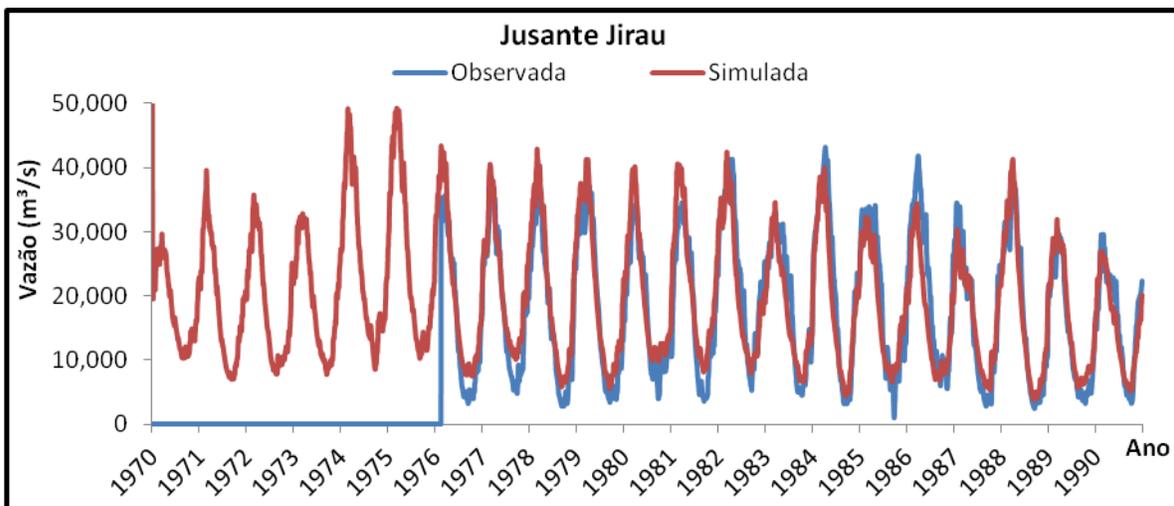


Figura 5-6 - Comparação entre vazões observadas e simuladas a jusante da UHE Jirau.

As vazões do trecho a jusante da UHE Santo Antônio também não sofrem variações significativas ao longo da operação simulada, isso já era esperado pela

forma de operação das usinas de fio d'água onde a relação vazão afluente/vazão defluente tende a ser sempre próxima a 1.

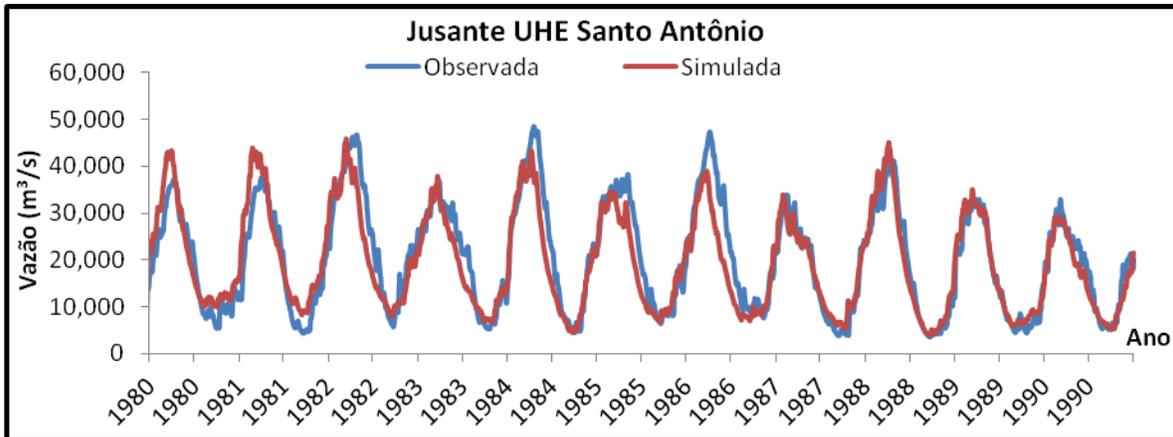


Figura 5-7 - Comparação entre vazões observadas e simuladas para o trecho a jusante da UHE Santo Antônio.

Como a principal característica das usinas de fio d'água é a utilização do próprio rio como reservatório, grande parte do volume deste é representado pela área alagada naturalmente pelo rio. De acordo com dados da ANEEL (2012) a área representativa de alagamento do rio Madeira referente aos trechos de Jirau e Santo Antônio representam cerca de 65% da área total do reservatório planejado para os dois aproveitamentos, sendo os 35% restantes a área alagada naturalmente pelo rio durante o período de cheias (janeiro a abril), cuja vazão em parte poderá ser extravasada pelos vertedouros.

As simulações do MGB mostraram que os volumes dos reservatórios destes dois aproveitamentos variam pouco durante o ano, tendo um leve incremento em seus respectivos volumes durante, exatamente, o período de cheias. Isso pode ser comprovado pela Figura 5-8 que mostra o volume médio dos reservatórios para as simulações feitas para operação do aproveitamento entre o ano de 1970 e 1990. Não houve tempo hábil para a calibração do MGB referente a bacia do rio Tocantins, por isso não foi possível realizar as simulações referentes aos reservatórios dessa bacia.

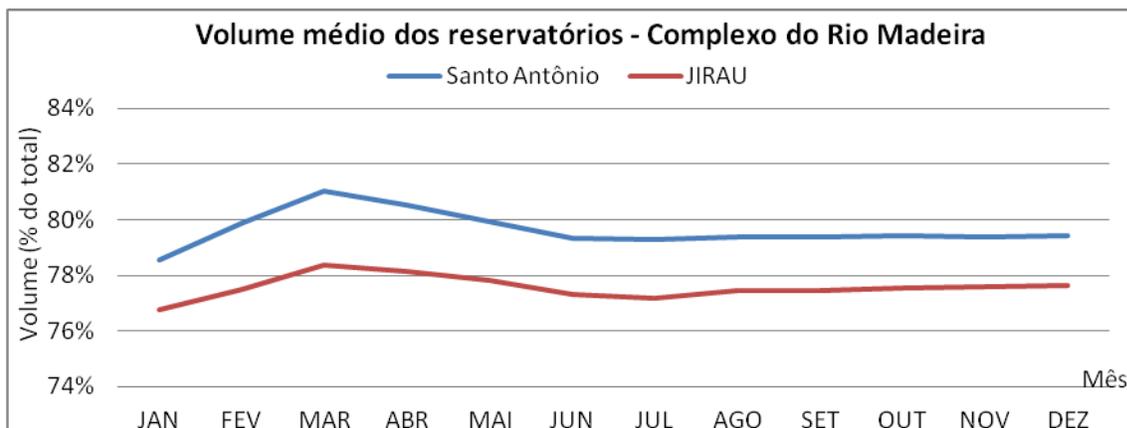


Figura 5-8 - Volume médio dos reservatórios do complexo do Rio Madeira para o período simulado no MGB.

5.4 ENERGIA FIRME E VAZÕES CRÍTICAS

O cálculo da energia firme das usinas de fio d'água do rio Madeira assim como o período crítico estão apresentados na figura 5-9, o perfil do período crítico segue o perfil das vazões anuais.

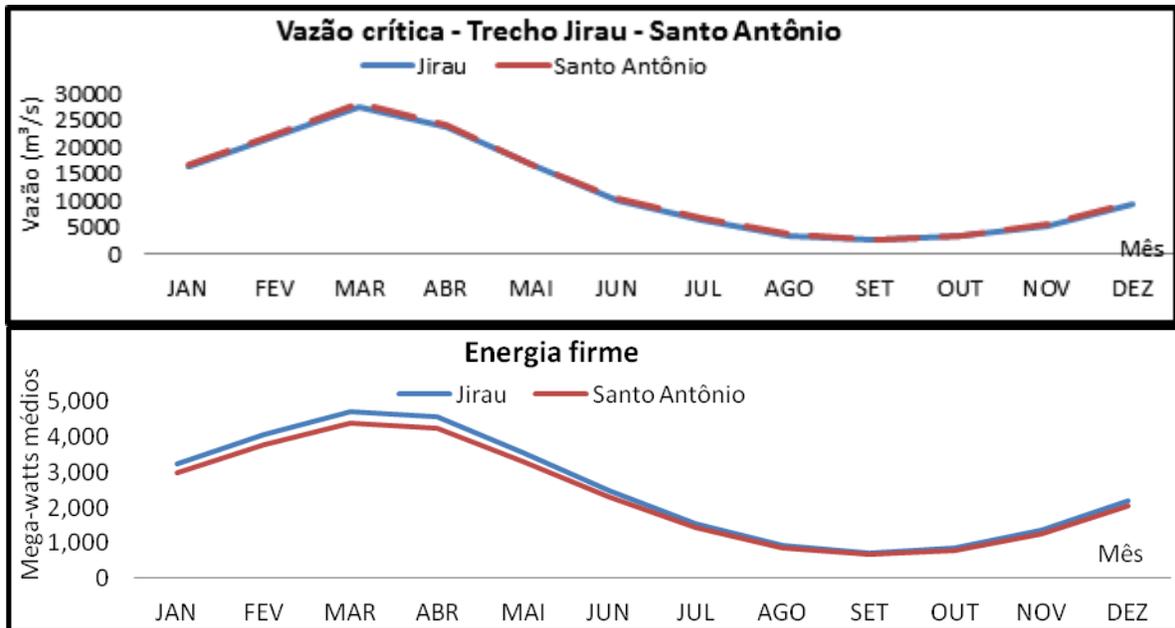


Figura 5-9 - Vazões críticas e energia firme para os trechos de Jirau e Santo Antônio no rio Madeira.

As vazões do período crítico e a energia firme dos empreendimentos de geração hidrelétrica da bacia do rio Tocantins são apresentados na Figura 5-10.

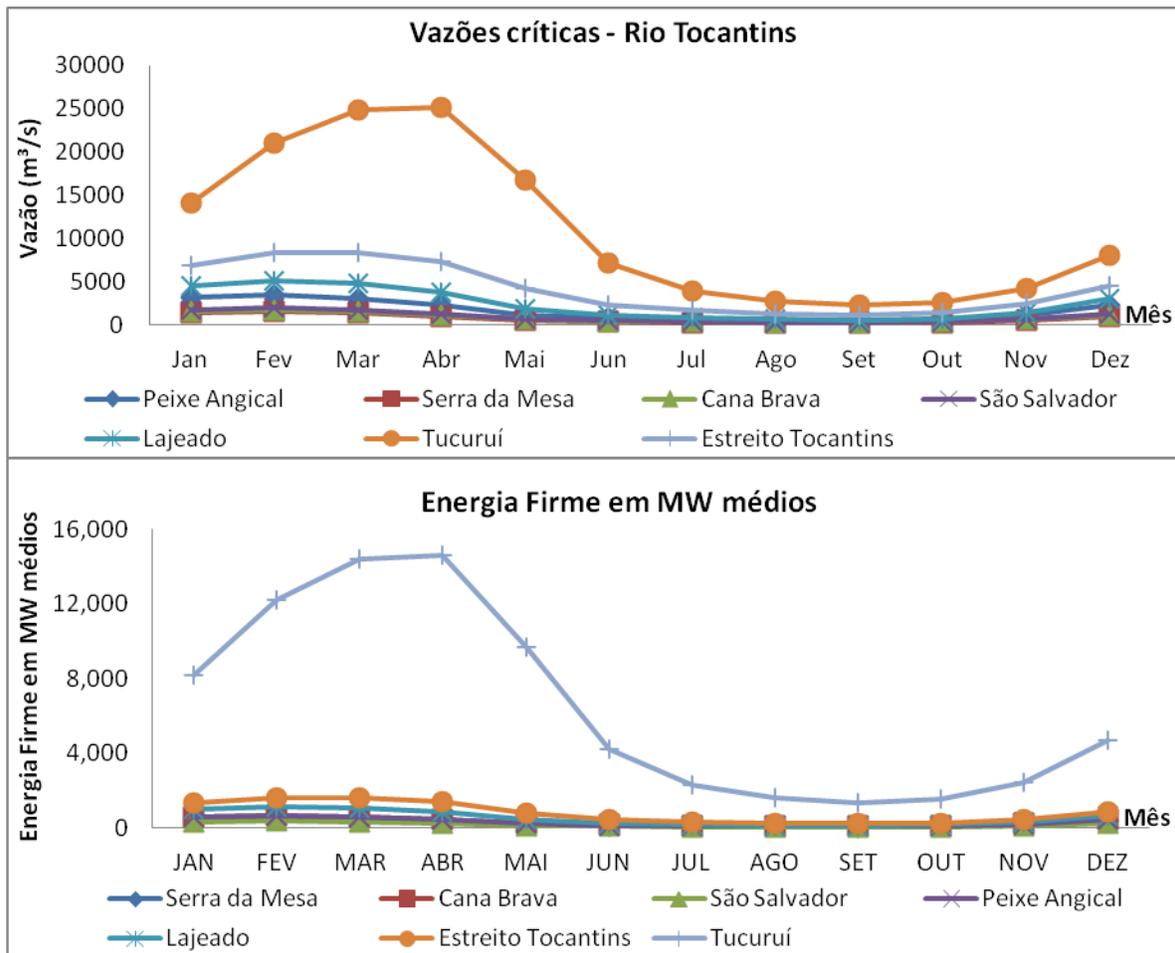


Figura 5-10– Vazões críticas e energia firme para os empreendimentos no rio Tocantins.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As vazões de ambas as bacias são consideravelmente semelhantes, diferindo apenas nos volumes máximos. As ocorrências das vazões máximas e mínimas diferem apenas em um mês entre uma bacia e outra.

A bacia do Rio Tocantins, hoje está próxima ao seu máximo aproveitamento, porém devido à operação de diversos empreendimentos na forma de reservatórios de acumulação, tem-se uma maior seguridade da geração de energia hidrelétrica por meio da regularização das vazões desses reservatórios, enquanto que os aproveitamentos de fio d'água dependem do regime de vazão do rio. Assim sendo a energia produzida por esses empreendimentos pode sofrer um declínio considerável durante os períodos de seca hidrológica. Os aproveitamentos na bacia do rio Madeira, por exemplo, no período de seca possuem a geração firme de 10% a 20% do valor total de potência instalada desses empreendimentos, assim durante o período de secas espera-se que os volumes acumulados durante os períodos de cheia nos reservatórios de acumulação de outras bacias hidrográficas, como a do Tocantins, seja utilizado suprimindo o déficit deixado pelas usinas de fio d'água.

As simulações do MGB e as vazões observadas em relação à bacia do rio Madeira mostraram que as vazões a jusante dos aproveitamentos não é seriamente afetada durante sua operação, isso é devido à característica desses empreendimentos (fio d'água), dessa forma, os impactos na geração hidrelétrica nessa bacia serão exclusivamente dependentes dos efeitos das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico da região.

Os reservatórios mais afetados pelo regime hidrológico são aqueles de usinas de fio d'água, já que estas ficam a mercê dos eventos climáticos, como demonstrou o estudo de Stickler et al. (2013). Com a ocorrência das mudanças climáticas, os regimes de vazões serão seriamente afetados e a operação dessas

usinas que inicialmente foram planejadas para complementar a geração de energia em períodos de cheia e garantir o abastecimento dos reservatórios de acumulação para utilização nos períodos de seca, serão seriamente afetados, podendo causar novos períodos de racionamento, além de colapsar parte da estrutura de geração de energia no país.

7 CONCLUSÃO

As vazões do rio Madeira não são seriamente afetadas pelos aproveitamentos presentes nesta bacia, como mostram os resultados das simulações do MGB. Entretanto, esses empreendimentos podem não suprir a demanda energética para a qual foram projetados caso ocorram eventos críticos como longos períodos de seca hidrológica. A ocorrência de tal evento pode contribuir para um agravamento da situação energética no país. Ainda são necessários mais estudos referentes ao comportamento da bacia hidrográfica do rio Amazonas e suas sub-bacias para entender plenamente qual o impacto do aumento do aproveitamento hidroelétrico na região nas vazões. Isso se deve ao fato de que as diferenças entre as vazões máximas e mínimas na bacia do rio Madeira, por exemplo, é muito alta. Essa diferença afeta diretamente a geração de energia pelas usinas de fio d'água, que são as principais apostas para a geração de energia nessa bacia.

O rio Tocantins já possui grande parte do seu potencial explorado e possui um perfil de vazões semelhante ao do rio Madeira, diferindo apenas em relação aos volumes totais, que são maiores no rio Madeira. Como as simulações no MGB referentes a essa bacia não foram possíveis devido a restrições no cronograma do projeto, não é possível analisar o efeito da operação dos reservatórios dessa bacia nas vazões. Porém, pode-se afirmar que as vazões a jusante dos reservatórios de acumulação, como Tucuruí tendem a ser reduzidas, até os limites estabelecidos pela ONS, devido ao incremento das usinas de fio d'água pelo país, que possuem a função de suprir a geração de energia durante o período de cheias para possibilitar a acumulação de volumes consideráveis nos reservatórios de acumulação, para serem utilizados durante o período de estiagem.

A inserção de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira vem sendo uma das prioridades dos órgãos reguladores e das políticas públicas nos últimos anos. Isso se deve principalmente à grande oferta deste tipo de energia que o

Brasil possui, devido à sua extensão e posição geográfica. No cenário ambiental este é um fato bastante animador, já que a geração através de fontes renováveis além de diminuir os impactos no clima causados pelas emissões de gases estufa, também proporciona uma diversidade na matriz energética. Tal fato colabora para que a oferta no país seja mais estável e sempre atenda à demanda nacional.

A operação dos reservatórios em ambas as bacias pode sofrer com o aumento da demanda nacional nos próximos anos, para isso investimentos em outras fontes de energia e também no aumento do número de empreendimentos de baixo impacto ambiental para a geração de energia elétrica devem ser priorizados, a fim de evitar novos períodos de racionamento e os chamados “apagões”. Para suprir a crescente demanda energética no país, é preciso neste momento replanejar a operação de diversos reservatórios, assim como aumentar o apoio a políticas de incentivo à geração autônoma, como foi o PROINFA. Essas políticas além de em muitos casos ajudarem a implantar aproveitamento que supram necessidades de locais distantes, também ajudam a evitar a utilização demasiada dos reservatórios de acumulação.

A geração hidrelétrica atualmente vem sendo complementada principalmente pela geração termelétrica durante os períodos de maior demanda, esse cenário pode mudar nos próximos anos. A complementariedade espaço-temporal entre fontes pode ser a forma de incluir na matriz brasileira a geração eólica e solar e fortalecer seu crescimento ainda até o ano de 2020.

A geração eólica e solar podem complementar de forma sustentável a matriz nacional. Em alguns períodos do ano onde ocorre seca hidrológica ocorrem também altas médias na velocidade do vento para diversas regiões. Várias dessas regiões já possuem uma malha de distribuição de energia completa e a construção de aproveitamentos eólicos e solares seria de fácil integração à rede de distribuição.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANEEL. **Energia Assegurada**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2005.
2. CHOW, V. T. **Applied Hidrology**. Washington: McGraw-Hill Book Company, v. 4, 1988.
3. COLLISCHON, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.
4. ELETROBRÁS. **Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Manual de minicentrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro. 1985.
5. EPE. **Plano Nacional de Energia 2030: Geração Hidrelétrica**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2007.
6. FGV; MMA; ANA. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília. 2003.
7. GUILHERME, A. **Projetos Hidrelétricos: Curso de Energia Elétrica**, 2012. Disponível em: <http://antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/proj_hidro.php>. Acesso em: 17 jun. 2013.
8. MMA. **Caderno da Região Hidrográfica Amazônica**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, p. 124. 2006a. (85-7738-066-1).
9. MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, p. 132. 2006b. (85-7738-066-1).
10. MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília. 2011. (ISBN).
11. SCHAEFFER, R. et al. **Mudanças climáticas e segurança energética no Brasil**. Rio de Janeiro. 2008.
12. STICKLER, C. M.; AL., E. **Dependence of Hydropower energy on forests in the Amazon Basin at local and regional scales**. [S.l.]. 2013.
13. TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
14. TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, v. 4, 1993.

