

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - ECV
GUILHERME PIAIE DE OLIVEIRA PALMA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO ABANDONO DOS
RESERVATÓRIOS DE ACUMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO
DA EXPANSÃO DO SETOR ELÉTRICO**

FLORIANÓPOLIS

2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Palma, Guilherme Piaie de Oliveira
AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO ABANDONO DOS RESERVATÓRIOS DE
ACUMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SETOR ELÉTRICO /
Guilherme Piaie de Oliveira Palma ; orientador, Luis
Alberto Gómez ; coorientador, Diego David Batista de
Souza. - Florianópolis, SC, 2014.
117 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Usinas Hidrelétricas. 3.
Reservatórios de Acumulação. 4. Impactos socioambientais. I.
Gómez, Luis Alberto . II. Souza, Diego David Batista de.
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Civil. IV. Título.

GUILHERME PIAIE DE OLIVEIRA PALMA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO ABANDONO DOS
RESERVATÓRIOS DE ACUMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO
DA EXPANSÃO DO SETOR ELÉTRICO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina como
requisito para obtenção do grau
de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Luis Alberto
Gómez

Coorientador: Eng. Msc. Diego
David Baptista de Souza.

FLORIANÓPOLIS

2014

GUILHERME PIAIE DE OLIVEIRA PALMA

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO ABANDONO DOS
RESERVATÓRIOS DE ACUMULAÇÃO NO PLANEJAMENTO
DA EXPANSÃO DO SETOR ELÉTRICO**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis 24 de Novembro de 2014

Banca Examinadora



Professor Luis Alberto Gómez
Orientador Universidade Federal de Santa Catarina

Diego David Baptista de Souza
Engenheiro Engevix Engenharia

Marciano Maccarini
Professor Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, por sua dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Luis, por aceitar esta tarefa, pelos conselhos e pela experiência, e conhecimentos compartilhados.

Ao Diego, a se dispor desde o início a me ajudar, participando ativamente com sugestões e comentários. Agradeço ao apoio e a paciência.

Aos amigos de trabalho do Departamento de Hidrologia e Hidráulica da Engevix (Palu, Anax, Rafael, Alex e Barbara), pelos esclarecimentos e a troca de ideias ao longo da elaboração deste trabalho.

O sucesso é ir de fracasso em fracasso
sem perder entusiasmo.

(Winston Churchill)

RESUMO

As usinas hidrelétricas com reservatórios de acumulação vêm sendo abandonadas nos planos de expansão do setor elétrico brasileiro, devido a pressões de setores da sociedade em relação aos seus impactos socioambientais. Como o ocorrido na bacia do rio Xingú que só poderá ser aproveitada pela usina de Belo Monte, excluindo-se os reservatórios de acumulação previstos a montante. Para avaliar os impactos socioambientais decorrentes da substituição desta energia por outras fontes, foram estimados parques, eólico e solar para Natal no Rio Grande do Norte, e uma usinatermoelétrica genérica. As usinas hidrelétricas além de produzir energia, agregam benefícios indiretos a região onde são implantadas, tais como irrigação, lazer, transporte e turismo e estas podem regularizar as vazões, podendo atenuar secas e amortecer cheias, sendo que nenhuma das outras fontes agregam benefícios indiretos aonde são construídas. Para a estimativa do custo da substituição dos reservatórios de acumulação foram consultados os preços de venda de energia praticados nos leilões realizados no Brasil. Os resultados, demonstram que o parque eólico ocuparia área superior aos reservatórios para produzir a mesma energia média, o parque solar, para produzir a mesma energia média, ocuparia uma área menor, as usinas térmicas ocupam áreas desprezíveis se comparadas com as outras fontes porém liberam gases poluentes na atmosfera para a produção de energia, sendo a fonte mais impactante ao meio ambiente. Sobre o custo da substituição dos reservatórios de acumulação do Xingú foi estimado em 24 bilhões de R\$ em valor presente. Assim este trabalho contribui para a discussão sobre os impactos dos reservatórios de acumulação e sobre as importantes alterações que vem ocorrendo na matriz de produção de energética elétrica brasileira, que vem tornando-se mais cara, mais prejudicial ao meio ambiente e mais suscetível aos déficits de energia.

Palavras-chave: Usinas Hidrelétricas. Impactos socioambientais. Reservatórios de Acumulação.

ABSTRACT

Hydroelectric power plants with storage reservoirs have been abandoned in expansion plans in the Brazilian electricity sector, due to pressure from sectors of society in relation to their environmental impacts. As occurred in the Xingu basin that can only be exploited by the Belo Monte dam, excluding the planned storage reservoirs upstream basin. It was proposed to evaluate the environmental impacts resulting from this substitution by other energy sources, estimating wind and solar plants for Natal in Rio Grande do Norte, and a generic thermoelectric power plant. Hydroelectric power plants in addition to producing energy, aggregate indirect benefits to the region where they are deployed, such as irrigation, recreation, transportation and tourism and these may regulate the flows, which may mitigate droughts and floods cushion, with no other sources of electricity aggregate fringe benefits where are built. To estimate the cost of replacing storage reservoirs, selling prices prevailing in the energy auctions in Brazil were consulted. The results show that the wind farm would occupy upper area to produce the same average power, the solar farm to produce the same average power, occupy a smaller area, thermal plants occupy areas is negligible compared with other sources but release pollutant gases in the atmosphere to produce energy, being greater impact on the environment. On the costs of replacing the storage reservoirs in the Xingu is estimate in R\$ 24 billion in present value. Thus this study contributes to the discussion on the impacts of storage reservoirs and about the important changes that have occurred in the Brazilian electrical energy matrix, which is becoming more expensive, less environmentally friendly and more susceptible to deficits of energy.

Keywords: Hydroelectric Power plants. Social and Environmental Impact.StorageReservoir.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fontes de geração de energia elétrica no Mundo

Figura 2.2 - Capacidade instalada SIN dez/2013

Figura 2.3 - Variação da demanda de energia e do PIB

Figura 2.4 - SIN dez/2013

Figura 2.5 - Operação do SIN 01/2000-09/2014

Figura 2.6 - Substituição dos reservatórios por usinas termoelétricas

Figura 3.1 - Inventário de Janeiro de 1980 – alternativa a

Figura 3.2 - Encontro de Altamira 1989

Figura 3.3 - Volta grande do Xingú

Figura 3.4 - Alternativa 1

Figura 3.5 - Alternativa 2

Figura 3.6 - Alternativa 3

Figura 3.7 - Curva de probabilidade de vazões

Figura 3.8 - Localização dos aproveitamentos propostos

Figura 4.1 - Energia Armazenada Pelos Reservatórios ao longo do histórico de afluências.

Figura 4.2 - Energia Armazenada Pelos Reservatórios ao longo do período crítico.

Figura 4.3 - Comparação entre os inventários

Figura 4.4 - Representação esquemática de uma usina hidrelétrica

Figura 4.5 - Fluxograma do cálculo de energia de uma usina hidrelétrica

Figura 4.6 - Representação do método de Monte Carlo.

Figura 4.7 -Vazões média mensais sintéticas para São Félix

Figura 4.8 -Vazões média mensais sintéticas para Pombal

Figura 4.9 -Vazões média mensais sintéticas para Altamira

Figura 4.10 - Vazões média mensais sintéticas para Belo Monte

Figura 4.11 - Vazões média mensais sintéticas para Belo Monte

Figura 4.12 -Comparação entre as séries históricas e sintéticas da bacia do Xingú

Figura 4.13 -Energia média anual de São Félix e Pombal cenário 1

Figura 4.14 -Energia média anual de Altamira cenário 1

Figura 4.15 -Energia média anual de Belo Monte cenário 1

Figura 4.16 -Energia média anual da bacia do Xingú cenário 1

Figura 4.17 -Distribuição de energia para São Félix cenário 1

Figura 4.18 -Distribuição de energia para Pombal cenário 5

Figura 4.19 -Distribuição de energia para Altamira cenário 1

Figura 4.20 -Distribuição de energia para Belo Monte cenário 1

Figura 4.21 -Distribuição de energia para a bacia do Xingú cenário 1

Figura 4.22 -Curva de probabilidade de energia para São Félix

Figura 4.23 -Curva de probabilidade de energia para Pombal

Figura 4.24 -Curva de probabilidade de energia para Altamira

Figura 4.25 -Curva de probabilidade de energia para Belo Monte

Figura 4.26 -Curva de probabilidade de energia para bacia do Xingú

Figura 4.27 -Energia média anual de Belo Monte cenário 5

Figura 4.28 -Distribuição de energia para Belo Monte cenário 5

Figura 4.29 -Distribuição de energia para Belo Monte cenário 1

Figura 5.1 -Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas

Figura 5.2 -Velocidade média do vento a 10 m

Figura 5.3 -Curva de potência e permanência de velocidade

Figura 5.4 -Energia média anual para Natal

Figura 5.5 -Frequência de energia para Natal

Figura 5.6 -Curva de probabilidade de energia para Natal

Figura 5.7 -Energia solar disponível

Figura 5.8 -Insolação média anual

Figura 5.9 -Irradiação solar no plano inclinado média anual

Figura 5.10 - Energia média anual para Natal

Figura 5.11 -Frequência de energia para Natal

Figura 5.12 -Curva de probabilidade de energia para Natal

Figura 5.13 -Comparativo entre as curvas de frequência de energia

Figura 6.1 -Tarifas de energia elétrica industrial em 2010 no mundo (R\$/MWh)

Figura 6.2 -Tarifas de energia elétrica residencial em 2010 no mundo (R\$/MWh)

Figura 6.3 -Variação do PLD médio (R\$/MWh)

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Capacidade instalada de geração elétrica no mundo 10 maiores países (GW)

Quadro 2.2 – Capacidade instalada de geração elétrica no mundo 10 maiores países (GW)

Quadro 2.3 – Capacidade instalada de geração hidrelétrica no mundo 10 maiores países (GW)

Quadro 2.4 – Capacidade instalada de geração Nuclear no mundo 10 maiores países (GW)

Quadro 2.5 – Capacidade instalada de geração térmica no mundo 10 maiores países (GW)

Quadro 2.6 – Capacidade instalada de geração alternativa no mundo 10 maiores países (GW)

Quadro 3.1 - Principais características físicas e energéticas da alternativa A

Quadro 3.2 - Principais características físicas e energéticas da alternativa B

Quadro 3.3 -Características hidrológicas dos empreendimentos dos estudos de revisão do inventário

Quadro 3.4 - Características energéticas do cenário de partição de queda 1

Quadro 3.5 - Características energéticas do cenário de partição de queda 2

Quadro 3.6 - Características energéticas do cenário de partição de queda 3

Quadro 3.7 - Características energéticas do cenário de partição de queda 4

Quadro 3.8 - Características energéticas do cenário de partição de queda 5

Quadro 4.1 - Resultados energéticos dos cenários de partição de queda.

Quadro 4.10 -Valores extremos de vazão das séries históricas.

Quadro 4.11 -Resultado do Teste de kolmogorovSmirnov para São Félix.

Quadro 4.12 - Resultado do Teste de kolmogorovSmirnov para Pombal.

Quadro 4.13 - Resultado do Teste de kolmogorovSmirnov para Altamira.

Quadro 4.14 - Resultado do Teste de kolmogorovSmirnov para Belo Monte.

Quadro 4.15 -Comparação da série histórica com as séries sintéticas de São Félix.

Quadro 4.16 - Comparação da série histórica com as séries sintéticas de Pombal.

Quadro 4.17 - Comparação da série histórica com as séries sintéticas de Altamira.

Quadro 4.18- Comparação da série histórica com as séries sintéticas de Belo monte.

Quadro 4.19 - Parâmetros estatísticos cenário 1

Quadro 4.2 - Expoentes para determinação da máxima vazão turbinável

Quadro 4.20 - Probabilidade de energia bacia do Xingú cenário 1 (MW)

Quadro 4.21 - Parâmetros estatísticos cenário 1

Quadro 4.22 - Parâmetros estatísticos cenário 5 (MW)

Quadro 4.23 - Comparação entre os resultados energéticos determinísticos

Quadro 4.24 - Parâmetros estatísticos cenários probabilísticos

Quadro 4.25 - Comparativo probabilidade de energia (MWm)

Quadro 4.3 - Taxas de indisponibilidade forçada (TEIF) e taxas de indisponibilidade programada (IP)

Quadro 4.4 - Resultado energético cenário 1

Quadro 4.5 - Resultado energético cenário 2

Quadro 4.6 - Resultado energético cenário 3

Quadro 4.7 - Resultado energético cenário 4

Quadro 4.8 - Resultado energético cenário 5

Quadro 4.9 - Valores extremos de vazão das séries históricas

Quadro 5.1 - Parâmetros estatísticos Natal

Quadro 5.2 - Probabilidade de energia para Natal

Quadro 5.3 - Eficiência típica dos módulos comerciais

Quadro 5.4 - Parâmetros estatísticos natal

Quadro 5.5 - Probabilidade de energia para natal

Quadro 5.6 - Áreas impactada por fonte geradora de energia

Quadro 6.1 - Valor de venda da energia

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD - Área de Drenagem

AHE - Aproveitamento Hidroelétrico

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE - Câmara de comercialização de Energia Elétrica

CIDA - CanadianInternationalDevelopmentAgency

CNPE - Conselho Nacional de Pesquisas Energéticas

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DNAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

ELETOBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A

ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A

EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPHAM - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

LER - Leilão de Energia de Reserva

MRE - Mecanismo de Realocação de Energia

NAJ - Nível de Água a Jusante

NAM - Nível de Água a Montante

MME – Ministério de Minas e Energia

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH –Pequena Central Hidrelétrica

PLD - Preço de Liquidação das Diferenças

POT - Potência

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental

SIN - sistema Interligado Nacional

SUMARIO

1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	22
1.1 - Objetivo	23
1.1.1 - Objetivos gerais	23
1.1.2 - Objetivos específicos	23
1.2 - Metodologia	24
2 - ENERGIA ELÉTRICA	24
2.1 - Energia Elétrica no Mundo	24
2.1.1 - Energia Hidrelétrica	27
2.1.2 - Energia Nuclear	27
2.1.3 - Energia Térmica	28
2.1.4 - Energias Alternativas	29
2.2 - Energia Elétrica no Brasil	30
2.2.1 - Evolução da oferta de energia elétrica	30
2.2.2 - Agentes e temas técnicos do setor elétrico	32
3 - HISTÓRICO DOS ESTUDOS DA BACIA DO XINGU	39
3.1 - Estudos iniciais	39
3.2 - Revisão dos estudos e configuração atual	44
4 - ANÁLISE ENERGÉTICA	55
4.1 - Simulação Determinística	56
4.1.1.1. Simulação reservatório equivalente	56
4.1.1.2. Simulação individualizada	61
4.2 - Simulação Probabilística	70
4.2.1.1. Comparação entre os resultados	107
5 - ALTERNATIVAS PARA SUPRIR A DIFERENÇA	112
5.1 - Energia eólica	112
5.1.1.1. Simulação probabilística	117

5.2 - Energia solar	123
5.2.1.1.Simulação probabilística	128
5.3 - Energia térmica	134
5.4 - Impactos e limitações dos parques geradores	135
6 - ANÁLISE ECONÔMICA	140
7 - CONCLUSÃO	145
REFERÊNCIAS	147
APÊNDICE A – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DE SÃO FÉLIX	154
APÊNDICE B – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DE POMBAL	157
APÊNDICE C – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DE ALTAMIRA	160
APÊNDICE D – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DE BELO MONTE	163
APÊNDICE E – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV VELOCIDADE DO VENTO NATAL RIO GRANDE DO NORTE	166
APÊNDICE F – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV HORAS DE INSOLAÇÃO PARA NATAL RIO GRANDE DO NORTE	167
ANEXO A – RESOLUÇÃO Nº6, DE JULHO DE 2008	168

1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A energia elétrica, no mundo contemporâneo é um recurso imprescindível para o desenvolvimento econômico e social. É muito importante também a obtenção deste recurso de maneira segura, sustentável e economicamente viável.

O Brasil é um dos países mais privilegiados do mundo em diversidade de fontes de geração de energia elétrica. O Brasil possui o terceiro maior potencial hidrelétrico do mundo com 10% do potencial mundial, atrás da China com 13% e da Rússia com 12%. Boa parte do potencial hidrelétrico brasileiro já foi aproveitado (84.464 MW) e o potencial passível de ser aproveitado é ainda de 126.164 MW (EPE, 2013). Além disso há reservas de combustíveis para o aproveitamento termoelétrico de petróleo, gás natural, carvão, urânio e culturas, como a cana de açúcar, que permite o aproveitamento da biomassa. Além disto o país ainda possui intensa insolação e em algumas regiões vento com intensidade tecnicamente aproveitável. Contudo o ativismo socioambiental e indigenista de variadas origens nacionais, mas com muita capacidade de comunicação e mobilização, tem tornado a partir da década de 1990 o aproveitamento hidrelétrico no Brasil cada vez mais difícil, e os projetos de novas hidrelétricas não contemplam mais reservatórios de acumulação, mesmos quando possível e tecnicamente recomendável. Ao invés, busca-se o menor alagamento possível, tornando as usinas hidrelétricas mais baratas e mais fáceis de licenciar. Mas perde-se um potencial hidrelétrico que jamais será recuperado, e abdicar dos reservatórios é abdicar de seus usos múltiplos e do volume de água armazenado, que como “combustível” produz energia na própria usina e nas usinas a jusante, e pode ser despachado (SOUZA, B. D. D., 2013). Além de interferir no projeto dos aproveitamentos hidrelétricos, as pressões socioambientais fazem o potencial hidrelétrico brasileiro ainda não aproveitado ser reduzido de 126.164 MW para 77.104 MW se descontados os empreendimentos que interferem em parques e florestas nacionais e em terras indígenas, fazendo o país abdicar de

49.060 MW. Valor igual a três vezes e meia a potência de Itaipu e superior a potência hidrelétrica instalada em países como a Rússia, a 5º maior potência instalada no mundo.

Exemplo de potencial abdicado é a Resolução N°6, de 3 de Junho de 2008, do Ministério de Minas e Energia, que em seu artigo 2º determina que o potencial hidrelétrico a ser explorado será somente aquele situado no rio Xingu, entre a sede urbana do Município de Altamira e a sua foz, o que na pratica restringe o potencial do rio Xingu a AHE Belo Monte.

1.1 - Objetivo

1.1.1 - Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho é avaliar os impactos econômicos da exclusão de novos reservatórios de acumulação, com dimensões necessárias para regularização de vazõesno planejamento do setor elétrico. Buscando avaliar se a eliminação das usinas hidrelétricas com grandes reservatórios é a medida menos impactante ao ambiente, à sociedade e à economia na expansão do setor. Para esta avaliação será utilizada a limitação imposta sobre o aproveitamento hidrelétrico da bacia do rio Xingúatravés da resolução n° de junho de 2008 do ministério de minas e energia.

1.1.2 - Objetivos específicos

- Caracterizar os estudos realizados para o aproveitamento hidrelétrico da bacia do rio Xingú, e caracterizar as alternativas de partição de queda avaliadas no inventário realizado em 2007;
- Estimar a energia elétrica média produzida por cada alternativa de partição de queda do inventário realizado em 2007;
- Estimar os parques geradores de energia elétrica para as fontes, eólica solar e térmica para substituir a energia

elétrica da porção da bacia do Rio Xingú impedida de ser aproveitada pela resolução n° de junho de 2008 do MME;

- Apresentar uma análise sobre os diferentes impactos ambientais de cada fonte, e sobre os custos de produção de energia de cada fonte;
- Avaliar o custo econômico da política de expansão da oferta de energia elétrica, ao se abdicar das usinas hidrelétricas com grandes reservatórios de acumulação;

1.2 - Metodologia

A avaliação da produção de energia elétrica média para cada alternativa de partição de queda do inventário de 2007 foi realizada por meio de simulações determinísticas e probabilísticas. Para adiferença de energia elétrica média entre o cenário de partição de queda mais energético e o cenário indicado como ótimo pelo inventário de 2007, foram estimadas usinas de outras fontes de geração para o atendimento a esta diferença, como solar, eólica e térmica. Tendo por base os valores de venda de energia realizados pela CCEE foi realizada uma análise sobre o custo da geração de energia para as distintas fontes analisadas para atender a diferença de energia.

2 - ENERGIA ELÉTRICA

2.1 - Energia Elétrica no Mundo

A produção de energia elétrica é intimamente ligada ao grau de atividade econômica dos países, ao nível de qualidade de vida e ao desenvolvimento social.No Quadro 2.1 é apresentada a capacidade instalada de produção de energia elétrica para os 10 maiores produtores no mundo e a evolução ao longo da última década.

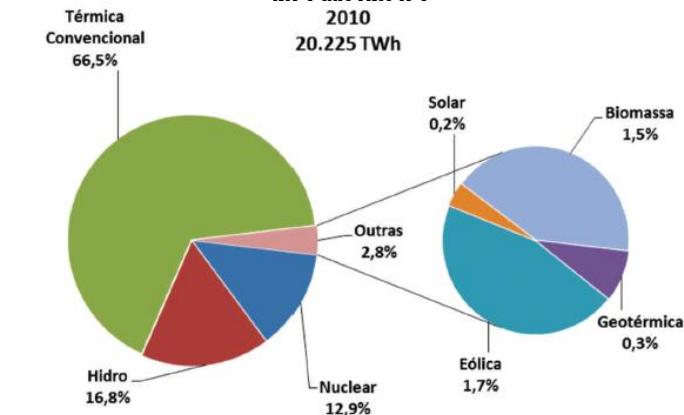
QUADRO 2.1 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO ELÉTRICA NO MUNDO 10 MAIORES PAÍSES (GW)

Ano	2006	2007	2008	2009	2010
Mundo	4302,2	4476,1	4641,5	4842,7	5066,8
Estados Unidos	986,2	994,9	1010,2	1025,4	1039,1
China	631,4	725,9	806,9	890,9	987,9
Japão	278,7	279,2	280,5	284,5	287
Rússia	222,1	224,7	224	225,2	229,1
Índia	155,7	169,3	177,1	189,3	208,1
Alemanha	131,6	134,1	139,3	146,9	153,2
Canadá	123,9	126,4	127,6	135,4	136,9
França	115,7	116,6	117,7	119	124,3
Brasil	96,3	100,4	102,9	106,6	112,4
Itália	89,2	93,3	98,3	101,1	106,2
Outros	1471,3	1511,6	1555,8	1618,5	1682,5

Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica 2013 EPE.

Na Figura 2.1 é apresentado o gráfico da matriz de energia elétrica mundial onde 80% da energia é proveniente de fontes termoeletricas convencionais e nuclear e 20% de fontes renováveis como hídrica, solar, eólica, geotérmica e biomassa.

FIGURA 2.1 -FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO MUNDO



Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica 2013 EPE.

No Quadro 2.2 é apresentada a produção de energia elétrica para os 10 maiores produtores no mundo para o ano de 2012.

QUADRO 2.2 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO ELÉTRICA NO MUNDO 10 MAIORES PAÍSES (GW)

País	Eletricidade (bilhão kWh)
Mundo	11.704
China	4.604
Estados Unidos	3.953
Japão	938
Rússia	926
Índia	835
Canadá	604
Alemanha	556
França	510
Brasil	509
Coréia do Sul	460

Fonte: CIA World Fact book.

2.1.1 - Energia Hidrelétrica

No Quadro 2.3 é apresentada a capacidade de produção de energia hidrelétrica para os 10 maiores produtores no mundo e a evolução ao longo da última década, onde nota-se o crescimento a taxas modestas, com a exceção da China que adicionou 90,4 GW entre 2006 e 2010, onde se destaca a AHE Três Gargantas, sendo este valor adicionado superior à capacidade instalada do segundo maior produtor mundial, o Brasil com capacidade total de produção hidrelétrica de 80,7 GW para o ano de 2010. A Este crescimento da matriz hidrelétrica da China faz parte do programa do governo Chinês para limpar sua matriz energética que é predominantemente termoelétrica.

QUADRO 2.3 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO HIDRELÉTRICA NO MUNDO 10 MAIORES PAÍSES (GW)

Ano	2006	2007	2008	2009	2010
Mundo	793,8	821,4	853,8	887,4	917,5
China	128,6	145,3	171,5	196,8	219,0
Brasil	73,4	76,9	77,5	78,6	80,7
Estados Unidos	77,8	77,9	77,9	78,5	78,8
Canadá	72,7	73,3	74,2	74,5	74,9
Rússia	46,1	46,8	46,8	46,9	46,9
Índia	36,6	38,1	39,3	39,6	40,6
Noruega	27,4	27,6	28,1	28,2	27,7
Japão	22,2	21,8	21,9	21,8	22,4
França	18,0	18,0	18,1	18,2	18,2
Suécia	16,2	16,6	16,4	16,5	16,6
Outros	274,9	279,1	282,1	287,8	291,7

Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica 2013 EPE.

2.1.2 - Energia Nuclear

No Quadro 2.4 é apresentada a capacidade de produção de energia nuclear para os 10 maiores produtores no mundo e a

evolução ao longo da última década, onde nota-se o crescimento a taxas modestas e redução da capacidade para alguns países devido a pressões socioambientais.

QUADRO 2.4 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO NUCLEAR NO MUNDO 10 MAIORES PAÍSES (GW)

Ano	2006	2007	2008	2009	2010
Mundo	379,2	379,1	378,3	378,2	380,8
Estados Unidos	100,3	100,3	100,8	101	101,2
França	63,3	63,3	63,3	63,1	63,1
Japão	49,5	49,5	47,9	48,8	49
Rússia	23,2	23,2	23,2	23,2	24,2
Alemanha	20,2	20,2	20,5	20,5	20,5
Coreia do Sul	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
Ucrânia	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
Canadá	13,3	13,3	13,3	12,7	12,7
Reino Unido	11	11	11	10,9	10,9
China	8	9	9	9	10,7
Outros	58,8	57,8	57,8	57,8	57,1

Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica 2013 EPE.

2.1.3 - Energia Térmica

No Quadro 2.5 é apresentada a capacidade de produção de energia térmica para os 10 maiores produtores no mundo e o Brasil, bem como a evolução ao longo da última década, onde nota-se o crescimento a taxas modestas.

**QUADRO 2.5 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO
TÉRMICA NO MUNDO 10 MAIORES PAÍSES (GW)**

Ano	2006	2007	2008	2009	2010
Mundo	2885,1	3002,2	3097,8	3221,1	3354,4
Estados Unidos	761,6	764	770,2	774,3	782,2
China	484,1	554,5	601,3	652,1	706,6
Japão	176,3	176,9	179,3	181,7	182,4
Rússia	151,5	153,3	152,7	153,8	155,7
Índia	107,8	117,8	121,9	132,4	147,2
Itália	64,3	67,5	71	71,1	72,5
Reino Unido	64,8	64,8	65	65,8	70,5
Alemanha	74,8	72,9	74,5	74,1	70,4
Coreia do Sul	46,5	49,8	55,8	56,3	60,2
Irã	41,1	43,7	45,2	48,4	53,5
Outros	912,3	937	960,9	1011,1	1052,3
Brasil	20,4	21,2	24	25,4	28,8

Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica 2013 EPE.

2.1.4 - Energias Alternativas

No Quadro 2.6 é apresentada a capacidade de produção de energia de fontes alternativas como eólica, solar, biomassa e geotérmica para os 10 maiores produtores no mundo, bem como a evolução ao longo da última década, onde nota-se o crescimento a taxas elevadas, destacando-se a Alemanha e os Estados Unidos.

QUADRO 2.6 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO ALTERNATIVA NO MUNDO 10 MAIORES PAÍSES (GW)

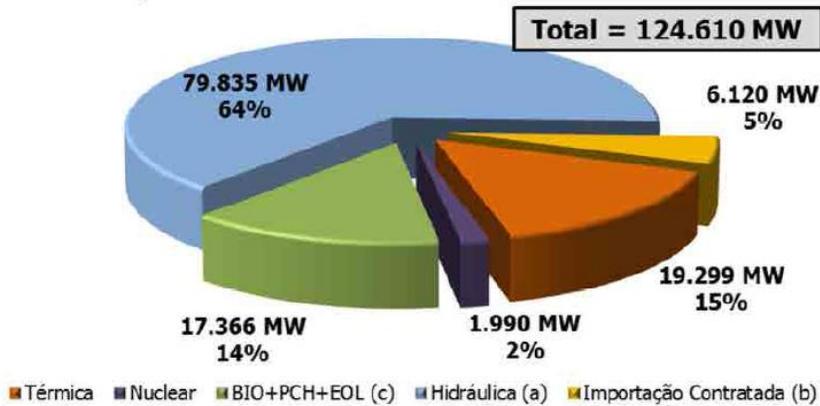
Ano	2006	2007	2008	2009	2010
Mundo	136,2	160,5	197,4	237,7	293,3
Estados Unidos	25	30,9	39,4	49,4	54,7
Alemanha	27,6	30,9	34,3	41,6	51,3
China	4,6	8,2	15	19,3	36,4
Espanha	12,6	16,3	20,8	23,7	26,3
Índia	7,4	9,3	11,8	13,4	15,7
Itália	3,8	4,7	6,1	8,6	12,2
Brasil	6,5	6,6	7,4	6,7	8,8
França	2,7	3,6	5	6,3	8,5
Japão	5,5	5,5	5,9	6,7	8
Reino Unido	3,7	4,3	5,2	6,4	7,7
Outros	36,8	40,2	46,5	55,6	63,8

Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica 2013 EPE.

2.2 - Energia Elétrica no Brasil

2.2.1 - Evolução da oferta de energia elétrica

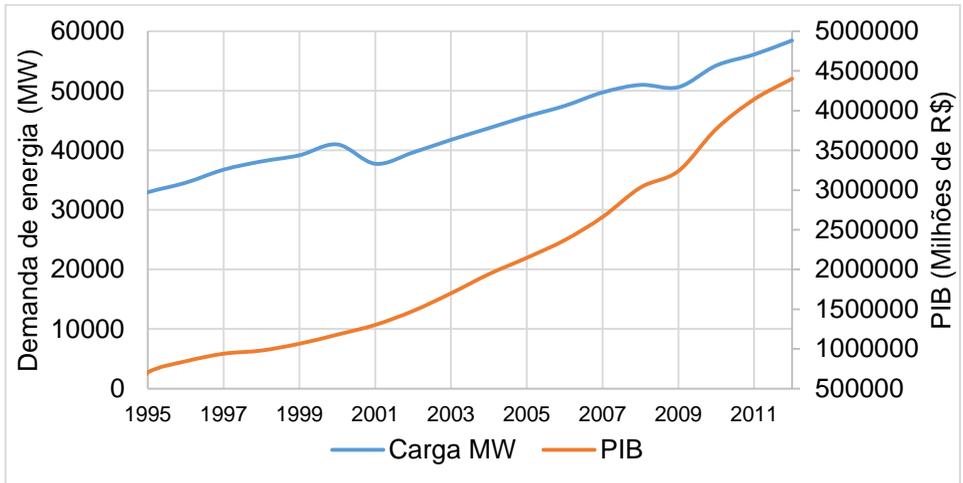
O Brasil é o nono maior produtor mundial de energia elétrica, 509.000 GWh/ano com uma capacidade total instalada de 124610 MW para o ano de 2013. O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, 83% de sua energia é proveniente de fontes renováveis como hídrica, eólica e biomassa. Na Figura 2.2 é apresentada a divisão da capacidade instalada de geração de energia por fonte para o ano de 2013.

FIGURA 2.2 -CAPACIDADE INSTALADA SIN DEZ/2013

Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 EPE.

Segundo os planos decenais de expansão do parque gerador elaborados pela EPE deve-se adicionar 3000 MW ao parque gerador em média ao ano para acompanhar o ritmo do crescimento da população e da economia. Na Figura 2.3 é apresentada a variação da carga de energia e do PIB para o Brasil durante a última década.

FIGURA 2.3 -VARIÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA E DO PIB



Fonte: Elaborado pelo autor dadosONS/IBGE.

2.2.2 - Agentes e temas técnicos do setor elétrico

- Agência nacional de energia elétrica (ANEEL)

É o órgão regulador do setor elétrico brasileiro, tem papel de fiscalização e condução do setor elétrico.

- Empresa de pesquisas energéticas (EPE)

É um órgão subordinado ao ministério de minas e energia, cuja principal atribuição é coordenar a elaboração do planejamento indicativo da expansão da geração, e do planejamento determinativo da expansão da transmissão do setor elétrico brasileiro.

- Operador Nacional do sistema elétrico (ONS)

É o órgão encarregado de promover a otimização da operação do sistema elétrico, visando o menor custo para o sistema atendendo os padrões de qualidade e os critérios de déficit. O ONS deve também garantir a todos os agentes do setor elétrico o acesso à rede de transmissão de forma não discriminatória.

- Câmara de comercialização de energia elétrica (CCEE)

O processo de comercialização de energia elétrica ocorre de acordo com o que foi estabelecido pela Lei nº 10848/2004, e pelos decretos nº5163/2004 e nº109/2004, que instituíram a convecção de comercialização de energia elétrica. As relações comerciais entre os agentes participantes da CCEE são regidas predominantemente por contratos de compra e venda de energia, e todos os contratos celebrados entre os agentes no âmbito do sistema interligado nacional devem ser registrados na CCEE. Esse registro inclui apenas as partes envolvidas, os montantes de energia e o período de vigência, os preços de energia dos contratos não são registrados na CCEE, sendo utilizados especificamente pelas partes envolvidas me suas liquidações bilaterais.

A CCEE contabiliza as diferenças entre o que foi produzido ou consumido e o que foi contratado. As diferenças positivas ou negativas são liquidadas no mercado de curto prazo valoradas pelo PLD (Preço de Liquidação das diferenças), determinado semanalmente para cada submercado, tendo como base o custo marginal de operação do sistema, limitado por um preço máximo e mínimo.

A CCEE também deve promover os leilões de compra e venda de energia elétrica, que são processos licitatórios realizados com o objetivo de contratar a energia elétrica necessária para assegurar o pleno atendimento da demanda futura no ambiente de contratação regulada. Os vencedores dos leilões celebrarão com os agentes de distribuição contratos de comercialização de energia elétrica em ambiente regulado, correspondendo as suas necessidades de compra para entrega no ano de início de

suprimento da energia contratada no certame. Os leilões, realizados a partir de 2005, introduziram competição entre os agentes de geração na contratação de energia elétrica, atendendo princípios de segurança no abastecimento e de modicidade tarifária, ou seja, a energia contratada a partir desse modelo resultou em aquisições pelo menor preço. Os leilões são divididos segundo o horizonte de contratação em

- Leilão A-5: processo licitatório para a contratação de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração realizado com 5 (cinco) anos de antecedência do início do suprimento. Esse foi criado para viabilizar empreendimentos de longa maturação, como, por exemplo, os empreendimentos hidrelétricos.
- Leilão A-3: processo licitatório para a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração novos realizados com 3 (três) anos de antecedência do início do suprimento. Esse leilão foi criado para viabilizar empreendimentos de médio prazo de maturação, como, por exemplo, os empreendimentos termelétricos.
- Leilão A-1: processo licitatório para a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração existentes realizado com 1 (um) ano de antecedência do início do suprimento. Excepcionalmente, no ano de 2013, o início de entrega poder-se-á dar no ano da licitação.
- Leilão de Ajuste: processo licitatório que tem por objetivo complementar a carga de energia necessária ao atendimento do mercado consumidor dos agentes de distribuição, até o limite de 1% do mercado de cada distribuidora.
- Leilão de projeto estruturante: São leilões de compra de energia proveniente de projetos de geração de caráter estratégico e de interesse público, que asseguram a otimização do binômio modicidade tarifária e confiabilidade do Sistema Elétrico, bem como garantem o atendimento à demanda nacional de energia elétrica,

considerando o planejamento de longo, médio e curto prazos. Foram leiloados os seguintes projetos estruturantes: UHE Santo Antônio (Resolução CNPE nº4 de 2007); UHE Jirau (Resolução CNPE nº1 de 2008); e, UHE Belo Monte (Resolução CNPE nº5 de 2009).

- Leilão de Energia de Reserva (LER): Seu objetivo é elevar o patamar de segurança no fornecimento de energia elétrica ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com energia proveniente de usinas especialmente contratadas para este fim.

- Mecanismo de realocação de energia (MRE)

O MRE é um mecanismo para compartilhar o risco hidrológico do sistema elétrico e de rateio do retorno financeiro associado a operação do sistema. Cada usina tem uma energia assegurada atribuída que deve ser fornecida ao sistema, o MRE permite repartir-se normalmente a produção acima desses montantes entre as usinas que estiverem produzindo menos que sua energia assegurada, e quando todo o sistema produzir além da energia assegurada os geradores podem vender esses excedentes no mercado Spot, onde cada usina comercializa sua quota da sobra (energia secundária) do sistema.

- Mercado Spot

O termo “*Spot*” é normalmente utilizado para se referir aos negócios realizados com pagamento a vista e entrega imediata da mercadoria. O mercado Spot de energia, ou mercado livre, toda a energia escassa ou excedente dos contratos entre os agentes é comercializada na CCEE.

- Risco de déficit

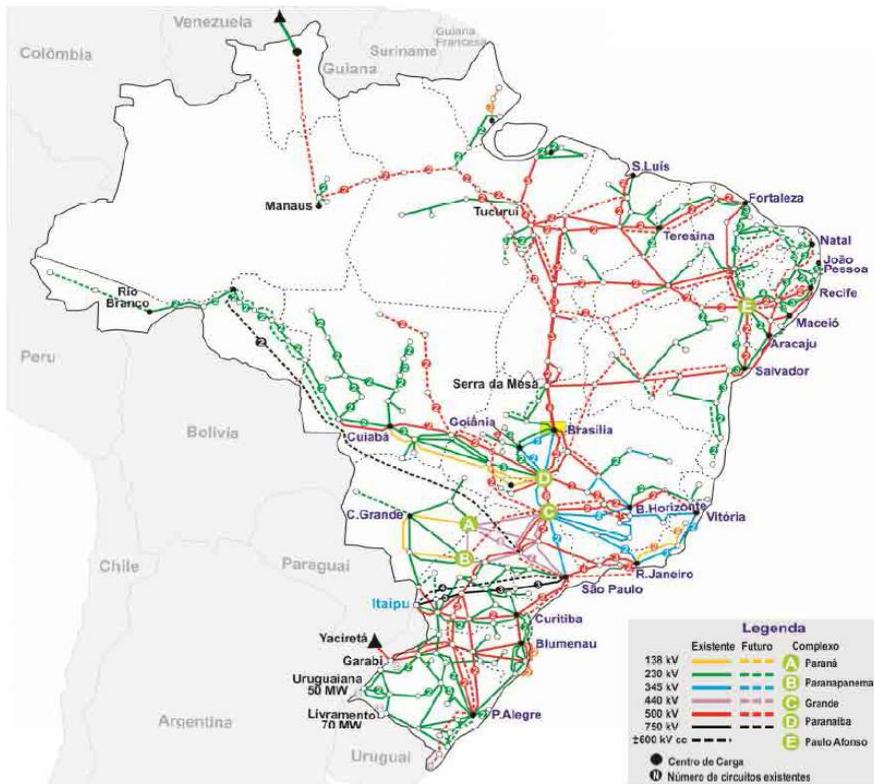
No Brasil, até 1986, o critério para avaliar o risco de déficit era baseado na garantia de suprimento de energia na hipótese de repetição do registro histórico de vazões. A partir de 1986 deu-se início a aplicação de critérios probabilísticos, sendo adotado no

planejamento da expansão um risco de déficit de 5% ao ano para avaliação das disponibilidades de energia (NEIRA L. K ,2005).

- Sistema interligado Nacional (SIN)

É o sistema de coordenação e controle, formado pelos agentes públicos e privados do setor elétrico, integrando todas as regiões do país com apenas 1,7% da capacidade de produção fora do sistema. Na Figura 2.4 é apresentado o mapa do SIN no ano de 2013.

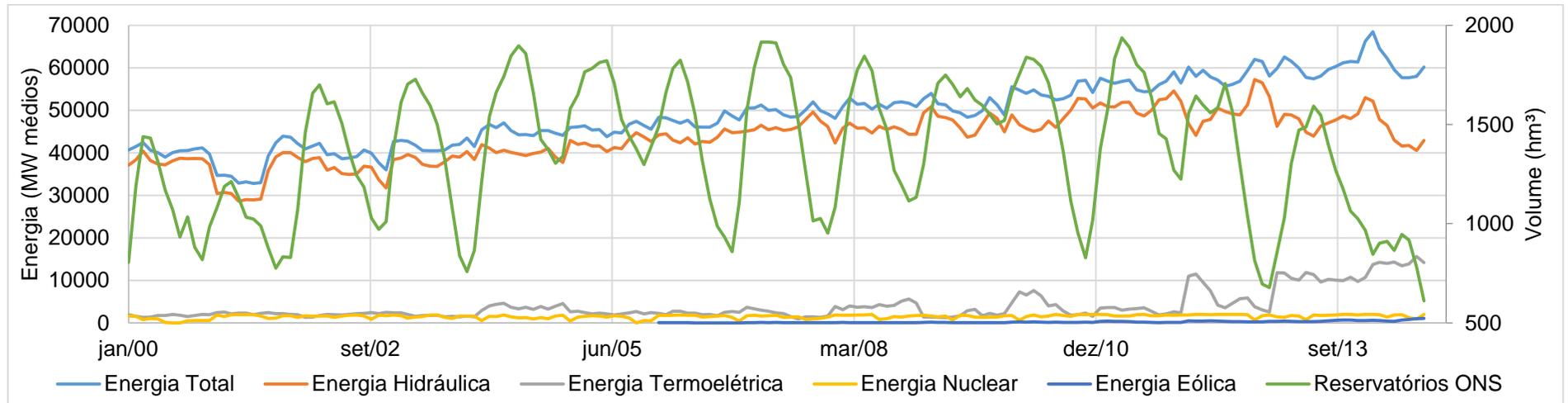
FIGURA 2.4- SIN DEZ/2013



Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 EPE.

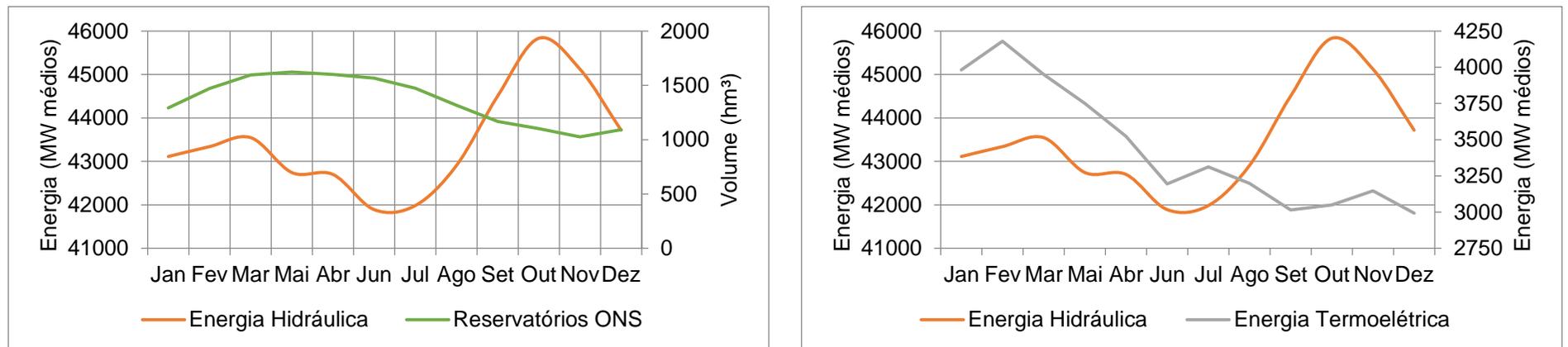
O SIN permite o intercâmbio de energia entre as sub-regiões do sistema. O ONS disponibiliza em seu site os resultados da operação por fonte de geração e o volume útil dos reservatórios, que são apresentados na Figura 2.5, onde nota-se o aumento da participação da fonte Termoelétrica a partir do ano 2008. O incremento da participação termoelétrica vem ocorrendo para substituir a energia proveniente dos reservatórios durante o período seco na região centro sul, já que não foi adicionado nenhum reservatório de grande volume ao sistema na última década. Ao se analisar a operação média mensal das usinas termoelétricas, os volumes úteis dos reservatórios e a energia hidráulica (Figura 2.6), nota-se que a maior contribuição de fonte hidráulica ocorre durante o período seco da região centro sul brasileira, de agosto a novembro, quando o volume armazenado pelos reservatórios é consumido para a geração de energia. As usinas termoelétricas têm sua maior contribuição durante o período úmido da região centro sul de dezembro a abril, o que permite que o sistema armazene água para o período seco. Com a crescente demanda, e sem a construção de novos reservatórios o volume dos reservatórios existentes é consumido a cada período seco de maneira mais veloz a cada ano, e não tem seus volumes recuperados durante o período úmido, como vem ocorrendo durante o ano hidrológico de 2013 – 2014, que terminou com o menor armazenamento do histórico.

FIGURA 2.5 - OPERAÇÃO DO SIN 01/2000-09/2014



Fonte: Elaborado pelo autor dados ONS.

FIGURA 2.6 - SUBSTITUIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS POR USINAS TERMOELÉTRICAS



Fonte: Elaborado pelo autor dados ONS.

3 - HISTÓRICO DOS ESTUDOS DA BACIA DO XINGU

A bacia do rio Xingu está inserida na área de drenagem do rio Amazonas, desenvolvendo-se entre as bacias do rio Tapajós a Oeste e a bacia do rio Tocantins a Leste. A bacia do rio Xingu drena uma área total de 509.000km². O rio Xingú é o principal da bacia, ele nasce nos contrafortes da Serra Azul no município de Chapada dos Guimarães no estado do Mato Grosso, com a denominação de rio Culene, até receber, pela margem direita, a contribuição do rio Sete de Setembro, passando então a denominar-se Xingú, a uma altitude média de 600 m, desenvolvendo-se no sentido Sul-Norte até a confluência com o rio Amazonas, apresentando uma extensão total de 1.815 km.

3.1 - Estudos iniciais

A avaliação do potencial energético da bacia do rio Xingu teve início na década de 1970, com estudos realizados pela ELETRONORTE. Em Janeiro de 1980 foi emitido o relatório final dos estudos de inventário, que tinha como principais objetivos:

- Avaliar o potencial energético da bacia do rio Xingu, a fim de diagnosticá-la, com a necessária antecipação da inserção de novas usinas, com vistas ao planejamento racional de sua utilização;
- Selecionar esquemas de divisão de queda, visando a utilização dos recursos hídricos disponíveis, a custos competitivos;
- Determinar as principais características dos aproveitamentos, adotando, para obtenção de seus custos, estimativas seguras e conservadoras;
- Indicar os aproveitamentos que, pela oferta de energia e custos de implantação, merecessem ser estudados a curto prazo, em nível de viabilidade técnica econômica e financeira;

À época na qual a bacia do rio Xingu foi inventariada, o planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro tinha as

seguintes diretrizes para à expansão do parque hidroelétrico (SCHREIBER G. P,1978):

- Para o aproveitamento integral do potencial de um rio, é necessário que o nível d'água de montante de uma usina atinja o nível de jusante da usina próxima a montante, de modo que resulte uma sequência continua de degraus sem trechos intermediários não aproveitados.
- O déficit de produção das usinas hidrelétricas a fio d'água, nos meses e anos secos,deveriam ser fornecidos por usinas térmicas, que por sua vez poderiam ficar inoperantes no período chuvoso, quando as hidrelétricas operariam a plena capacidade. Tal procedimento é antieconômico pois exigiria potencias instaladas muito elevadas para as hidrelétricas e as térmicas, potencias estas que ficariam ociosas durante boa parte do tempo. Por isso é necessário regularizar a vazão natural dos rios por meio de grandes reservatórios a serem criados pelas barragens.
- A vazão de um rio cresce das cabeceiras até a sua foz, e conseqüentemente o volume necessário para regularização também, por isto é desejável localizar os reservatórios de regularização nos trechos altos e médio do rio, e as usinas a fio d'água na parte baixa do rio.

Os estudos do inventário da década de 1970 seguiram as diretrizes aqui expostas.Foram avaliadas duas alternativas de partição de queda, a alternativa A com cinco empreendimentos no rio Xingu e um empreendimento no rio Iriri, e a alternativa B com seis empreendimentos no rio Xingu e um no rio Iriri. As principais características físicas e energéticas das alternativas de partição de queda são apresentadas no Quadro 3.1 para a alternativa A e no Quadro 3.2 para a alternativa B.

QUADRO 3.1- PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA ALTERNATIVA A

AHE	AD (km²)	NA Máx. (m)	NA Mín. (m)	NAJ (m)	Pot. (MW)	Energia Firme (MW médios)	Ares. (km²)
Iriri	116000	206	194,7	172	910	380	4060
Jarina	178000	281	273	257	559	240	1900
Kokraimoro	198000	257d	243,3	208	1940	820	1770
Ipixiuna	276000	208	200,2	165	2312	1050	3270
Babaquara	446000	165	162,4	95	6274	3050	6140
Kararaô	477000	95	94	6	8380	3960	1160
Total	-	-	-	-	20375	9500	18300

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

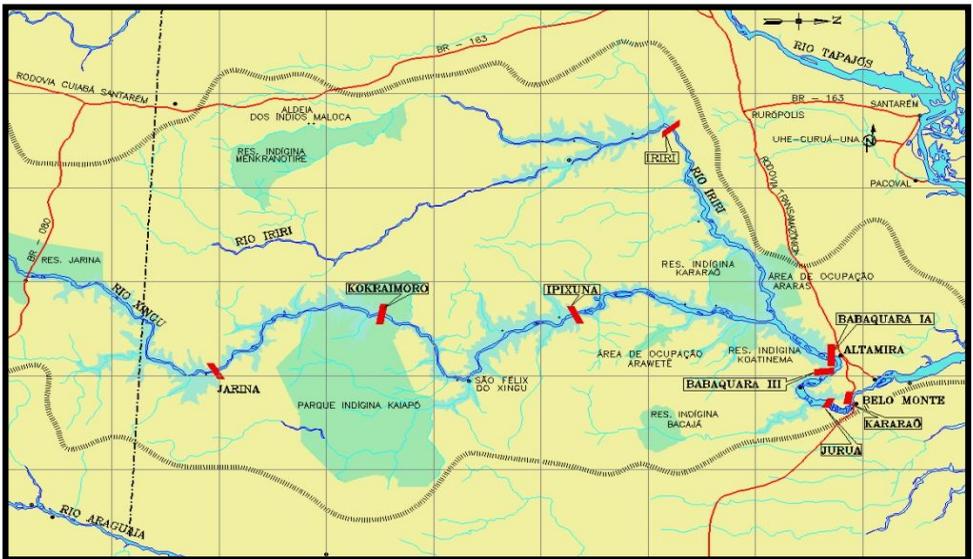
QUADRO 3.2- PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ENERGÉTICAS DA ALTERNATIVA B

AHE	AD (km²)	NA Máx. (m)	NA Mín. (m)	NAJ (m)	Pot. (MW)	Energia Firme (MW médios)	Ares. (km²)
Iriri	116000	206	194,7	172	910	380	4060
Carajari	132000	172	168,3	153	669	285	1380
Gorotire	187000	281	268,5	239	1542	640	3180
Kayapo	210000	239	229,2	184	2514	1160	2370
Carajás	289000	184	180,5	153	1702	805	2060
Babaquara	446000	153	149,9	95	5271	2560	3940
Kararaô	477000	95	94	6	8009	3970	1160
Total	-	-	-	Total	20617	9800	18150

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

A alternativa A teve potencial inventariado de 20.375 MW de potência instalada e 9.500 MW médios de energia firme, com área total alagada de 18.300 km². Já para a alternativa B o potencial inventariado foi de 20.617 MW de potência instalada e 9.800 MW médios de energia firme, com área total alagada de 18.150 km². Os estudos da época já apontavam a vocação energética da Volta Grande do Xingu, que seria aproveitada pelos empreendimentos de Babaquara e Kararaô, que foram indicados para a realização dos estudos de viabilidade. Os estudos de viabilidade foram iniciados antes da seleção da partição de queda da bacia, que foi postergada para os estudos subsequentes. A Figura 3.1 é apresentada a localização dos empreendimentos da alternativa de partição de queda A.

**FIGURA 3.1 -INVENTÁRIO DE JANEIRO DE 1980 –
ALTERNATIVA A**



Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

Com base nas recomendações da ELETROBRAS, que vislumbrou, já em 1999, a interligação dos sistemas Norte/Nordeste e Sul/Sudeste, como indicado no plano Decenal de Expansão a entrada dos empreendimentos da Volta Grande do Xingu, como a melhor opção para o sistema Brasileiro Interligado, teve início o estudo de viabilidade dos empreendimentos. E na época movimentos sociais começaram a se manifestar em relação ao alagamento de terras indígenas, a perda de biodiversidade, a realocação das comunidades ribeirinhas e demais impactos ambientais. São ilustrativas destes movimentos as manifestações ocorridas contra o aproveitamento de Kararaô, que culminou no chamado “Encontro de Altamira” em 1989, que ficou famoso pelo incidente entre a índia Tuirá e um dos engenheiros da ELETRONORTE. O encontro de Altamira é marcado como a primeira grande investida do movimento ambientalista e indigenista brasileiros, tendo contado com a participação de militantes estrangeiros, e segundo (DEWAR, 2007) com financiamento de órgãos governamentais estrangeiros como a *Canadian International Development Agency* (CIDA).

FIGURA 3.2 - ENCONTRO DE ALTAMIRA 1989



Fonte: Revista Infovias, edição nº9, ano 2.

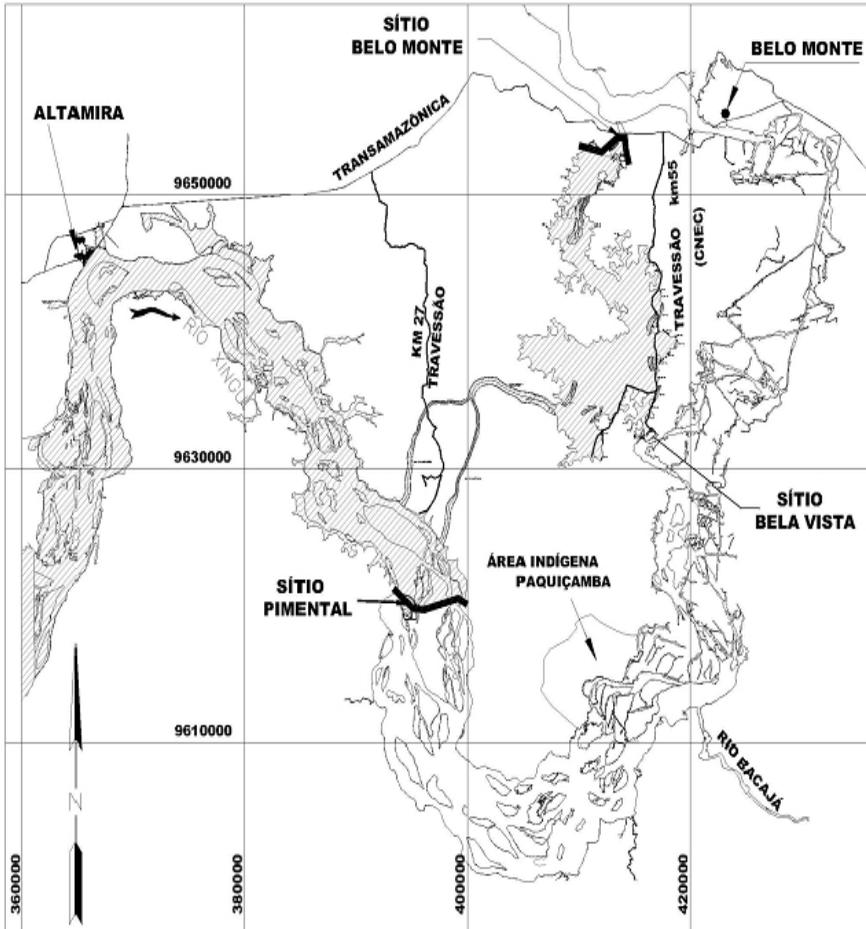
Após o encontro de Altamira os estudos foram paralisados, durante a década de 1980 foi definida a política ambiental no Brasil por meio da lei nº6.938/81 a partir da qual se estabelecem

as resoluções do CONAMA, que normalizam o licenciamento de empreendimentos geradores de impactos ambientais. Em 1993 o DNAEE e a ELETROBRAS, em uma avaliação conjunta, julgaram necessário uma revisão dos estudos já realizados visando sua viabilização política e socioambiental.

3.2 - Revisão dos estudos e configuração atual

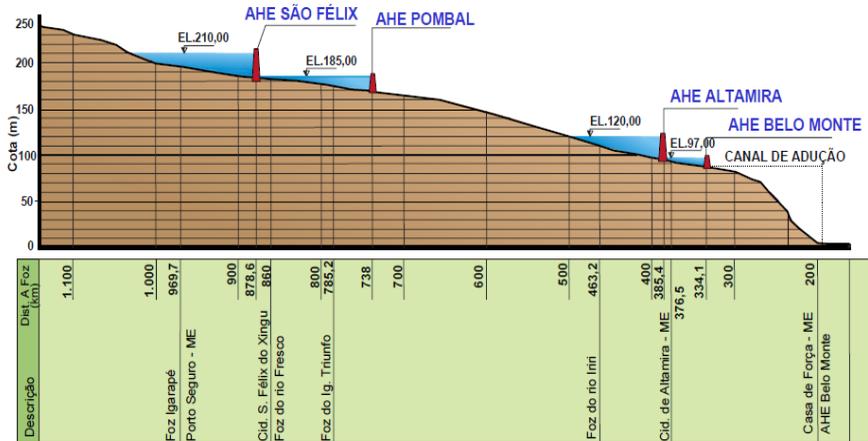
Em 1994 os estudos de viabilidade foram revisados com o enfoque em reduzir a área inundada de terras indígenas. Em 1998 a ELETROBRAS solicita à ANEEL autorização para em conjunto com a ELETRONORTE novos estudos de viabilidade para a AHE Kararaô, os estudos tem início no ano 2000, tendo sido interrompidos no ano de 2002 por decisão judicial do Ministério Público Federal do Estado do Pará, questionando a competência exclusiva do IBAMA para acompanhamento e elaboração de EIA/RIMA e a falta de participação do IPHAN, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, para os estudos arqueológicos. O Congresso Nacional autorizou em 2005 a retomada do estudo que avaliou três alternativas de partições de queda para o rio Xingu, e excluirá o aproveitamento do rio Iriri. A Volta Grande do Xingú foi impedida de ser alagada devido a área indígena de Paquiçamba, e para preservar as cachoeiras da Volta Grande do Xingú a AHE Kararaô foi deslocada para as proximidades do povoado de Belo Monte, que passou a dar o nome do aproveitamento da Volta Grande do Xingu. O arranjo do AHE Belo Monte é apresentado na Figura 3.3 e as alternativas de partição de queda avaliadas são ilustradas da Figura 3.4 a Figura 3.6.

FIGURA 3.3 -VOLTA GRANDE DO XINGÚ



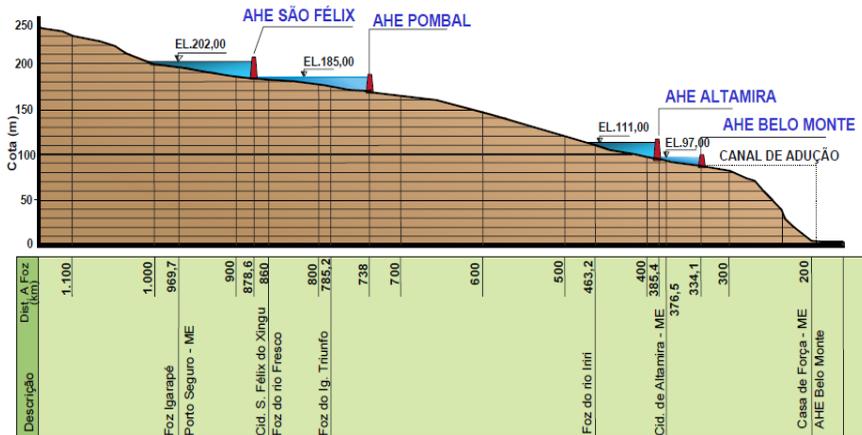
Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

FIGURA 3.4 -ALTERNATIVA 1



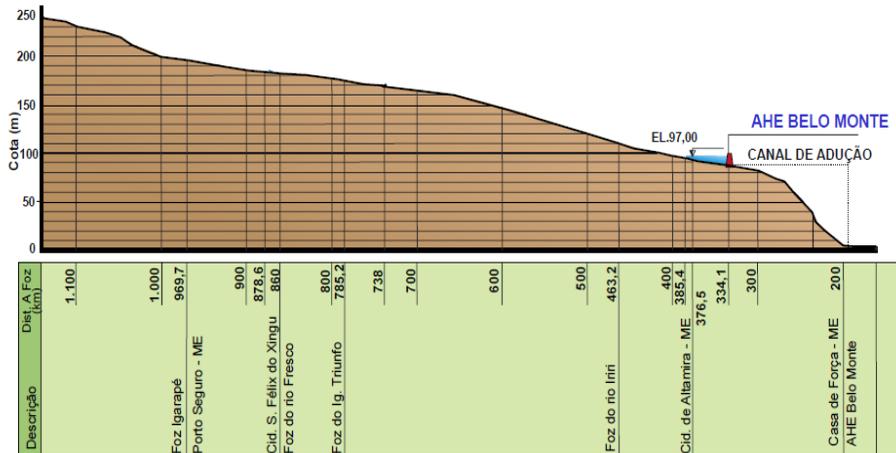
Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

FIGURA 3.5–ALTERNATIVA 2



Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

FIGURA 3.6-ALTERNATIVA 3



Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

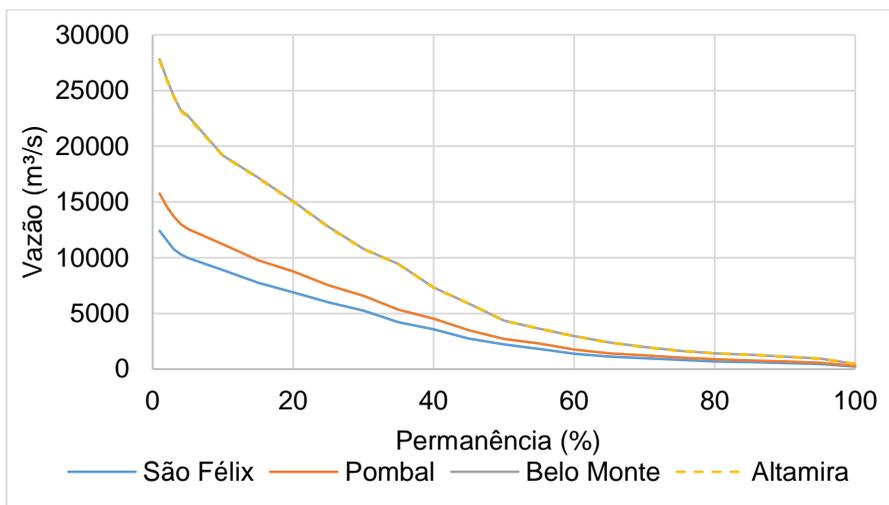
Para a melhor compreensão do potencial energético dos empreendimentos analisados nos estudos de revisão do inventário, as suas principais características hidrológicas são apresentadas no Quadro 3.3, e a curva de permanência de vazões é apresentada na Figura 3.7.

QUADRO 3.3- CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DOS EMPREENDIMENTOS DOS ESTUDOS DE REVISÃO DO INVENTÁRIO

AHE	São Félix	Pombal	Belo Monte	Altamira
AD (Km ²)	208.719	262.681	447.719	447.916
Vazão Média (m ³ /s)	3.623	4.559	7.804	7.771
Máxima Vazão Média (m ³ /s)	13.268	16.753	30.129	30.007
Mínima Vazão Média (m ³ /s)	218	275	444	442
Vazão Especifica l/s/Km ²	17,36	17,36	17,43	17,35

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

FIGURA 3.7 - CURVA DE PROBABILIDADE DE VAZÕES



Fonte: Elaborado pelo autor

As três alternativas de partição de queda foram subdivididas em 5 cenários pelo autor para melhor compreensão e discussão e são apresentadas do Quadro 3.4 ao Quadro 3.8.

**QUADRO 3.4-CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DO
CENÁRIO DE PARTIÇÃO DE QUEDA 1**

AHE	VolÚtil (hm³)	Área Alagada (Km²)	NA máx. (m)	NA mín. (m)	NAJ (m)	Pot. (MW)
São Félix	8660,41	1338,19	210	201,7	183,1	1384
Pombal	3275,99	806,20	185	179,3	168	1189
Altamira	5041,79	860,05	120	112,3	97,4	2541
Belo Monte	0,00	440,00	97	97	4,6	11000
Total	16978,19	3884,44	-	-	-	16114

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu
(2007)

**QUADRO 3.5-CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DO
CENÁRIO DE PARTIÇÃO DE QUEDA 2**

AHE	Vol Útil (hm³)	Área Alagada (Km²)	NA Max (m)	NA mín. (m)	NAJ (m)	Pot. (MW)
São Félix	0,00	1338,19	210	210	185,3	906
Pombal	0,00	806,20	185	185	168	805
Altamira	0,00	860,05	120	120	97,4	1848
Belo Monte	0,00	440,00	97	97	4,6	11000
Total	0,00	3884,44	-	-	-	14559

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu
(2007)

**QUADRO 3.6 -CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DO
CENÁRIO DE PARTIÇÃO DE QUEDA 3**

AHE	Vol Útil (hm³)	Área Alagada (Km²)	NA máx. (m)	NA mín. (m)	NAJ (m)	Pot. (MW)
São Félix	4017,64	904,56	202	196,3	183	900
Pombal	3275,99	806,20	185	179,3	168	1160
Altamira	1528,95	469,10	111	106,3	97,4	1458
Belo Monte	0,00	440,00	97	97	4,6	11000
Total	8822,58	3059,86	-	-	-	14518

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu
(2007)

**QUADRO 3.7 -CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DO
CENÁRIO DE PARTIÇÃO DE QUEDA 4**

AHE	Vol Útil (hm³)	Área Alagada (Km²)	NA máx. (m)	NA mín. (m)	NAJ (m)	Pot. (MW)
São Félix	0,00	904,56	202	202	185,3	600
Pombal	0,00	806,20	185	185	168	805
Altamira	0,00	469,10	111	111	97,4	1150
Belo Monte	0,00	440,00	97	97	4,6	11000
Total	0,00	3059,86	-	-	-	13555

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu
(2007)

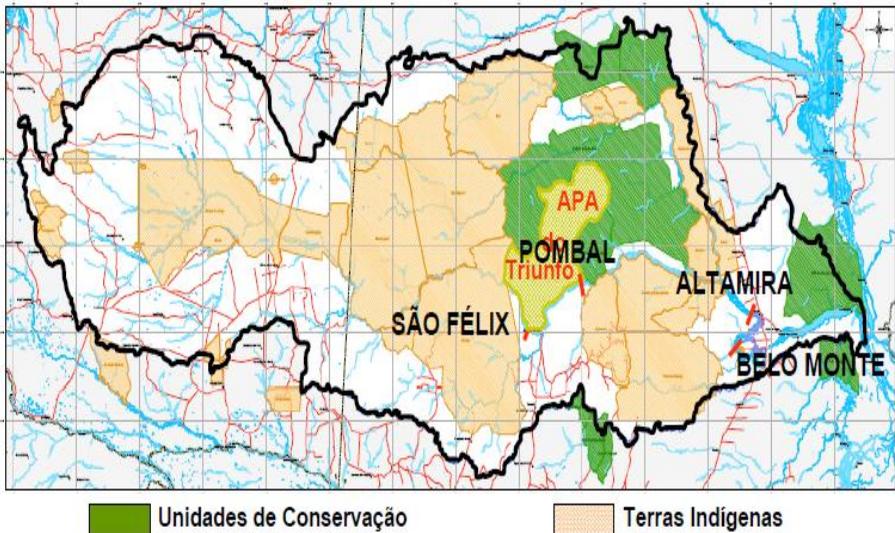
**QUADRO 3.8 - CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DO
CENÁRIO DE PARTIÇÃO DE QUEDA 5**

AHE	Vol Útil (hm³)	Área Alagada (Km²)	NA máx. (m)	NA mín. (m)	NAJ (m)	Pot. (MW)
Belo Monte	0,00	440,00	97	97	4,6	11000
Total	0,00	440,00	-	-	-	11000

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu
(2007)

As alternativas de partição de queda avaliadas na revisão do inventário original foram condicionadas para minimizar a área alagada pelos reservatórios e não interferir nas áreas de conservação permanente e nas áreas indígenas. Por isto nenhum aproveitamento foi proposto para a porção mais a montante da bacia, no estado do Mato Grosso, onde fica localizada a reserva indígena do Xingu. Estas condicionantes também impediram o aproveitamento do rio Xingu entre Pombal e Altamira. A localização das áreas de conservação, as áreas indígenas, e a localização dos aproveitamentos são apresentadas na Figura 3.8.

FIGURA 3.8 -LOCALIZAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS PROPOSTOS



Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

As alternativas de partição de queda que foram estudadas, com a exceção do cenário 5, afetariam populações indígenas; 405 indivíduos de maneira direta (QUADRO 3.9) e 920 indivíduos de maneira indireta (QUADRO 3.10.)

**QUADRO 3.9 - POPULAÇÕES INDÍGENAS AFETADAS
DIRETAMENTE CENÁRIOS 1-4**

Grupos	População
Reserva Indígena de Kararaô (Kaiapós)	30
Reserva Indígena dos Arararas	80
Aldeia Koatinema (Assurinís)	55
Aldeia Ipixiuna (Arawetês)	120
Aldeia de Kokraimoro (Kaiapós)	120
Total	405

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

**QUADRO 3.10 – POPULAÇÕES INDÍGENAS AFETADAS
INDIRETAMENTE CENÁRIOS 1-4**

Aldeias	População
Bacajá	70
Gorotire	520
Baú	50
Menkranotire	280
Total	920

Fonte: Atualização do inventário hidrelétrico da bacia do Xingu (2007)

O estudo de revisão do inventário para adeterminaçãoda melhor alternativa de partição de queda adicionou aos critérios energéticos e econômicos fatores qualitativos sobre os impactos que os aproveitamentos trariam ao meio ambiente e as comunidades indígenas na região dos empreendimentos. A conclusão do estudo indicou o cenário 5 como sendo a melhor alternativa para o aproveitamento da bacia do Xingu segundo estes critérios.Pressões de movimentos sociais indigenistas e

ambientalistas culminaram na Resolução N°6 de 3 de Junho de 2008 do Ministério de Minas e Energia, que em seu artigo 2º determina que o potencial energético a ser explorado será somente aquele situado no rio Xingu, entre a sede urbana do Município de Altamira e a sua foz pela usina de Belo Monte conhecida como Kararaô no estudo inicial.

4 - ANÁLISE ENERGÉTICA

Para análise do potencial energético aprovado e do potencial abdicado da bacia do Xingu, serão necessárias algumas definições sobre os conceitos utilizados no planejamento energético no Brasil tais como:

- A energia firme de um sistema hidrelétrico: É o maior valor possível de energia média anual que pode ser produzida de maneira constante, atendendo sem déficits no caso da repetição das afluições históricas;
- O período hidrológico crítico; Corresponde ao período de tempo em que o armazenamento partindo de seu nível máximo, chegue a seu nível mínimo, sem reenchimentos totais ou parciais, no atendimento da energia firme;
- A energia firme de uma usina hidrelétrica: É definida, por sua contribuição para a energia firme do sistema, ou seja, é a energia média produzida durante o período hidrológico crítico;
- Energia Local: Energia média produzida pela usina referida;
- Energia do Sistema: Energia média produzida por um conjunto de usinas;
- Usina a Fio d'Água: Usina sem reservatório de regularização, de modo que toda a vazão afluenta é defluída, ou seja, é turbinada e ou vertida. O reservatório é suficiente apenas para regularização de vazões diárias ou semanais;
- Usina com acumulação: Usina que dispõe de reservatório com capacidade de regularização mensal, anual, ou até plurianual. Devido ao tamanho do reservatório estas usinas atenuam o efeito da variabilidade das afluições naturais, armazenamento em períodos úmidos e deplecionamento em períodos secos;

As análises realizadas a partir de critérios determinísticos não consideram de forma explícita o comportamento aleatório das

afluências de vazões, e o desconhecimento das afluências futuras é avaliado pela hipótese da repetição de afluências iguais ao registro histórico, não havendo uma imposição de repetição das afluências, apenas considera que um sistema bem sucedido no passado o será no futuro, desta forma analisando de maneira implícita o risco associado ao comportamento aleatório das vazões (NEIRA L. K ,2005). Já as análises realizadas a partir de critérios probabilísticos permitem a avaliação do risco associado ao comportamento aleatório das vazões. Portanto a análise sobre o potencial energético da bacia do Xingu será dividida em critérios determinísticos e critérios probabilísticos de avaliação do risco de déficit.

4.1 - Simulação Determinística

4.1.1.1. Simulação reservatório equivalente

O método que foi utilizado para a avaliação da energia firme no estudo desenvolvido pela ELETRONORTE no início da década de 1970 foi o método da energia afluente (CANAMBRA, 1969), que consiste em transformar as vazões afluentes em energia e os volumes uteis das usinas em um único reservatório equivalente e determinar a máxima energia regularizada pelo sistema ao se esgotar os volumes de seus reservatórios como apresentado abaixo.

$$EN(t) = \sum_{i=1}^{i=n} k(i)Q(i, t)$$

Onde:

$EN(t)$: Energia Afluente à usina(i) no mês(t) (MW);

$Q(i, t)$: Vazão Afluente à usina(i) no mês(t) (m^3/s);

$k(i)$: Produtibilidade da usina(i) (m^2/s^2);

$$K(i) = \frac{gH(i)n(i)}{1000}$$

Onde:

g : aceleração da gravidade (m/s²);

$H(i)$: Queda média da usina(i) (m);

$n(i)$: Rendimento médio da usina(i) (%);

Os armazenamentos dos reservatórios do sistema podem ser agregados, em um sistema equivalente, conforme a seguinte expressão.

$$A_{m\acute{a}x} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{V(i)}{2,628} \left(\sum_{i=1}^{i=n} K(i) \right)$$

Onde:

$A_{m\acute{a}x}$: Armazenamento máximo do sistema (m³);

$V(i)$: Volume útil da usina(i)(m³);

O procedimento fica reduzido ao estudo de regularização de um único reservatório conforme o seguinte algoritmo (FILL, H. D.; PÉRICO, 2013).

Arbitrar EF

$$A(0) = A_{m\acute{a}x}$$

Para t = 1 até n

$$A(t) = \text{mín}(A_{m\acute{a}x}, \quad A(t - 1) + EN(t) - EF)$$

Variar EF até $A_{min} = 0$

No Quadro 4.1 são apresentados os resultados obtidos para as simulações realizadas com o método da energia afluyente, onde foram determinados os períodos críticos e as energias firmes para os cinco cenários avaliados no estudo de revisão do inventário e os resultados do inventario original.

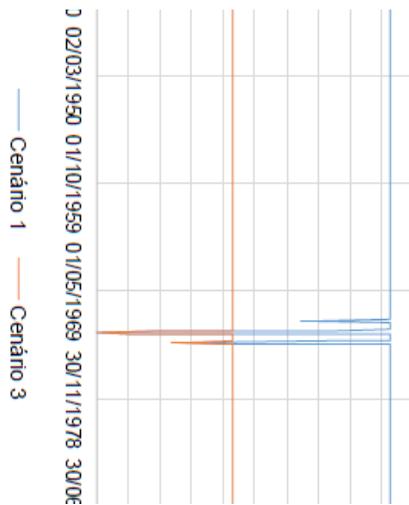
**QUADRO 4.1 - RESULTADOS ENERGÉTICOS DOS
CENÁRIOS DE PARTIÇÃO DE QUEDA.**

Cenário	Potência (MW)	Energia Firme (MW médios)	Área Alagada (km²)	Período Crítico
Inventário A	20375	9500	18300	SIN
Inventário B	20617	9800	18150	SIN
Rev. Inventário 1	16114	7715	3444	01/11/1971 - 01/01/1973
Rev. Inventário 2	14559	6363	3444	01/11/1971 - 01/01/1973
Rev. Inventário 3	14518	6965	2620	01/11/1972 - 01/01/1973
Rev. Inventário 4	13555	2751	2620	01/11/1972 - 01/01/1973
Rev. Inventário 5	11000	4573	440	01/11/1971 - 01/01/1973

Fonte: Elaborado pelo autor

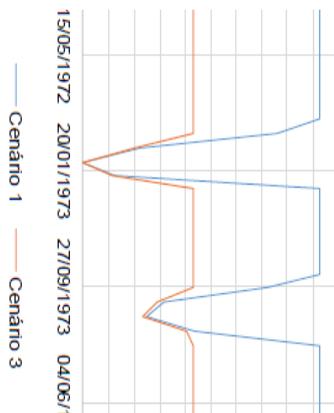
Na Figura 4.1 é ilustrado o nível de armazenamento dos reservatórios para o cenário 1 e 3, que possuem reservatórios de acumulação, ao longo de todo o histórico de afluências, e na Figura 4.2 para os anos do período crítico da bacia do rio Xingu.

FIGURA 4.1- ENERGIA ARMAZENADA PELOS RESERVATÓRIOS AO LONGO DO HISTÓRICO DE AFLUÊNCIAS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

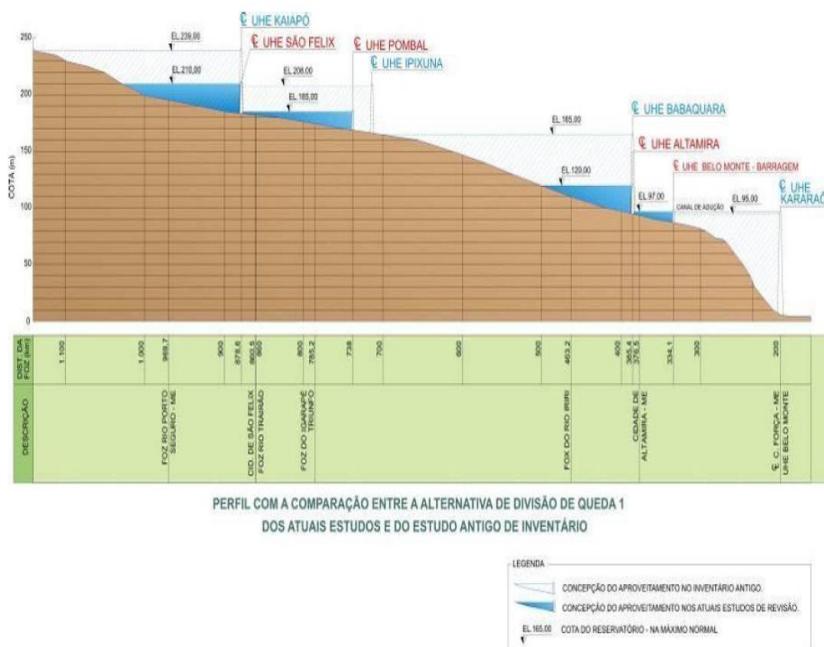
FIGURA 4.2- ENERGIA ARMAZENADA PELOS RESERVATÓRIOS AO LONGO DO PERÍODO CRÍTICO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os estudos de revisão do inventário abandonaram os grandes reservatórios de regularização como ilustra a Figura 4.3, e eliminaram a possibilidade do aproveitamento do rio Iriri e da parcela mais a montante da bacia, já no estado do Mato Grosso, próximo ao parque nacional do Xingu.

FIGURA 4.3-COMPARAÇÃO ENTRE OS INVENTÁRIOS



Fonte: Revisão do inventário do Xingu (2007)

Ao se analisar os resultados obtidos nota-se que o cenário 1 de partição de queda foi o que apresentou o melhor resultado energético, 7.715 MW médios. O cenário 2, que possui a mesma configuração mas sem contemplar deplecionamento, obteve 6.363 MW médios, uma redução de 1.352 MW médios. O cenário 3 com reservatórios menores obteve 6.965 MW médios 750 MW médios inferior ao cenário 1. O cenário 4 que possui a mesma configuração do cenário 3 mas sem contemplar o

deplecionamento obteve 2.751 MW médios. O cenário 5 que contempla apenas o aproveitamento da Volta Grande do Xingu por meio da usina de Belo Monte obteve 4.573 MW médios para o período crítico do cenário 1, 3.142 MW médios a menos que este. O cenário 5, que é o correspondente a configuração da resolução nº6 de Junho de 2008 que alaga 440 km² para produzir 4.573 MW médios de energia firme. Já o cenário 1 o que obteve o melhor resultado energético 7.715 MW médios alaga 3.444 km², onde se observa uma redução de 3.004 km² de área alagada e 3.142 MW médios de energia firme. Ao analisar os resultados do inventário original, se for feita a comparação com o cenário B, o de melhor resultado energético 9.800 MW médios 18.150 km² de área alagada com o cenário 5, a redução foi de 17.710 km² e de 5.227 MW médios.

4.1.1.2. Simulação individualizada

Para avaliar a contribuição de cada reservatório de acumulação proposto a montante do AHE de Belo Monte no estudo de revisão do inventário de 2007. E para avaliar como as usinas operando a fio d'água são beneficiadas pela regularização proporcionada pelas usinas com reservatórios de acumulação a montante. E para permitir avaliar a diferença entre a energia local do AHE de Belo Monte para os cenários 1 e 5, a simulação da operação de cada usina serão avaliadas de maneira individualizada. Partindo-se da definição de energia:

$$E = \frac{\sum Pot. t}{\sum t}$$

Onde:

E - Energia (MW médios)

t – tempo (unidade de tempo)

Pot – Potência (MW)

A potência que pode ser fornecida por uma usina hidrelétrica é definida como:

$$Pot = \frac{g \cdot n_{conj} \cdot H_{liq} \cdot Q_{turb}}{1000}$$

Onde:

Q_{turb} – Vazão Turbinada (m³/s);

g – Aceleração da gravidade (m/s²);

n_{conj} – Rendimento do conjunto turbina gerador (%);

H_{liq} – Queda líquida (m);

A queda líquida sendo calculada como:

$$H_{liq} = H - \Delta h$$

Onde:

Δh - Perda de carga (m)

H – Queda bruta (m)

A queda bruta sendo calculada como:

$$H = NAM - NAJ$$

Onde:

NAM - Nível de água no reservatório (m)

NAJ – Nível de água no canal de fuga (m)

Q_{turb} – Vazão turbinada (m³/s)

A vazão turbinada é limitada pela seguinte expressão:

$$Q_{turb} \leq \begin{cases} Q_{ref} \cdot \left(\frac{H_{liq}}{H_{ref}} \right)^\alpha \\ \frac{Pot. 1000}{n_{conj} \cdot H_{liq} \cdot g} \\ \frac{Pot. (1 - IP) \cdot (1 - TEIF) \cdot 1000}{n_{conj} \cdot H_{liq} \cdot g} \end{cases}$$

Onde:

Q_{ref} – Vazão de referência para gerar a potência instalada (m³/s)

H_{ref} – Queda de referência para gerar a potência instalada (m)

α – Expoente função do tipo de turbina, apresentado no Quadro 4.2.

QUADRO 4.2 - EXPOENTES PARA DETERMINAÇÃO DA MÁXIMA VAZÃO TURBINAVEL

Turbina	α
Francis	0,5
Pelton	0,5
Kaplan	0,2
Bulbo	0,2

Fonte: Manual Metodologia MSUI 2014

IP – Taxa de indisponibilidade programada em função da potência unitária.

$TEIF$ – Taxa equivalente de indisponibilidade forçada em função da potência unitária.

Os valores de IP e TEIF são apresentados no Quadro 4.3.

QUADRO 4.3 - TAXAS DE INDISPONIBILIDADE FORÇADA (TEIF) E TAXAS DE INDISPONIBILIDADE PROGRAMADA (IP)

Pot Unit.(MW)	IP	TEIF
9	6,861%	2,333%
29	6,861%	2,333%
59	5,403%	1,672%
99	8,091%	2,533%
199	8,091%	2,533%
500	12,120%	2,917%
799	12,120%	2,917%
1300	12,120%	2,917%

Fonte: BRACIER, 1980

A vazão disponível para a produção de energia é a vazão afluyente subtraída dos usos consultivos na porção a montante da bacia hidrográfica, da vazão mínima que deve ser mantida a jusante e da vazão evaporada do reservatório calculada conforme a seguinte expressão:

$$Q_{evapo} = EvLiq. \text{Área}. 1000$$

Onde:

Q_{evapo} – Vazão evaporada (m³/s)

$Evliq$ – Evaporação líquida (mm/mês)

Área – Área do reservatório (km²)

A operação dos reservatórios das usinas com volume útil maior que zero será simulada visando atender a energia crítica, sendo está definida como:

$$E_{crit} = Pot. FC$$

Onde:

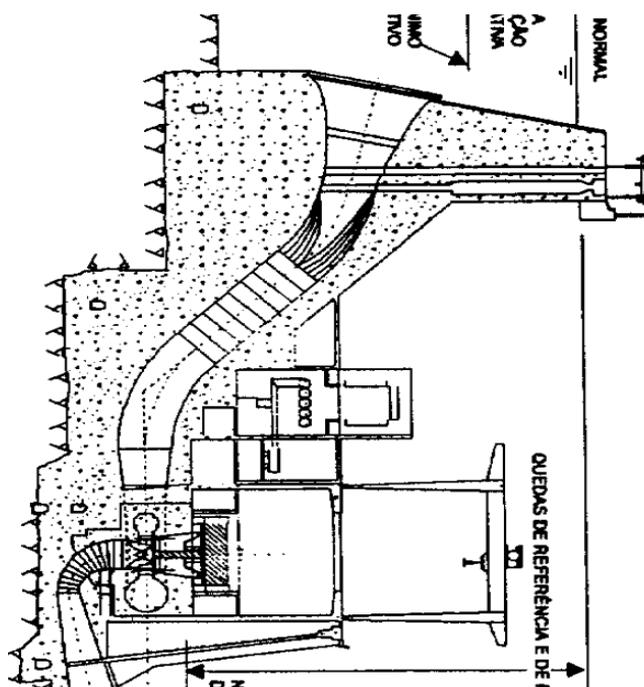
Ecrit – Energia crítica (MW médios)

Pot – Potência instalada (MW)

FC -Fator de carga (0 - 1)

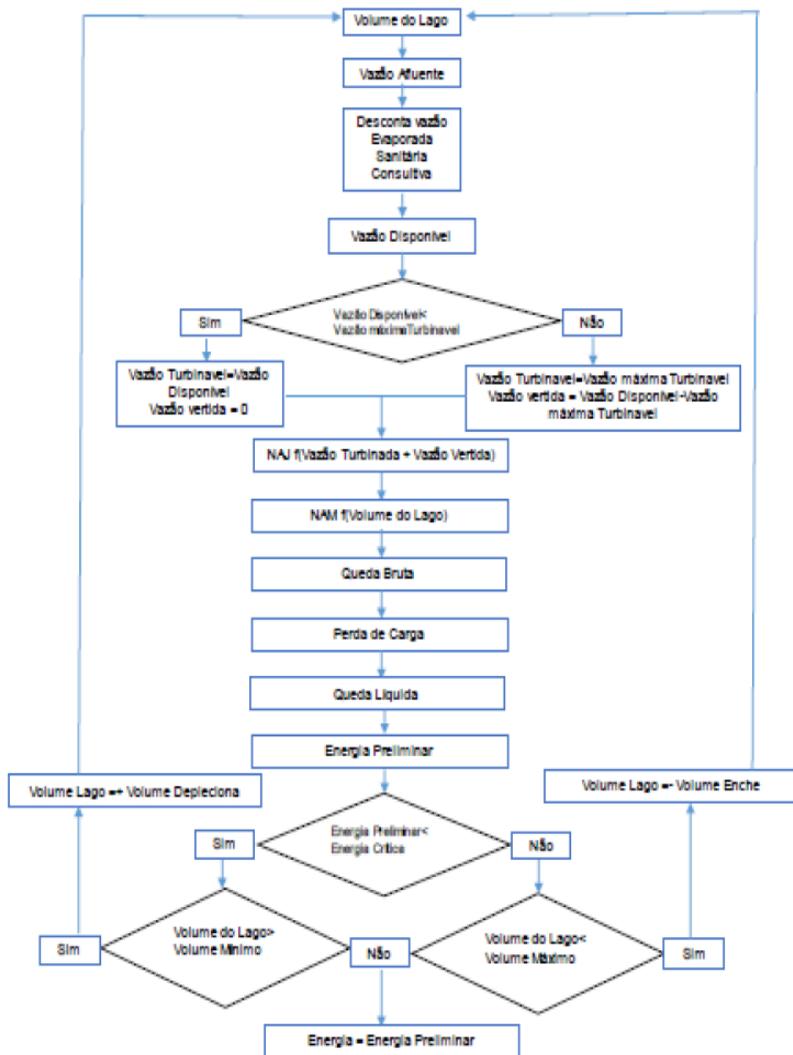
O fator de carga é definido como sendo a taxa de deplecionamento que leva à energia firme do sistema. Foram adotados os valores obtidos com o método da energia afluyente para cada cenário. Na Figura 4.4 é apresentado um esquema ilustrando as principais variáveis envolvidas no cálculo da energia, na Figura 4.5 é apresentado o fluxograma do cálculo de energia, ilustrando o processo iterativo adotado para calcular a energia.

FIGURA 4.4-REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA USINA HIDRELÉTRICA



Fonte: Adaptado ELETROBRAS (1997)

FIGURA 4.5- FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DE ENERGIA DE UMA USINA HIDRELÉTRICA



Fonte: Elaborado pelo autor

A influência da operação dos reservatórios das usinas a montante foi considerada conforme a seguinte expressão:

$$Q_{disponível} = Q_{natural} + \Delta Q_{montante}$$

Onde:

$Q_{disponível}$ – Vazão disponível para a geração (m³/s)

$Q_{natural}$ – Vazão naturalmente afluyente (m³/s)

$\Delta Q_{montante}$ – Resultado da operação do reservatório a montante (m³/s)

O resultado da operação do reservatório da usina a montante é avaliado segundo a seguinte expressão:

$$\Delta Q_{montante} = Q_{afluyente} - Q_{defluyente}$$

Onde:

$\Delta Q_{montante}$ – Resultado da operação da usina (m³/s)

$Q_{afluyente}$ – Vazão afluyente (m³/s)

$Q_{defluyente}$ – Vazão defluyente (m³/s)

O resultado energético do cenário 1 é apresentado no Quadro 4.4.

QUADRO 4.4-RESULTADO ENERGÉTICO CENÁRIO 1

Usina	MLT (m ³ /s)	Área Alagada (km ²)	Potência (MW)	Energia Média (MW médios)
São Félix	3609,44	1338	1384	589,31
Pombal	4535,64	806	1189	412,48
Altamira	7741,46	860	2541	2020,53
Belo Monte	7772,62	440	11000	5137,99
Total		3444	16114	8160,31

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado energético do cenário 2 é apresentado no Quadro 4.5.

QUADRO 4.5-RESULTADO ENERGÉTICO CENÁRIO 2

Usina	MLT (m³/s)	Área Alagada (km²)	Potência (MW)	Energia Média (MW médios)
São Félix	3609,44	1338	906	504,24
Pombal	4541,82	806	805	369,60
Altamira	7740,83	860	1848	1526,41
Belo Monte	7771,90	440	11000	4886,84
Total		3444	14559	7287,09

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado energético do cenário 3 é apresentado no Quadro 4.6.

QUADRO 4.6- RESULTADO ENERGÉTICO CENÁRIO 3

Usina	MLT (m³/s)	Área Alagada (km²)	Potência (MW)	Energia Média (MW médios)
São Félix	3609,44	905	900	397,41
Pombal	4539,66	806	1160	415,70
Altamira	7742,15	469	1458	1239,72
Belo Monte	7772,51	440	11000	5133,18
Total		2620	14518	7186,01

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado energético do cenário 4 é apresentado no Quadro 4.7.

QUADRO 4. 7- RESULTADO ENERGÉTICO CENÁRIO 4

Usina	MLT (m ³ /s)	Área Alagada (km ²)	Potência (MW)	Energia Média (MW médios)
São Félix	3608,64	905	600	340,22
Pombal	4541,82	806	805	369,60
Altamira	7740,83	469	1150	948,01
Belo Monte	7771,90	440	11000	4886,84
Total		2620	13555	6544,67

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado energético do cenário 4 é apresentado no Quadro 4.8.

QUADRO 4.8- RESULTADO ENERGÉTICO CENÁRIO 5

Usina	MLT (m ³ /s)	Área Alagada (km ²)	Potência (MW)	Energia Média (MW médios)
São Félix	0,00	0	0	0,00
Pombal	0,00	0	0	0,00
Altamira	0,00	0	0	0,00
Belo Monte	7771,90	440	11000	4886,84
Total		440	11000	4886,84

Fonte: Elaborado pelo autor

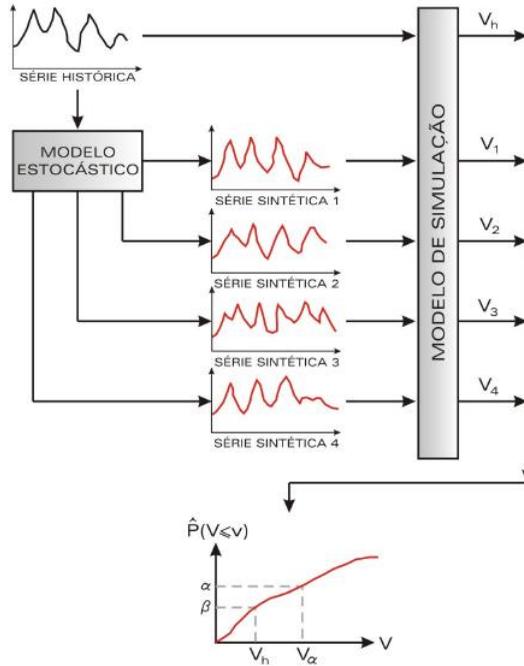
4.2 - Simulação Probabilística

As análises realizadas a partir de critérios probabilísticos permitem a avaliação do risco associado ao comportamento aleatório das vazões. Para tal avaliação será utilizado o Método de Monte Carlo, que surgiu oficialmente em 1949 com o artigo *The Monte Carlo Method* dos matemáticos John vonNeuman e Stanislaw Ulam. O nome foi dado em alusão às roletas dos

cassinos do Principado de Monte Carlo, que são um gerador de números aleatórios(GÓMEZ, L, A, 2012). A ideia básica do método consiste em analisar os dados históricos como apenas uma das possíveis realizações de um processo estocástico, processos aleatórios dependentes do tempo. Pode-se imaginar que a natureza sorteou a série histórica segundo algum conjunto de leis probabilísticas. Um novo sorteio redundaria em outra série diferente da histórica, mas igualmente provável. Se a função de distribuição de probabilidades dos dados históricos for conhecida, pode-se gerar N séries para diferentes probabilidades, mas com características semelhantes, e utilizá-las para alimentar o modelo de simulação e obter os resultados para as N série e determinar a curva de probabilidade associada.

Para que o método possa ser aplicado de maneira correta é necessário que as variáveis em questão satisfaçam a condição de independência, ou seja, uma série não influencia no resultado da outra. O teorema do limite central afirma que sob condições gerais a função de distribuição de probabilidade acumulada de uma soma de variáveis aleatórias independentes aproxima-se de função Gaussiana de distribuição de probabilidades acumuladas de variáveis aleatórias, podendo estas não ser Gaussianas. Ou seja, o resultado da simulação com o método de Monte Carlo será uma curva Normal de distribuição de probabilidades, independente da distribuição utilizada para alimentar o modelo, e em caso contrário torna a simulação realizada sem efeito. O esquema resumo do método de Monte Carlo é apresentado na Figura 4.6(NAGHETTINI, 2007).

FIGURA 4.6 - REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO.



Fonte: NEIRA, L. K (2005)

O modelo que será utilizado para a análise, consistiu na geração de séries sintéticas com base nos parâmetros estatísticos da série histórica. A função de distribuição de probabilidade escolhida foi a função normal conforme a seguinte equação:

$$f(x) = \frac{e^{\left[\frac{-1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}}{\sqrt{2\pi}\sigma}$$

Onde:

σ – Média;

μ – Desvio padrão;

x – Probabilidade;

Para cada série histórica foram determinados a média e o desvio padrão por mês para serem a condição de contorno na geração das sériessintéticas. As probabilidades para cada mês de cada série foram consideradas as mesmas por ano, pois caso fossem consideradas probabilidades individuais para cada local as séries não respeitariam a relação de dependência física entre elas e entre os meses, seriam eventos independentes entre si, o que na prática não ocorre.

Para a geração das probabilidades anuais foi utilizado o algoritmo de Mersenne Twister que tem seu nome devido ao número primo de Mersenne, e foi desenvolvido por Makoto Matsumoto e Takuji Nishimura. O algoritmo permite a geração de números pseudoaleatórios de alta qualidade e longos períodos, permitindo a obtenção de resultados com grande amplitude, com séries relativamente pequenas (MATSUMOTO, M. NISHIMURA 1998). Foi utilizado o suplemento para Excel nrand 3.3 que permite utilizar o algoritmo de Mersenne Twister em forma de função, sendo o Excel é a ferramenta ideal para se implementar o método de Monte Carlo (GÓMEZ, L, A, 2012).

Para que as probabilidades pseudoaleatórias geradas resultem em valores de vazão coerentes com a realidade física da bacia do Xingu, seus valores foram truncados. Para a determinação dos limites de probabilidade foram levantados os menores e os maiores valores de vazão das series históricas para cada usina. Estes valores são apresentados no Quadro 4.9.

QUADRO 4.9- VALORES EXTREMOS DE VAZÃO DAS SÉRIES HISTÓRICAS

Usina	Mínimo	Data	Máximo	Data
São Félix	218	set/69	13268	abr/45
Pombal	275	set/69	16753	abr/45
Altamira	442	out/69	30007	mar/80
Belo Monte	444	out/69	30129	mar/80

Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada valor extremo foi calculada a probabilidade associada destes eventos a partir da função inversa normal para a média e o desvio padrão do mês do evento. Os valores mais restritivos foram os do AHE Belo Monte. Para os meses dos valores extremos de Belo Monte foi calculado o intervalo de confiança associado ao desvio padrão do mês para os 75 anos observados. Os valores fisicamente extremos foram subtraídos do intervalo de confiança e as probabilidades limites para a bacia do Xingu foram calculadas para estes valores, que são apresentados no Quadro 4.10.

QUADRO 4.10- VALORES EXTREMOS DE VAZÃO DAS SÉRIES HISTÓRICAS.

Vazão Extrema (m ³ /s)	Probabilidade acumulada
379	0,00884
31201	0,99712

Fonte: Elaborado pelo autor

Para validar a utilização da distribuição normal de probabilidades para a geração das probabilidades aleatórias foi realizado o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, que é um teste não paramétrico, cuja estatística de teste tem como base a diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas (NAGHETTINI, 2007). A estatística do teste, *D*, crítico corresponde

à maior diferença entre as probabilidades empírica e teórica. Os valores críticos da estatística do teste são tabelados em função do número da amostra N e do nível de significância, α .

Para as amostras em análise com 75 membros e com o nível de significância (α) de 95% pode-se determinar a estatística do teste pela seguinte expressão:

$$D_{\text{crítico}} = \frac{1,36}{\sqrt{N}} = \frac{1,36}{\sqrt{75}} = 0,157$$

Onde:

N – Tamanho da amostra

No Quadro 4.11 é apresentado o resultado do teste de kolmogorovSmirnov para São Félix.

QUADRO 4.11- RESULTADO DOTESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV PARA SÃO FÉLIX.

Mês	Distância	Resultado
Jan	0,098	Aderente
Fev	0,077	Aderente
Mar	0,039	Aderente
Abr	0,090	Aderente
Mai	0,110	Aderente
Jun	0,097	Aderente
Jul	0,124	Aderente
Ago	0,108	Aderente
Set	0,080	Aderente
Out	0,075	Aderente
Nov	0,126	Aderente
Dez	0,146	Aderente

Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.12 é apresentado o resultado do teste de kolmogorovsmirnov para Pombal.

QUADRO 4.12 - RESULTADO DO TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV PARA POMBAL.

Mês	Distância	Resultado
Jan	0,098	Aderente
Fev	0,076	Aderente
Mar	0,040	Aderente
Abr	0,102	Aderente
Mai	0,109	Aderente
Jun	0,097	Aderente
Jul	0,124	Aderente
Ago	0,111	Aderente
Set	0,078	Aderente
Out	0,074	Aderente
Nov	0,121	Aderente
Dez	0,143	Aderente

Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.13 é apresentado o resultado do teste de kolmogorovsmirnov para Altamira.

QUADRO 4.13 - RESULTADO DO TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV PARA ALTAMIRA.

Mês	Distância	Resultado
Jan	0,143	Aderente
Fev	0,096	Aderente
Mar	0,076	Aderente
Abr	0,081	Aderente
Mai	0,105	Aderente
Jun	0,100	Aderente
Jul	0,133	Aderente
Ago	0,136	Aderente
Set	0,077	Aderente
Out	0,073	Aderente
Nov	0,111	Aderente
Dez	0,150	Aderente

Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.14 é apresentado o resultado do teste de kolmogorovsmirnov para Belo Monte.

QUADRO 4.14- RESULTADO DO TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV PARA BELO MONTE.

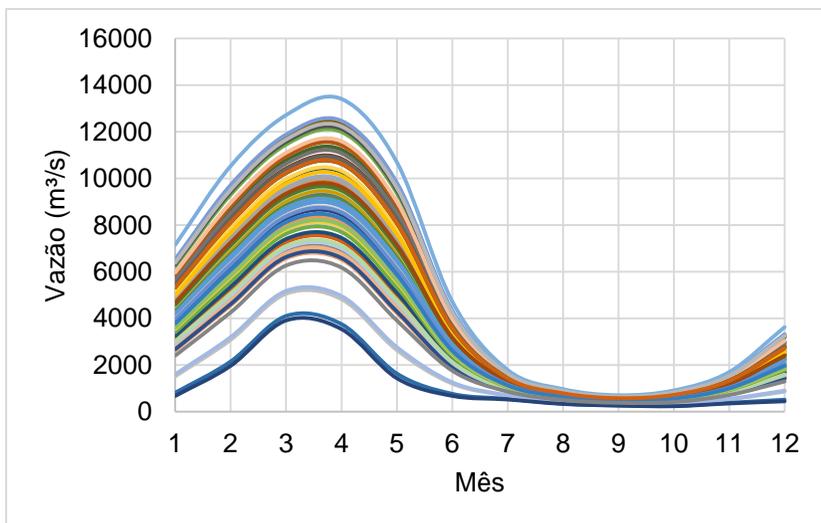
Mês	Distância	Resultado
Jan	0,143	Aderente
Fev	0,096	Aderente
Mar	0,076	Aderente
Abr	0,081	Aderente
Mai	0,104	Aderente
Jun	0,100	Aderente
Jul	0,133	Aderente
Ago	0,136	Aderente
Set	0,076	Aderente
Out	0,073	Aderente
Nov	0,111	Aderente
Dez	0,150	Aderente

Fonte: Elaborado pelo autor

Nos apêndices de A a C são apresentados os testes de kolmogorovsmirnov de forma gráfica.

A Figura 4.7 apresenta os hidrogramas mensais para uma das séries geradas para São Félix.

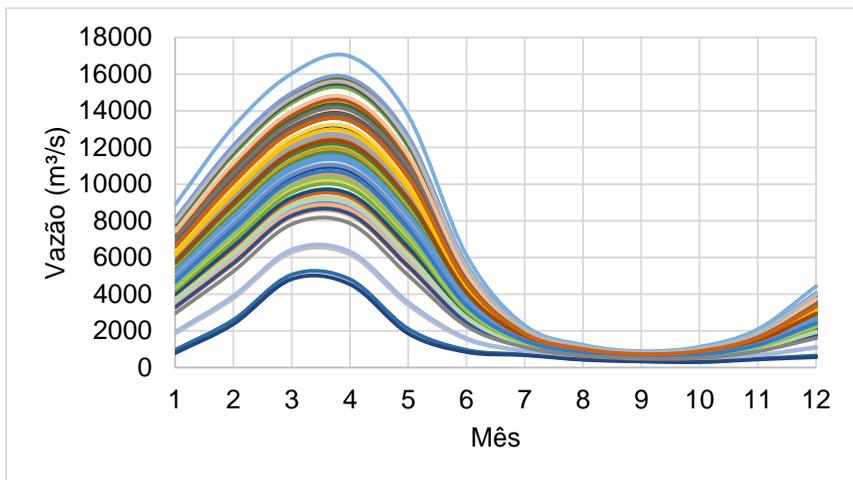
FIGURA 4.7 - VAZÕES MÉDIA MENSAIS SINTÉTICAS PARA SÂOFÉLIX



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.8 apresenta os hidrogramas mensais para uma das séries geradas para Pombal.

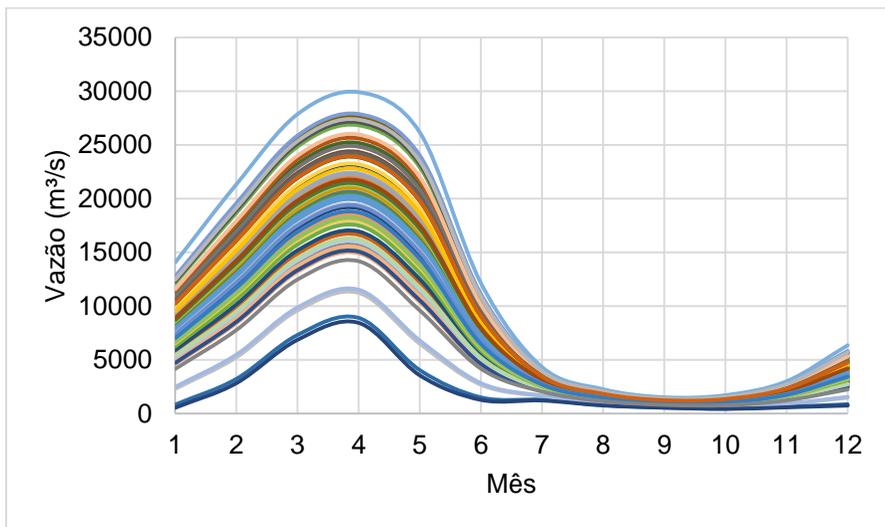
FIGURA 4.8 - VAZÕES MÉDIA MENSAIS SINTÉTICAS PARA POMBAL



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.9 apresenta os hidrogramas mensais para uma das séries geradas para Altamira.

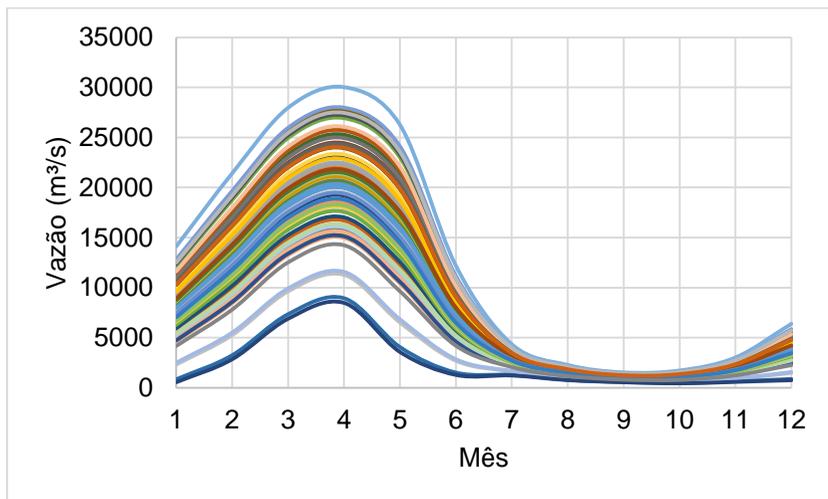
FIGURA 4.9 - VAZÕES MÉDIA MENSAIS SINTÉTICAS PARA ALTAMIRA



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.10 apresenta os hidrogramas mensais para uma das séries geradas para Belo Monte.

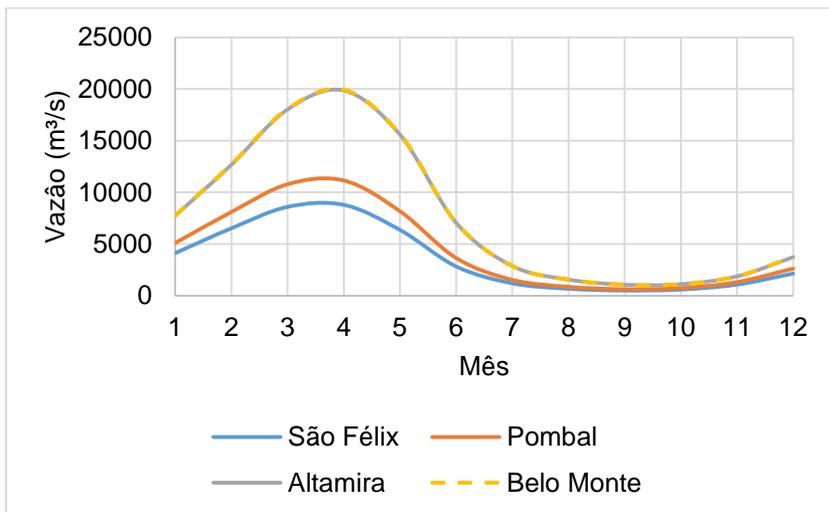
FIGURA 4.10 - VAZÕES MÉDIA MENSAIS SINTÉTICAS PARA BELO MONTE



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 4.11 são apresentados os hidrogramas mensais simultâneos de um ano para as quatro usinas, onde nota-se que a coerência física foi mantida.

FIGURA 4.11 - VAZÕES MÉDIA MENSAIS SINTÉTICAS PARA BELO MONTE



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo (LEVINE,2000) o tamanho da amostra pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$N = \frac{(z_{\alpha/2})^2 \cdot \mu}{E^2}$$

Onde:

N - Tamanho da amostra

$z_{\alpha/2}$ – Grau de confiança

μ - Desvio Padrão

E - Erro absoluto (intervalo de confiança)

Para 95% de grau de confiança e 0,5 MW médio de intervalo de confiança foi estimado que uma amostra composta de 2000 sériessera suficiente para atender os critérios estabelecidos.

Após a geração das 2000 séries com 75 anos cada, o mesmo número de anos das séries históricas foi realizada uma análise da qualidade das séries geradas, para verificar se elas respeitaram os limites estatísticos estabelecidos.

No Quadro 4.15 é apresentado um comparativo entre as vazões médias mensais histórica e as séries sintéticas de São Félix.

QUADRO 4.15-COMPARAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA COM AS SÉRIE SINTÉTICAS DE SÃO FÉLIX.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Série histórica São Félix	4132	6534	8604	8798	6373	2837	1201	674	501	599	1076	2144
Séries sintéticas São Félix	4133	6535	8605	8800	6374	2837	1201	674	501	599	1076	2144
Diferença (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%

Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.16 é apresentado um comparativo entre as vazões médias mensais histórica e as séries sintéticas de Pombal.

QUADRO 4.16 - COMPARAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA COM AS SÉRIE SINTÉTICAS DE POMBAL.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Série histórica Pombal	5107	8112	10794	11157	8182	3652	1536	858	630	739	1317	2626
Séries sintéticas Pombal	5108	8113	10795	11158	8183	3653	1536	858	630	739	1317	2626
Diferença (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%

Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.17 é apresentado um comparativo entre as vazões médias mensais histórica e as séries sintéticas de Altamira.

QUADRO 4.17 - COMPARAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA COM AS SÉRIE SINTÉTICAS DE ALTAMIRA.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Série histórica Altamira	7752	12694	18051	19879	15604	7066	2874	1558	1064	1114	1873	3738
Séries sintéticas Altamira	7753	12697	18054	19882	15607	7067	2874	1558	1064	1114	1874	3738
Diferença (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%

Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.18 é apresentado um comparativo entre as vazões médias mensais histórica e as séries sintéticas de Belo Monte.

QUADRO 4.18- COMPARAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA COM AS SÉRIE SINTÉTICAS DE BELO MONTE.

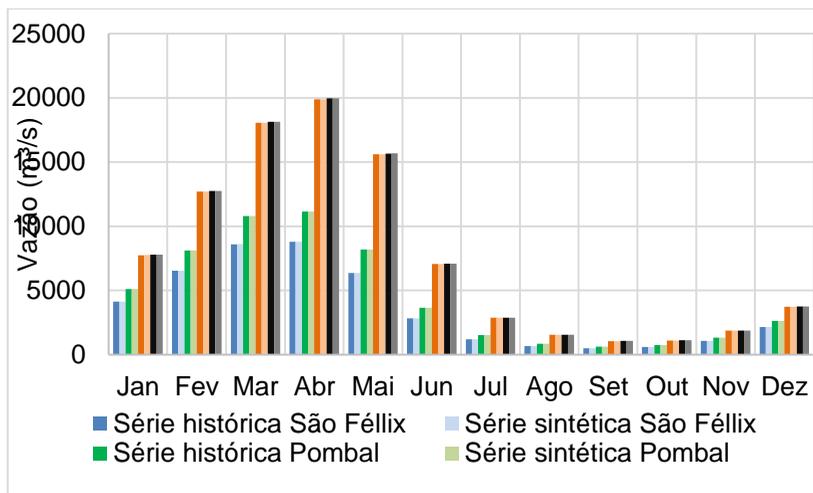
QUADRO 4.18- COMPARAÇÃO DA SÉRIE HISTÓRICA COM AS SÉRIE SINTÉTICAS DE BELO MONTE.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Série histórica Belo Monte	7783	12746	18125	19960	15668	7094	2886	1564	1068	1118	1881	3753
Séries sintéticas Belo Monte	7785	12749	18127	19963	15670	7096	2886	1565	1068	1119	1881	3754
Diferença (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.12 apresentado o comparativo entre as médias mensais de maneira gráfica.

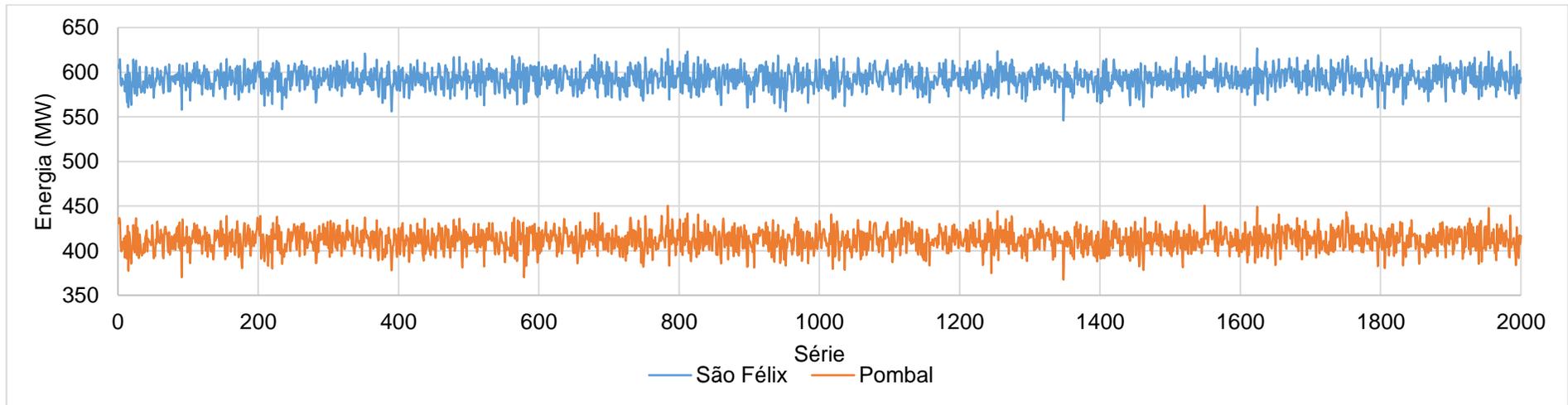
FIGURA 4.12 - COMPARAÇÃO ENTRE AS SÉRIES HISTÓRICAS E SINTÉTICAS DA BACIA DO XINGU



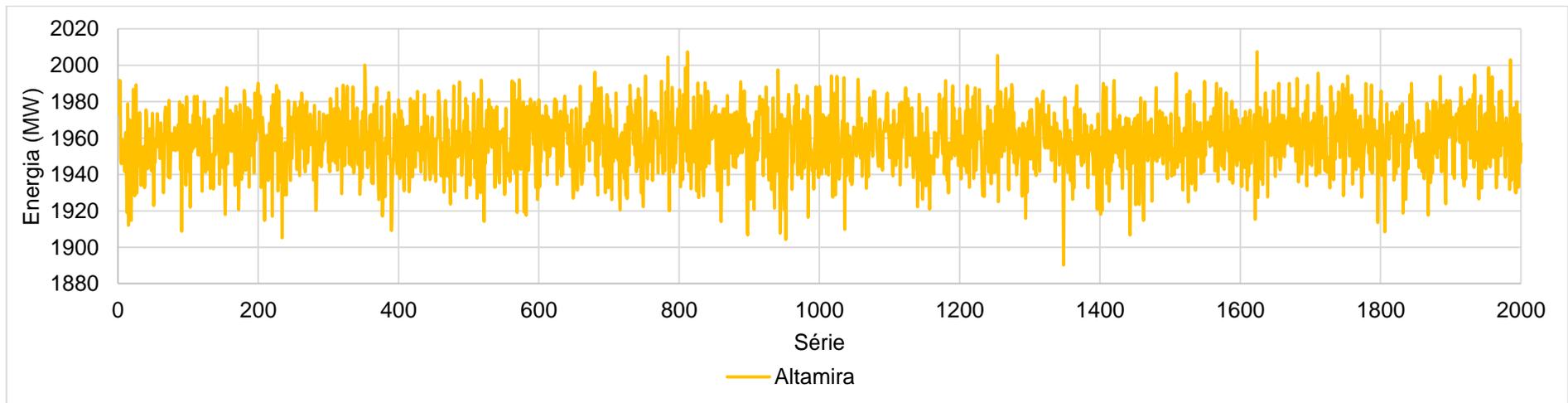
Fonte: Elaborado pelo autor

As séries geradas foram consideradas estatisticamente equivalentes às séries históricas, e foram utilizadas para o cálculo da energia média. Para o cálculo da energia média foi utilizado o modelo de simulação individualizada apresentado no item 4.1.1.2. A avaliação foi reduzida para os cenários extremos 1 e 5.

Na Figura 4.13 são apresentados os valores anuais de energia para as séries sintéticas de São Félix e Pombal para o cenário 5, na Figura 4.14 de Altamira, na Figura 4.15 de Belo Monte e na Figura 4.16 os valores para toda a bacia do Xingu para o cenário 1.

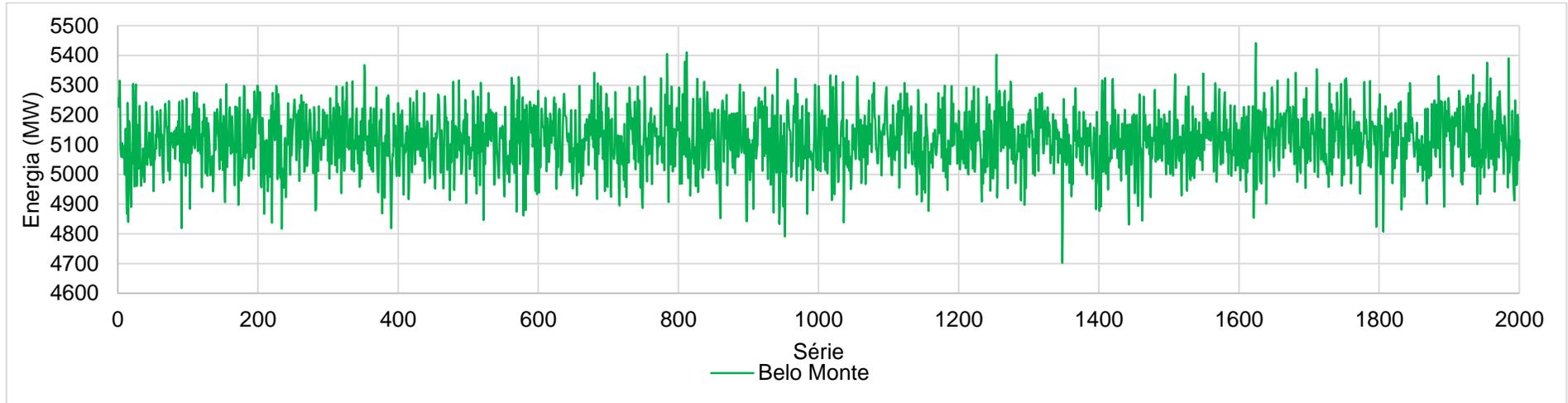
FIGURA 4.13 - ENERGIA MÉDIA ANUAL DE SÃO FÉLIX E POMBAL CENÁRIO 1

Fonte: Elaborado pelo autor

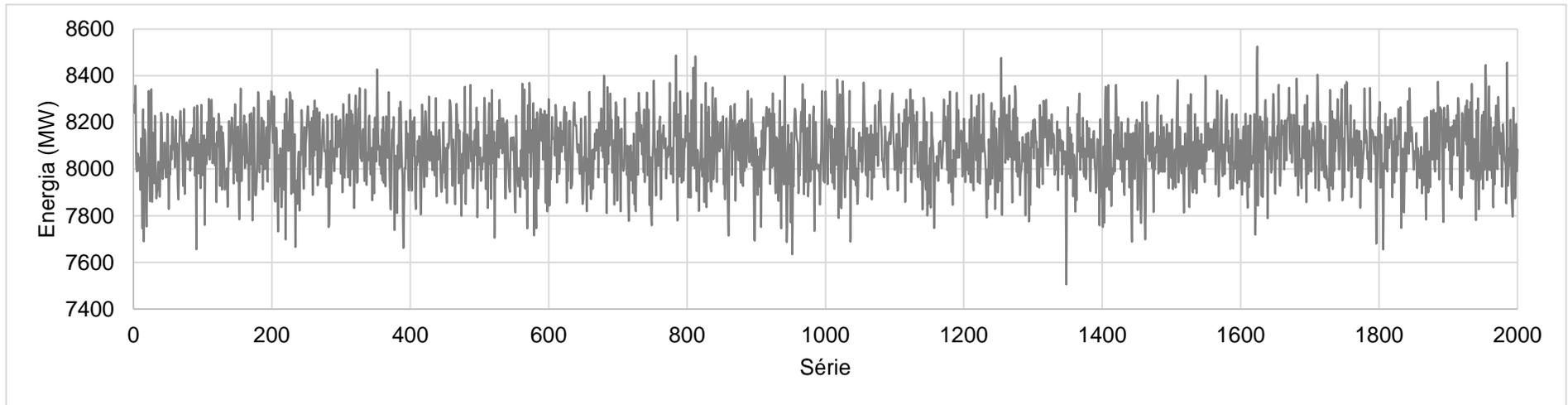
FIGURA 4.14 - ENERGIA MÉDIA ANUAL DE ALTAMIRA CENÁRIO 1

Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA 4.15 - ENERGIA MÉDIA ANUAL DE BELO MONTE CENÁRIO 1



Fonte: Elaborado pelo autor

FIGURA 4.16 - ENERGIA MÉDIA ANUAL DA BACIA DO XINGU CENÁRIO 1

Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.19 são apresentados os principais parâmetros estatísticos dos resultados obtidos da energia média anual das séries sintéticas para o cenário 1.

QUADRO 4.19-PARÂMETROS ESTATÍSTICOS CENÁRIO 1

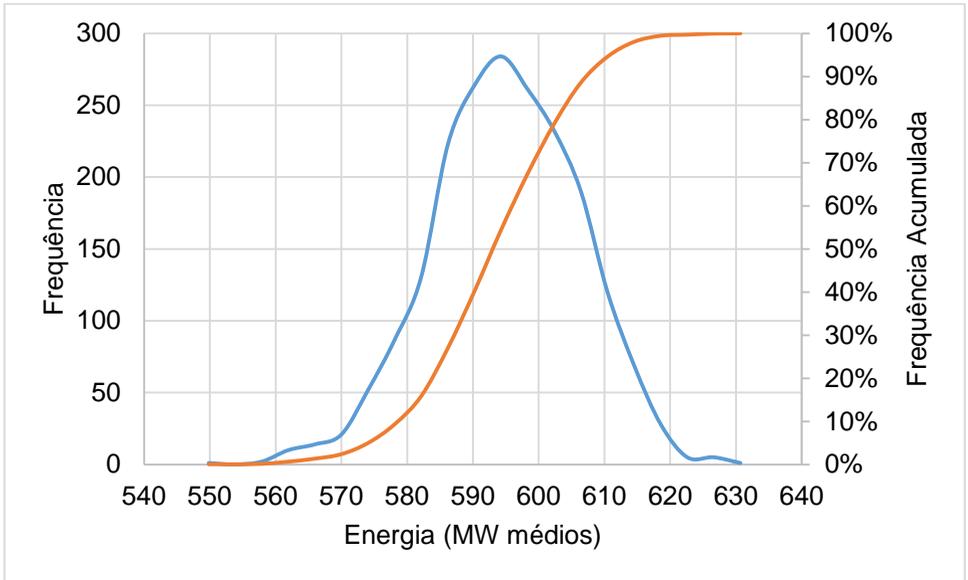
Usina	São Félix	Pombal	Altamira	Belo Monte	Total
Dimensão da amostra	2000	2000	2000	2000	2000
Média (MW)	593	412	1.958	5.116	8.079
Variância (MW)	127	141	274	10.026	19.173
Desvio Padrão (MW)	11	12	17	100	138
Amplitude (MW)	81	83	117	739	1.019
Máximo (MW)	627	451	2.007	5.441	8.525
Mínimo (MW)	546	368	1.890	4.702	7.506
Assimetria (MW)	-0,20	-0,15	-0,21	-0,17	-0,18
Curtose (MW)	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
n° Classes	20	20	20	20	20
Alfa	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%
Intervalo de Confiança (MW)	0,49	0,52	0,73	4,39	6,07

Fonte: Elaborado pelo autor

Para que seja possível verificar se o teorema do limite central foi respeitado, foram verificadas a frequência na qual os valores de energia média anual ocorreram para cada usina. As frequências também foram acumuladas e são apresentadas de forma percentual para corroborar com a análise. Os resultados obtidos foram considerados gaussianos o suficiente para se aceitar que o teorema do limite central foi respeitado, não tendo havido perda de aleatoriedade. Na

Figura 4.17 são apresentadas as frequências de energia para São Félix.

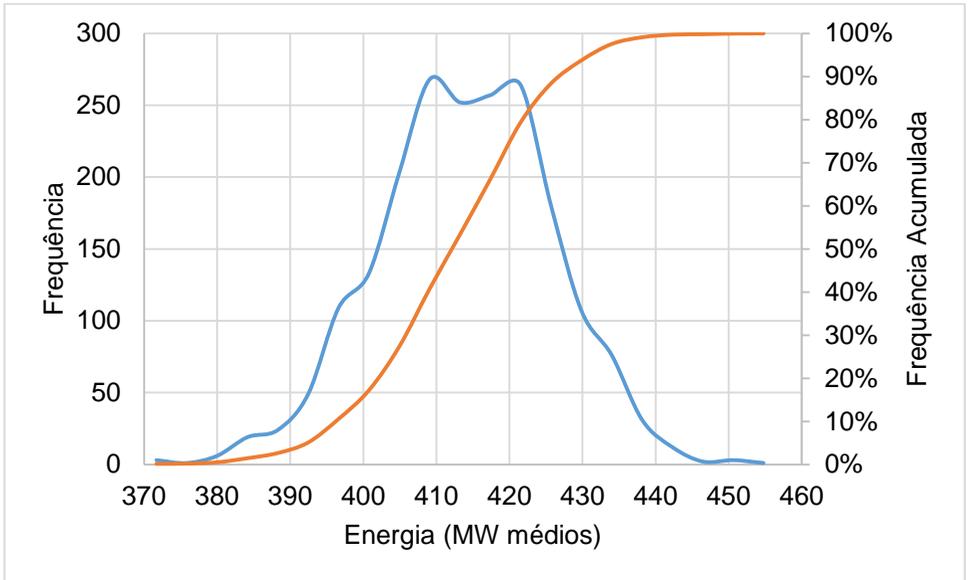
FIGURA 4.17 - DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA SÃO FÉLIX CENÁRIO 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.18 são apresentadas as frequências de energia para Pombal.

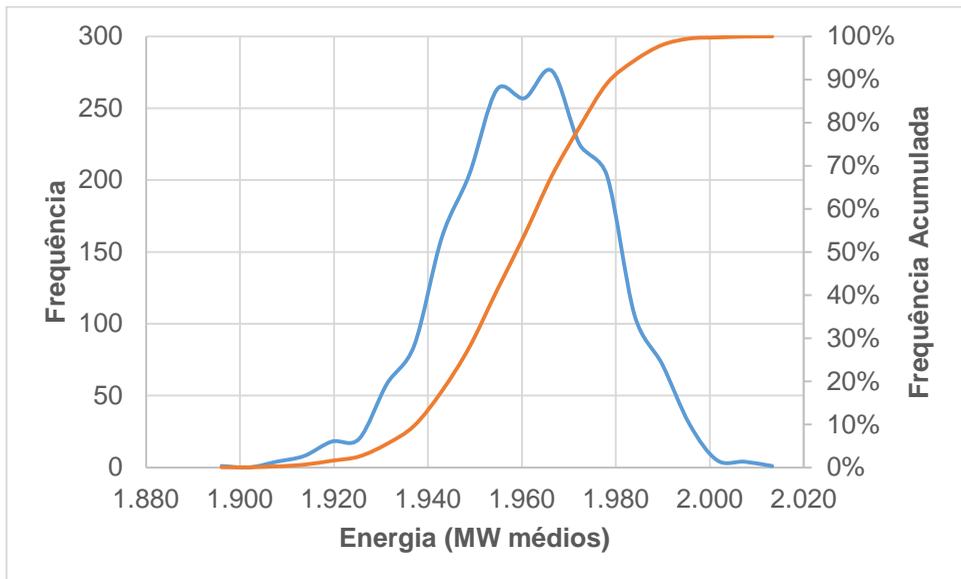
**FIGURA 4.18 - DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA POMBAL
CENÁRIO 5**



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.19 são apresentadas as frequências de energia para Altamira.

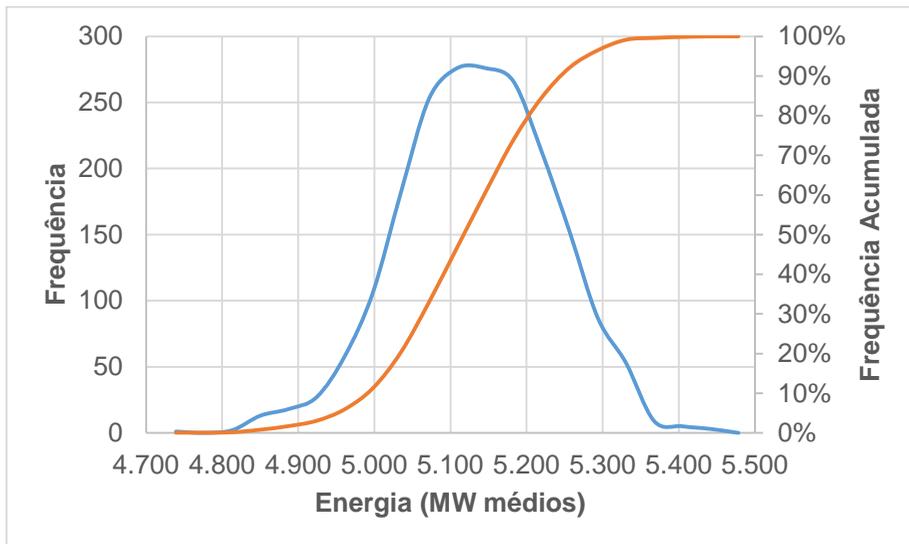
**FIGURA 4.19 - DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA
ALTAMIRA CENÁRIO 1**



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.20 são apresentadas as frequências de energia para Belo Monte.

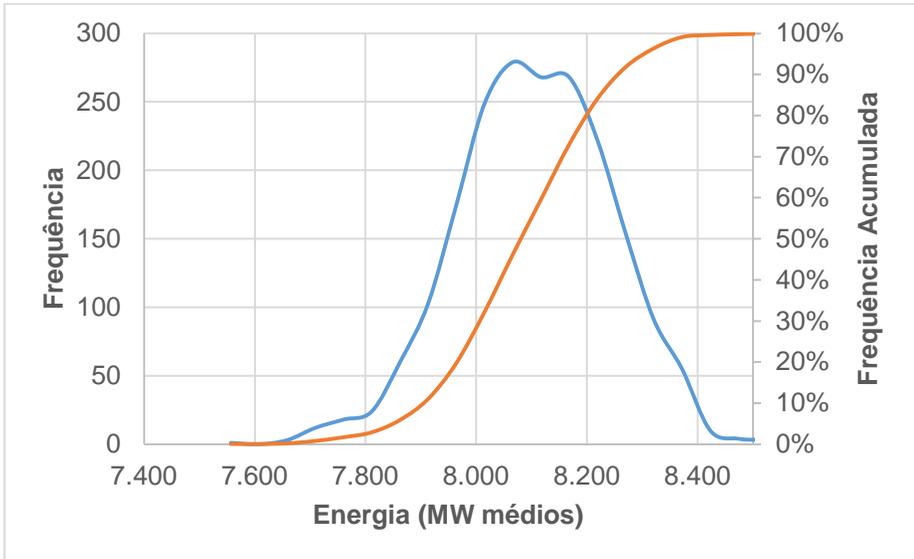
FIGURA 4.20 - DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA BELO MONTE CENÁRIO 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.21 são apresentadas as frequências de energia para a bacia do Xingu.

FIGURA 4.21 - DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA A BACIA DO XINGU CENÁRIO 1



Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.20 são apresentados os valores de energia média anual associadas a probabilidade de ocorrência para a bacia do Xingu para o cenário 1.

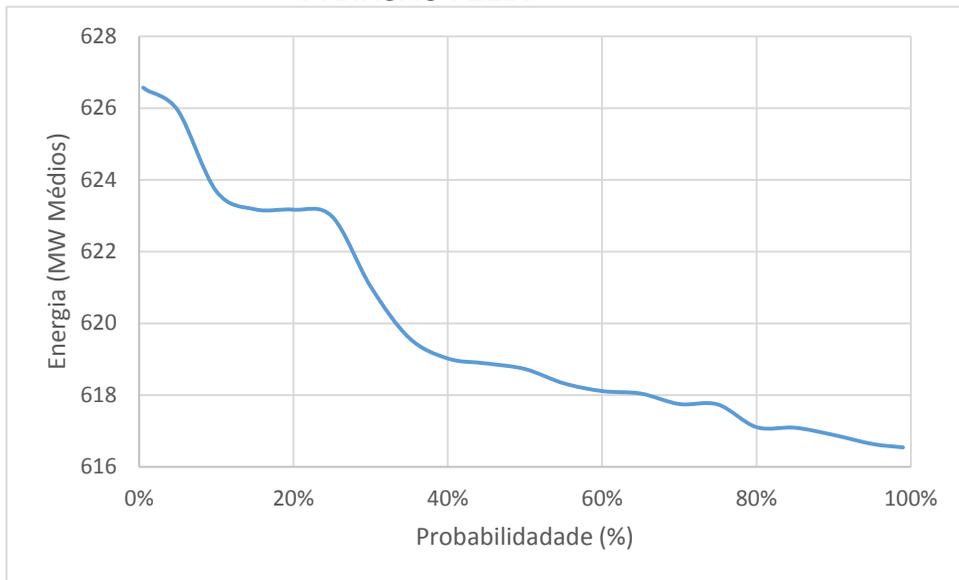
**QUADRO 4.20- PROBABILIDADE DE ENERGIA BACIA DO
XINGU CENÁRIO 1 (MW)**

Probabilidade (%)	São Félix	Pombal	Altamira	Belo Monte	Total
1,00%	626,50	450,59	2007,41	5435,22	8517,07
5,00%	625,93	450,47	2007,34	5410,51	8486,17
10,00%	623,68	449,33	2005,30	5405,18	8482,87
15,00%	623,18	447,86	2004,58	5402,39	8475,87
20,00%	623,17	444,51	2002,98	5390,57	8456,13
30,00%	621,02	442,28	1998,70	5372,84	8426,47
40,00%	619,02	441,87	1997,47	5354,14	8404,32
50,00%	618,73	440,75	1995,66	5341,98	8399,61
60,00%	618,11	439,60	1994,15	5339,52	8387,63
70,00%	617,75	439,04	1994,06	5333,44	8378,90
80,00%	617,11	438,85	1993,92	5331,23	8373,65
85,00%	617,09	438,18	1993,91	5329,25	8372,72
90,00%	616,89	437,48	1993,67	5328,32	8370,31
95,00%	616,64	437,34	1992,73	5325,12	8369,03
99,00%	616,54	437,27	1992,09	5324,58	8368,96

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.22 é apresentada a curva de probabilidade de energia para São Félix.

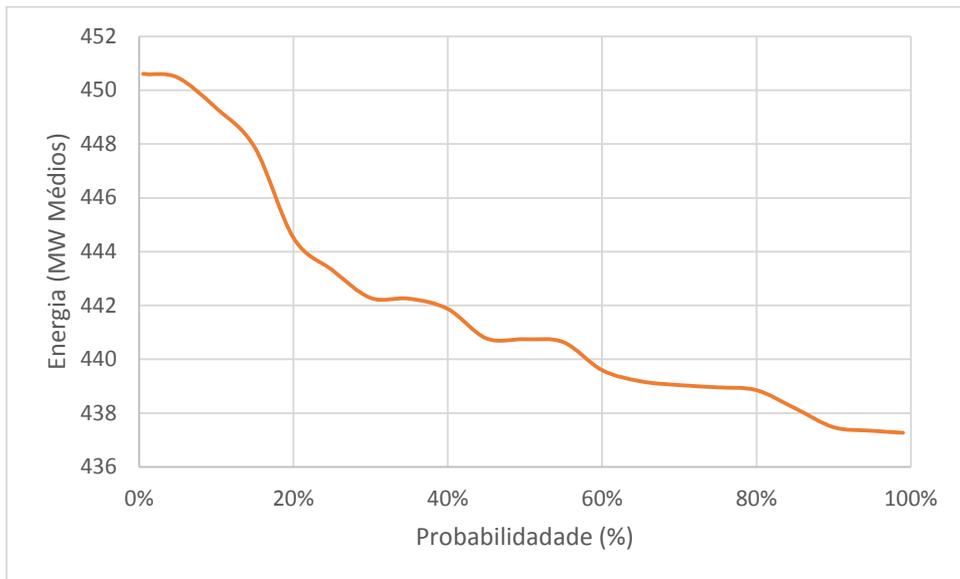
**FIGURA 4.22 - CURVA DE PROBABILIDADE DE ENERGIA
PARASÃO FÉLIX**



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.23 é apresentada a curva de probabilidade de energia para Pombal.

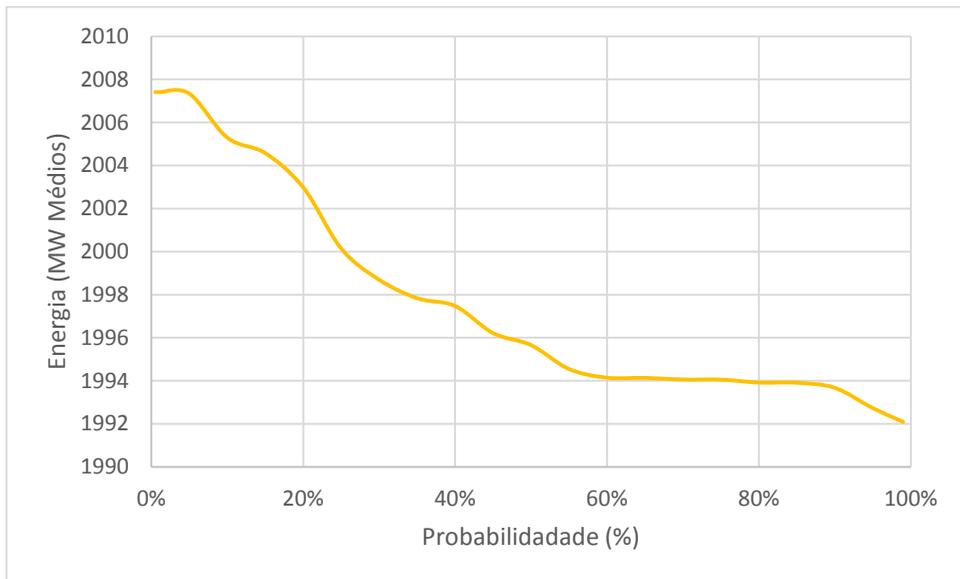
FIGURA 4.23 - CURVA DE PROBABILIDADE DE ENERGIA PARA POMBAL



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.24 é apresentada a curva de probabilidade de energia para Altamira.

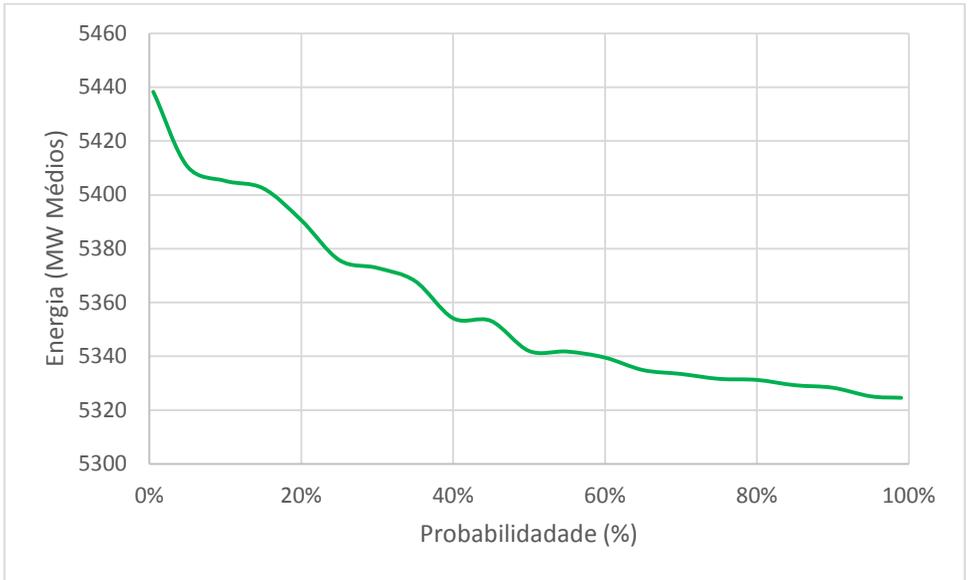
FIGURA 4.24 - CURVA DE PROBABILIDADE DE ENERGIA PARA ALTAMIRA



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.25 é apresentada a curva de probabilidade de energia para Belo Monte.

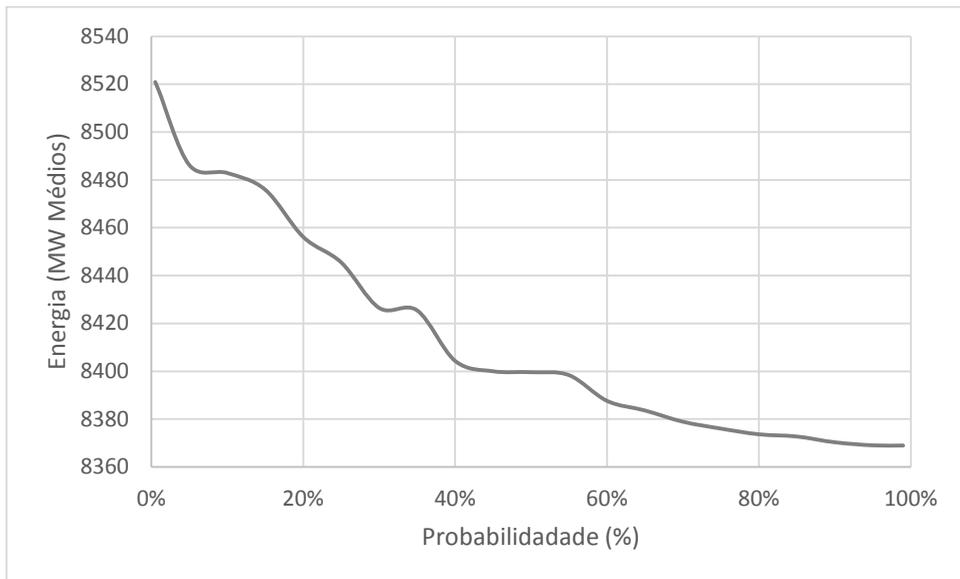
FIGURA 4.25 - CURVA DE PROBABILIDADE DE ENERGIA PARA BELO MONTE



Fonte: Elaborado pelo autor

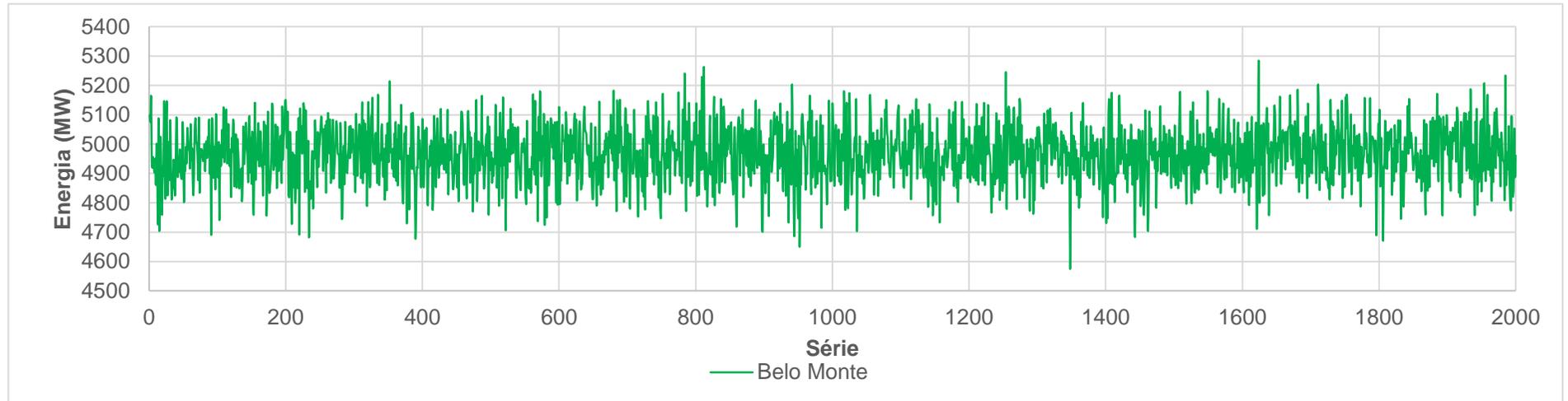
Na Figura 4.26 é apresentada a curva de probabilidade de energia para a bacia do Xingu.

FIGURA 4.26 - CURVA DE PROBABILIDADE DE ENERGIA PARA BACIA DO XINGU



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 4.27 são apresentados os valores anuais de energia para as séries sintéticas de Belo Monte para o cenário 5.

FIGURA 4.27 - ENERGIA MÉDIA ANUAL DE BELO MONTE CENÁRIO5

Fonte: Elaborado pelo autor

No Quadro 4.21 são apresentados os principais parâmetros estatísticos para as séries sintéticas de Belo Monte Para o cenário 5.

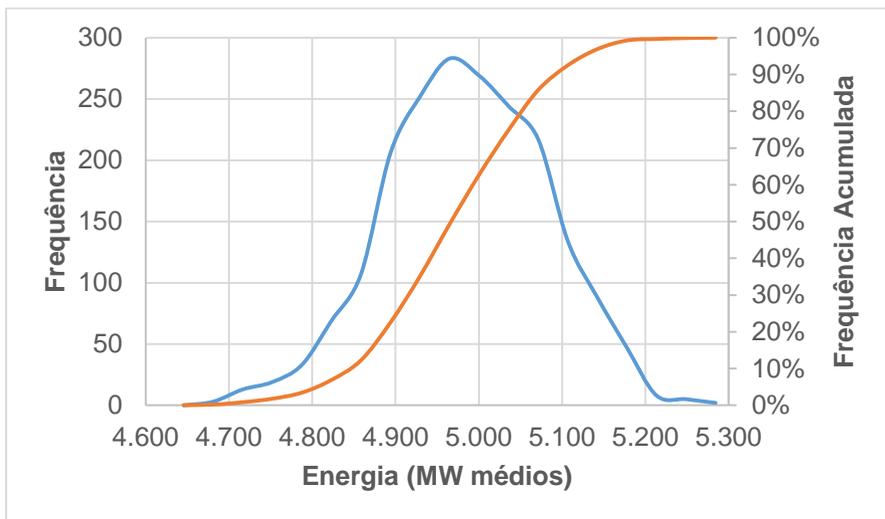
QUADRO 4.21 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS CENÁRIO 1

Dimensão da amostra	2000
Média (MW)	4.967
Variância (MW)	9.367
Desvio Padrão (MW)	97
Amplitude (MW)	710
Máximo (MW)	5.284
Mínimo (MW)	4.575
Assimetria (MW)	-0,15
Curtose (MW)	0,03
Alfa	5,00%
Intervalo de Confiança (MW)	4,24

Fonte: Elaborado pelo autor

Para verificar se o teorema do limite central foi respeitado, foram verificadas a frequência com qual os valores de energia média anual ocorreram para Belo Monte. As frequências também foram acumuladas e são apresentadas de forma percentual para corroborar com a análise. Os resultados obtidos foram considerados Normais. Comparando-se a distribuição com a obtida para Belo Monte do cenário 1 pode-se notar que os valores do cenário 5 são mais dispersos devido à ausência da regularização dos reservatórios a montante.

**FIGURA 4.28 - DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA
BELO MONTE CENÁRIO 5**



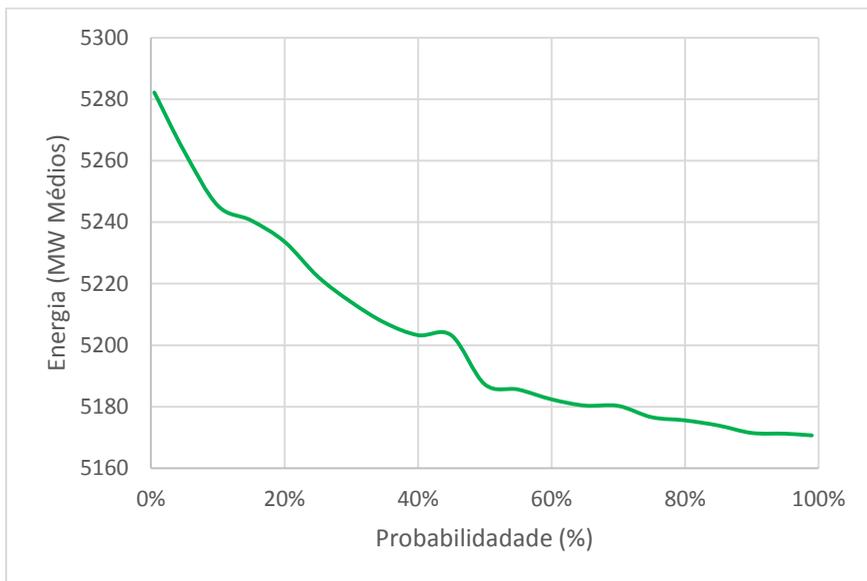
Fonte: Elaborado pelo autor

**QUADRO 4.22 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS
CENÁRIO 5 (MW)**

Probabilidade (%)	Belo Monte
0,50%	5282,17
1,00%	5280,04
5,00%	5262,95
10,00%	5245,40
15,00%	5240,59
20,00%	5233,68
25,00%	5222,31
30,00%	5214,00
35,00%	5207,33
40,00%	5203,27
45,00%	5203,23
50,00%	5187,28
55,00%	5185,60
60,00%	5182,40
65,00%	5180,37
70,00%	5180,27
75,00%	5176,59
80,00%	5175,57
85,00%	5173,89
90,00%	5171,47
95,00%	5171,24
99,00%	5170,67

Fonte: Elaborado pelo autor

**FIGURA 4.29 - DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA PARA
BELO MONTE CENÁRIO 1**



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1.1. Comparação entre os resultados

No Quadro 4.23 é apresentado um comparativo do resultado energético para os cinco cenários analisados no estudo de revisão do inventário, são apresentadas as energias média obtidas pelas simulações detalhadas.

QUADRO 4.23 -COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS ENERGÉTICOS DETERMINISTICOS

Cenário	Potência (MW)	Energia Média (MW médios)	Energia média incremental / cenário 1 (MW médios)	Area Alagada (km ²)	Energia/Area Alagada (MW/km ²)
Cenário 1	16114	8160,31	-	3444,44	2,37
Cenário 2	14559	7287,09	-873,22	3444,44	2,12
Cenário 3	14518	7186,01	-974,30	2619,86	2,74
Cenário 4	13555	6544,67	-1615,64	2619,86	2,50
Cenário 5	11000	4886,84	-3273,47	440,00	11,11

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar os resultados do Quadro 4.23 nota-se que o cenário 5, resultado da resolução n° 6 de Julho de 2008, apresentou a menor energia média, sendo 3273 MW médios inferior ao cenário 1 que apresentou o melhor resultado energético. O cenário 5 também apresentou a menor área alagada, sendo 3004 km² inferior ao cenário 1 que apresentou a maior área alagada. No Quadro 4.24 é apresentado o comparativo entre os parâmetros estatísticos para a análise probabilística entre os cenários 1 e 5. No Quadro 4.25 é apresentado o comparativo entre as curvas de probabilidade de energia para os cenários 1 e 5.

**QUADRO 4.24 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS
CENÁRIOS PROBABILÍSTICOS**

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 5
Média (MWm)	8.079	4.967
Desvio Padrão (MWm)	138	97
Amplitude (MWm)	1.019	710

Fonte: Elaborado pelo autor

QUADRO 4.25 -COMPARATIVO PROBABILIDADE DE ENERGIA (MWM)

Probabilidade (%)	Cenário 1	Cenário 5
0,50%	8520,93	5282,17
1,00%	8517,07	5280,04
5,00%	8486,17	5262,95
10,00%	8482,87	5245,40
15,00%	8475,87	5240,59
20,00%	8456,13	5233,68
25,00%	8445,48	5222,31
30,00%	8426,47	5214,00
35,00%	8425,42	5207,33
40,00%	8404,32	5203,27
45,00%	8399,99	5203,23
50,00%	8399,61	5187,28
55,00%	8398,37	5185,60
60,00%	8387,63	5182,40
65,00%	8383,60	5180,37
70,00%	8378,90	5180,27
75,00%	8376,03	5176,59
80,00%	8373,65	5175,57
85,00%	8372,72	5173,89
90,00%	8370,31	5171,47
95,00%	8369,03	5171,24
99,00%	8368,96	5170,67

Fonte: Elaborado pelo autor

As análises energéticas realizadas, mostram que a resolução n° 6 de julho privou o SIN de 3273 MW médios pela análise determinística, e 3112 MW médios pela análise determinística. Para 95% de probabilidade de ocorrência, equivalente a 5% de risco de não atendimento, o risco de déficit adotado para o planejamento de expansão do SIN, a diferença entre os cenários 1 e 5 é de 3197 MW médios.

5 - ALTERNATIVAS PARA SUPRIR A DIFERENÇA

A energia que não poderá ser aproveitada na bacia do Xingu devido a resolução nº 6 de junho de 2008 deverá ser inserida no SIN por outras fontes. Neste capítulo serão avaliados os custos e os impactos da inserção desta energia por outras fontes de geração, já que a razão que motivou o impedimento do aproveitamento do restante da bacia do Xingu foram os impactos socioambientais que seriam gerados pelos reservatórios.

5.1 - Energia eólica

A energia eólica é obtida ao se aproveitara energia cinética do vento que circula pela turbina eólica, sendo função da velocidade do vento, conforme a seguinte equação (ATLAS DO POTÊNCIAL EÓLICO BRASILEIRO, 2001):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \eta$$

Onde:

P - Potência (Watts);

ρ - Massa específica do Ar (kg/m^3);

A - Área do rotor (m^2);

V - Velocidade do vento (m/s);

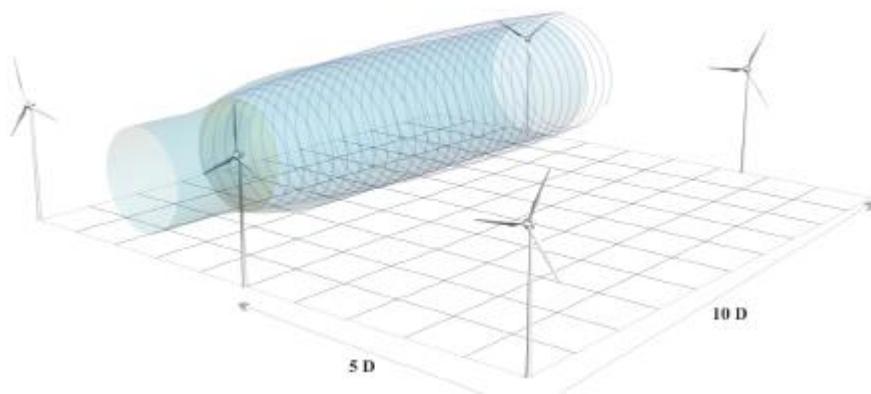
C_p - Coeficiente aerodinâmico;

η - Eficiência do conjunto gerador transmissão;

O vento ao circular pelas turbinas tem parte de sua energia cinética absorvida por estas, e conseqüentemente tem sua velocidade reduzida para jusante da turbina. Gradualmente a

velocidade é recuperada ao se misturar com a massa de vento e os efeitos turbulentos são dissipados. A certa distância é possível ser instalada outra turbina eólica que não estará sujeita a perdas devido às turbinas de montante. O atlas do potencial eólico brasileiro recomenda que novas turbinas sejam instaladas da ordem de 10 vezes o diâmetro do rotor a jusante e 5 cinco vezes ao lado. A densidade recomendada para parques eólicos pelo atlas é de $2\text{MW}/\text{km}^2$. A Figura 5.1 ilustra a esteira aerodinâmica e o espaçamento recomendado para as turbinas.

FIGURA 5.1 - ESTEIRA AERODINÂMICA E AFASTAMENTO ENTRE TURBINAS EÓLICAS

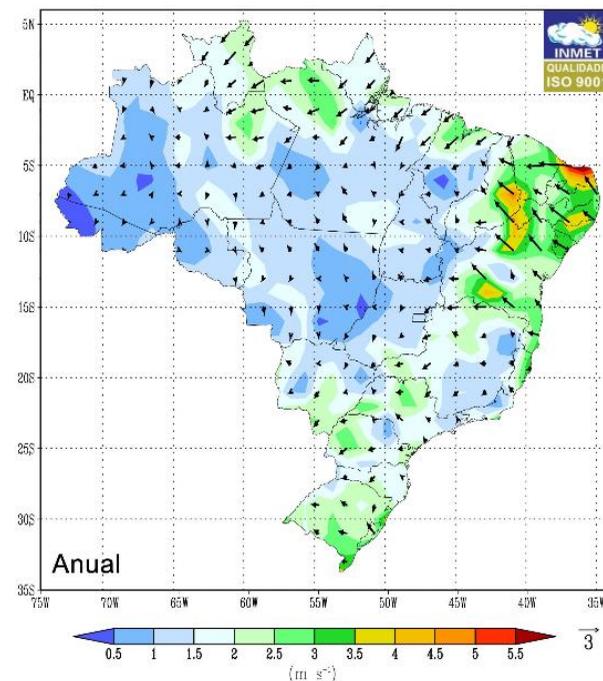


Fonte: Atlas do potencial eólico brasileiro

A região nordeste brasileira possui potencial eólico estimado de 75GW , cerca de 52% do potencial total estimado para o país, que é de $143,5\text{GW}$. Destaca-se na região nordeste o estado do Rio Grande do Norte onde são encontradas as maiores velocidades médias de vento no país, como pode ser observado na Figura 5.2. Por este motivo a cidade de Natal no Rio Grande do Norte foi selecionada neste trabalho para se estimar o parque eólico

necessário para adicionar ao SIN a energia privada da bacia do Xingu.

FIGURA 5.2 - VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A 10 M



Fonte: Normais climatológicas INMET.

O Instituto nacional de meteorologia disponibiliza em seu banco de dados online os dados históricos das medições da velocidade do vento a cada 6 horas. A estação meteorológica de Natal realiza as leituras de velocidade de vento na elevação de 48,6 m, que podem ser corrigidas para a elevação em que o rotor for instalado a partir da seguinte equação:

$$V(z) = V_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^p$$

Onde:

$V(z)$ – Velocidade na cota do rotor (m/s)

V_0 – Velocidade na cota da medição (m/s)

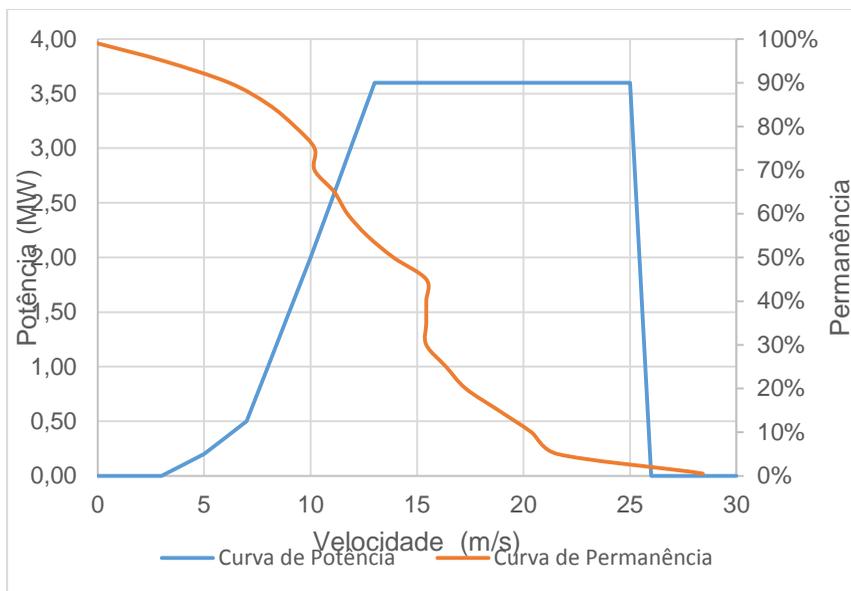
z – Cota do rotor (m)

z_0 – Cota da medição (m)

p – Fator de rugosidade

Para a seleção da turbina que será utilizada na simulação foi consultado o catálogo da fabricante SIEMENS, que disponibiliza as curvas de potência em função da velocidade do vento na altura do rotor. As velocidades observadas pelo INMET em Natal foram corrigidas para a altura do rotor das turbinas e curvas de permanência de velocidade do vento foram elaboradas para que fosse possível identificar a turbina que melhor se enquadre às faixas de velocidade observadas em Natal. O modelo que melhor se enquadrou foi o SWT-3.6-107 de 3,6MW, que para 62,3% dos valores de velocidade do vento opera na potência nominal da turbina. A Figura 5.3 apresenta a curva de potência do modelo de turbina selecionada para condições ideais de 15° de temperatura do ar, 1.013mbar de pressão atmosférica e 1,225 kg/m³ de massa específica do ar, e a curva de permanência de velocidades do vento para Natal corrigidas para a altura do rotor da turbina.

FIGURA 5.3 - CURVA DE POTÊNCIA E PERMANENCIA DE VELOCIDADE



Fonte: SIEMENS, adaptada pelo autor.

Para o cálculo da energia foi utilizada a curva de potência selecionada. Foi considerado o rendimento do conjunto turbina eólica gerador de 92%, conforme sugere o catálogo da SIEMENS, e uma taxa de disponibilidade de 98%, conforme sugestão do atlas do potencial eólico brasileiro, e as velocidades do vento observadas pelo INMET para Natal corrigidas para a altura do rotor a cada 6 horas, de 01/01/1961 a 31/12/2013. O valor médio de energia obtido foi de 0,81 MW médios. Para gerar os 3273 MW médios privados da bacia do Xingu seriam necessárias então 4041 turbinas de 3,6 MW totalizando 14547,6 MW, resultando em um fator de capacidade de 0,22. A área que este parque eólico ocuparia seria de 7274 km² se considerada a densidade 2 MW/km², como sugere o atlas do potencial eólico.

5.1.1.1. Simulação probabilística

Para avaliar o risco de não atendimento de maneira explícita devido a aleatoriedade das velocidades do vento também foi utilizado o método de Monte Carlo para simular a energia possível de ser gerada em Natal. A distribuição de Weibull de 2 parâmetros foi utilizada para geração das velocidades de vento conforme a seguinte equação (FERREIRA, A. A. A, 2011):

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}$$

Onde:

β - Fator de forma

α – Fator de escala

x – Probabilidade

Para validar a utilização da distribuição de probabilidade de Weibull de 2 parâmetros, para a geração das probabilidades aleatórias foi realizado o teste de aderência de Kolmogorv-Smirnov para os valores não idênticos da amostra de velocidades em Natal. Para a amostra em análise com 110 membros e com o nível de significância (α) de 95% pode-se determinar a estatística do teste pela seguinte expressão:

$$D_{crítico} = \frac{1,36}{\sqrt{N}} = \frac{1,36}{\sqrt{110}} = 0,129$$

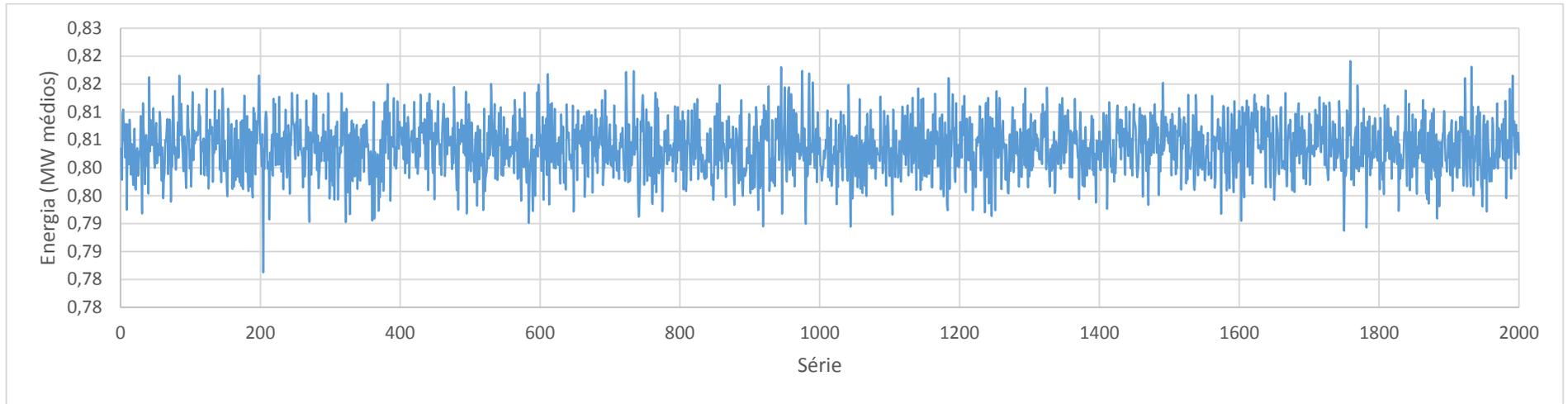
Onde:

N – Tamanho da amostra

A máxima distância entre as distribuições DN obtida foi de 0,033, logo a distribuição de Weibull foi considerada o aderente.

Para a geração das probabilidades foi utilizado o algoritmo de Mersenne Twister com o suplemento para Excel nrand 3.3, que

permite utilizar o algoritmo de Mersenne Twister em forma de função. Foram geradas 2000 séries de velocidade com o mesmo tamanho da série histórica de Natal e para o cálculo da energia foi utilizado a mesma metodologia do item 4.1. Na Figura 5.4 são apresentados os valores de energia média anual para as 200 séries geradas para Natal.

FIGURA 5.4 - ENERGIA MÉDIA ANUAL PARA NATAL

Fonte: Elaborado pelo autor.

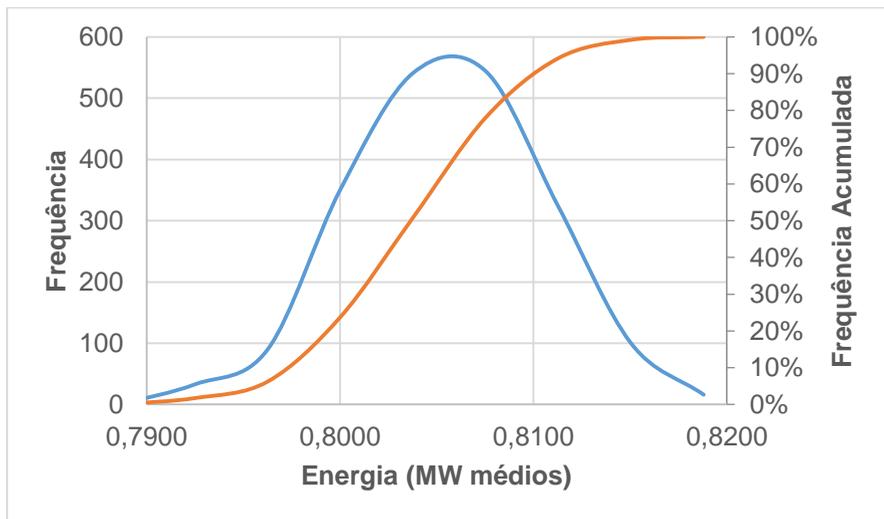
No Quadro 5.1 são apresentados os principais parâmetros estatísticos para as séries sintéticas para Natal.

QUADRO 5.1- PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NATAL

Dimensão da amostra	2000
Média (MW)	0,8037
Variância (MW)	2,43E-05
Desvio Padrão (MW)	4,93E-03
Amplitude (MW)	3,76E-02
Máximo (MW)	0,8188
Mínimo (MW)	0,7812
Assimetria (MW)	-0,07
Curtose (MW)	0,04
Alfa	5,00%
Intervalo de Confiança (MW)	2,16E-04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar se o teorema do limite central foi respeitado, foram verificadas a frequência com qual os valores de energia média anual ocorreram para Natal. As frequências também foram acumuladas e são apresentadas de forma percentual para corroborar com a análise. Os resultados obtidos foram considerados Normais e a aleatoriedade das velocidades foi refletida na frequência de valores, como pode ser observado na Figura 5.5.

FIGURA 5.5 - FREQUÊNCIA DE ENERGIA PARA NATAL

Fonte: Elaborado pelo autor.

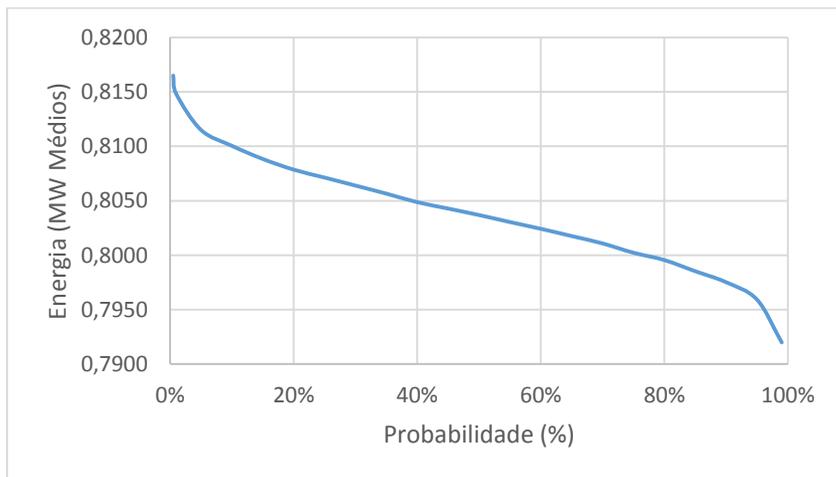
No Quadro 5.2 são apresentados os valores de energia associados a probabilidade para Natal, e na Figura 5.6 de forma gráfica.

QUADRO 5.2 -PROBABILIDADE DE ENRGIA PARA NATAL

Probabilidade (%)	Energia (MW médio)
0,50%	0,8165
1,00%	0,8148
5,00%	0,8115
10,00%	0,8100
15,00%	0,8088
20,00%	0,8079
25,00%	0,8071
30,00%	0,8064
35,00%	0,8057
40,00%	0,8049
45,00%	0,8043
50,00%	0,8037
55,00%	0,8030
60,00%	0,8024
65,00%	0,8018
70,00%	0,8011
75,00%	0,8002
80,00%	0,7996
85,00%	0,7985
90,00%	0,7975
95,00%	0,7959
99,00%	0,7920

Fonte: Elaborado pelo autor.

FIGURA 5.6 - CURVA DE PROBABILIDADE DE ENERGIA PARA NATAL



Fonte: Elaborado pelo autor.

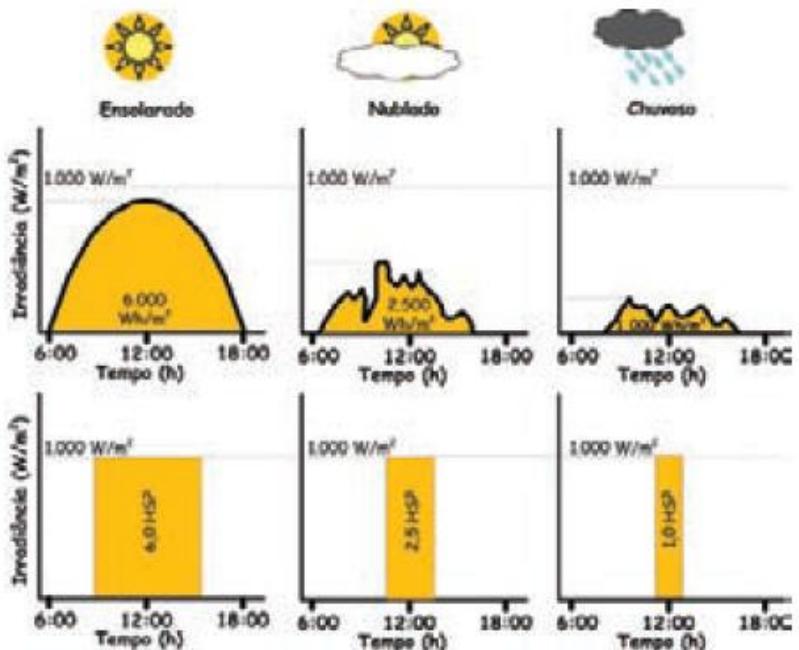
Para 95% de probabilidade de ocorrência, ou 5% de risco de não atendimento, o risco de déficit adotado para o planejamento de expansão do SIN Natal pode gerar 0,7959 MW médios. Para gerar os 3197 MW médios que foram privados da bacia do Xingú. Para a mesma probabilidade seriam necessárias 4017 torres de 3,6 MW, totalizando 14461,2 MW, resultando em um fator de capacidade de 0,22. A área que este parque eólico ocuparia seria de 7230km² se considerada a densidade 2MW/km² como sugere o atlas do potencial eólico.

5.2 - Energia solar

A energia proveniente do sol pode ser aproveitada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio do efeito fotoelétrico, onde os fótons contidos na luz solar são convertidos em energia elétrica, por meio do uso de células solares. (ATLAS

DA ENERGIA, 2003). A energia solar disponível para ser aproveitada depende de condições atmosféricas, tais como nebulosidade, umidade relativa e consequentemente as horas de insolação plena de cada dia. A Figura 5.7 ilustra a variação da energia solar disponível em função das condições atmosféricas.

FIGURA 5.7 - ENERGIA SOLAR DISPONÍVEL



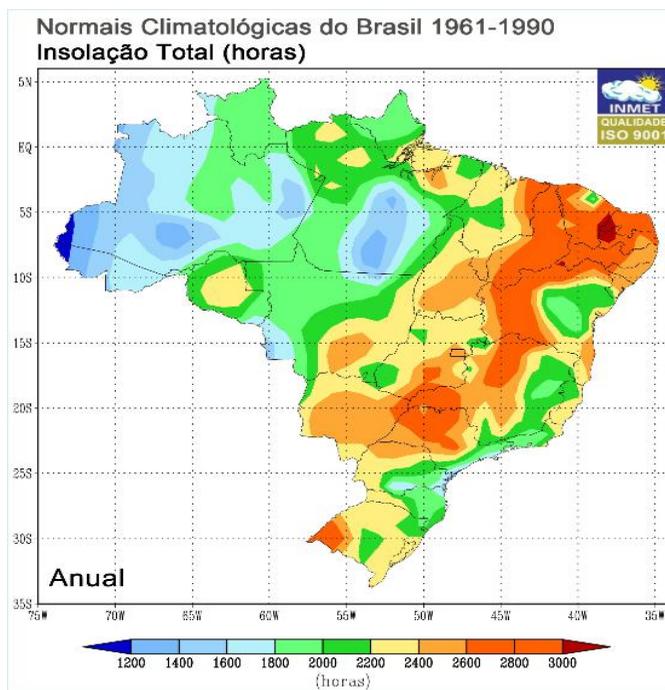
Fonte: Sistemas Híbridos Soluções Energéticas para a Amazônia, 2008.

Além da variação das condições climáticas, a disponibilidade da energia solar é influenciada pela latitude, e pela posição no tempo (dia do ano), isso devido à inclinação do eixo da terra e da órbita elíptica que a terra descreve ao redor do sol. Assim sendo para maximizar o aproveitamento da radiação solar, pode-se

ajustar a posição do coletor solar de acordo com a latitude local e o período do ano.

A região nordeste brasileira também possui um grande potencial para a geração de energia solar. A fim de comparação apresenta-se o estado do Rio Grande do Norte, onde são apresentadas parte dos maiores períodos de insolação média diária no país como pode ser observado na Figura 5.8. Por isto a cidade de Natal no Rio Grande do Norte também foi selecionada para se estimar o parque solar necessário para adicionar ao SIN a energia privada da bacia do Xingu.

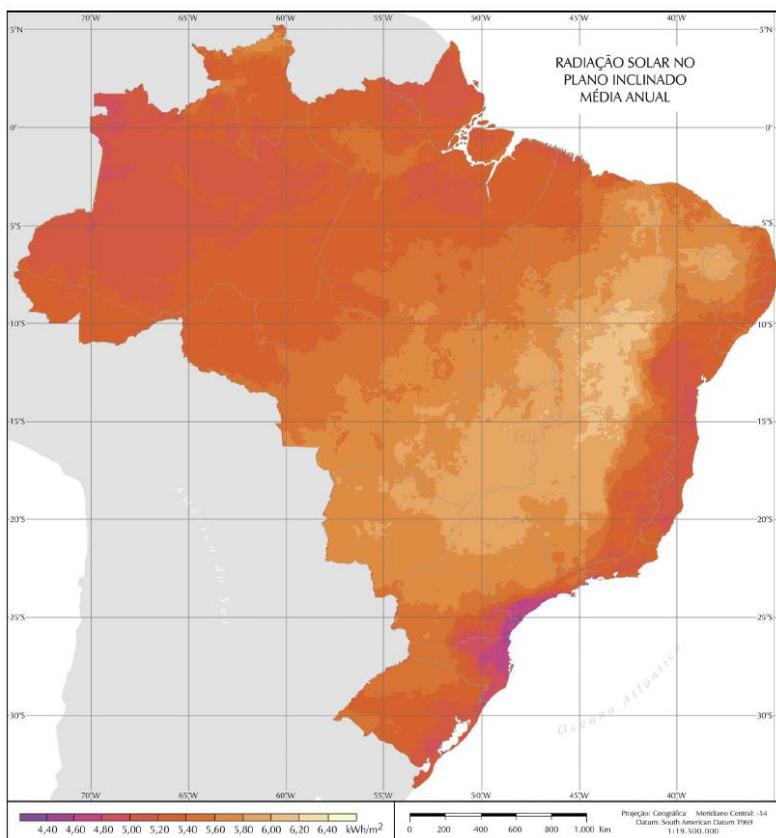
FIGURA 5.8 - INSOLAÇÃO MÉDIA ANUAL



Fonte: Normais climatológicas INMET.

Para a estimativa da radiação solar disponível para a geração de energia em Natal foi utilizado o valor de irradiação média anual no plano inclinado determinado no atlas do potencial solar brasileiro. A Figura 5.9 apresenta o mapa de irradiação solar no plano inclinado média anual para o Brasil. A irradiação média anual no plano inclinada para Natal é da ordem de 0,0056 MWh/m².

FIGURA 5.9 - IRADIAÇÃO SOLAR NO PLANO INCLINADO MÉDIA ANUAL



Fonte: Atlas Brasileiro de energia solar

A EPE em 2012 emitiu uma nota técnica sobre a inserção da geração solar na matriz energética brasileira, onde ela sugere valores de eficiência e a relação para determinação da área efetiva dos painéis em função do material e da tecnologia utilizada. No Quadro 5.3 estes valores são apresentados.

QUADRO 5.3–EFICIÊNCIA TÍPICA DOS MÓDULOS COMERCIAIS

Tecnologia	Eficiência	Área/kW _p
Silício cristalino		
Monocristalino	13 a 19%	~7m ²
Policristalino	11 a 15%	~8m ²
Filmes finos		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	~15m ²
Telureto de Cadmio (Cd-Te)	10 a 11%	~10m ²
Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)	7 a 12%	~10m ²
Concentrador fotovoltaico	~25%	

Fonte: EPE Nota técnica.

Para aproveitar a radiação solar disponível em Natal foi estimado o parque solar necessário para o aproveitamento direto da radiação solar com painéis fotovoltaicos de silício cristalino com eficiência de 19%, conforme sugerido pela EPE. O Instituto nacional de meteorologia disponibiliza em seu banco de dados online os dados históricos das horas diárias de insolação que serão utilizadas para o cálculo da energia média. O valor de disponibilidade considerado foi o mesmo que o utilizado para a energia eólica de 98% e a energia foi calculada com a seguinte expressão:

$$E = \text{Disp.} \cdot \eta \cdot \text{Irrad.} \cdot \text{hins}$$

Onde:

E - Energia (MW/m²);

$Disp$ – Taxa de disponibilidade;

η – Eficiência do conversor;

$Irrad$ – Irradiação (MWh/m²);

$hins$ - Horas de insolação (h);

A energia média disponível em natal ao se simular a série histórica de insolação é de 0,0411MW/m². Para gerar os 3273 MW médios privados da bacia do Xingu e considerando 19% de eficiência para os painéis como sugere a EPE seriam necessárias então 411km² de painéis solares totalizando 411.930 MW.

5.2.1.1.Simulação probabilística

Para avaliar o risco de não atendimento de maneira explícita devido à aleatoriedade das horas de insolação também foi utilizado o método de Monte Carlo para simular a energia possível de ser gerada em Natal. A distribuição de Weibull de 2 parâmetros foi utilizada para geração das velocidades de vento conforme a seguinte equação:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

Onde:

β - Fator de forma

α – Fator de escala

x – Probabilidade

Para validar a utilização da distribuição de probabilidade de Weibull de 2 parâmetros, na geração das probabilidades aleatórias, foi realizado o teste de aderência de Kolmogorv-Smirnov para os valores não idênticos da amostra de horas de insolação em Natal. Para a amostra em análise com 127 membros e com o nível de significância (α) de 95% pode-se determinar a estatística do teste pela seguinte expressão:

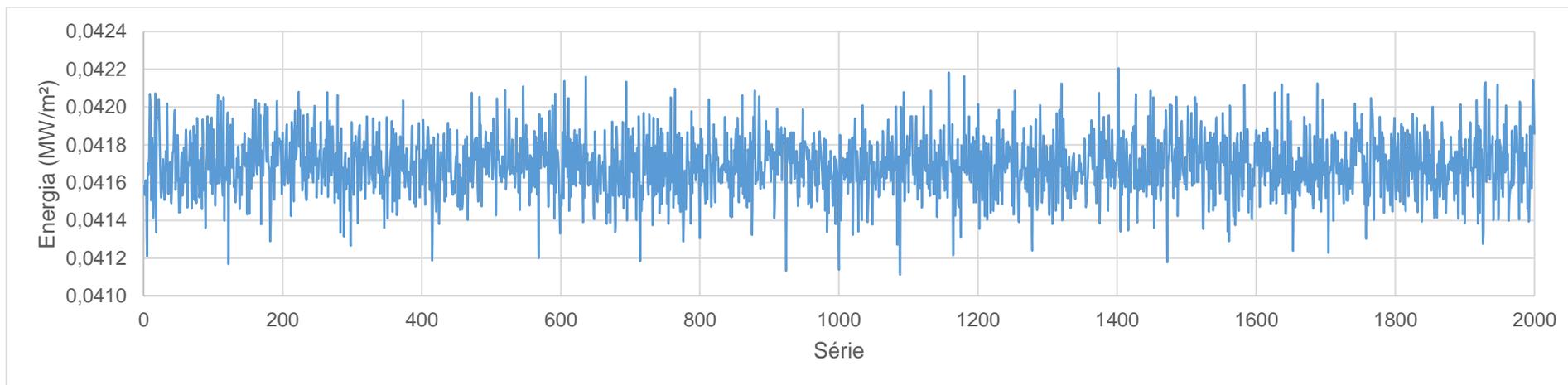
$$D_{crítico} = \frac{1,36}{\sqrt{N}} = \frac{1,36}{\sqrt{127}} = 0,123$$

Onde:

N – Tamanho da amostra

A máxima distância entre as distribuições obtida foi de 0,018, logo a distribuição de Weibull foi considerada o aderente.

Para a geração das probabilidades foi utilizado o algoritmo de Mersenne Twister com o suplemento para Excel nrand 3.3 que permite utilizar o algoritmo de Mersenne Twister em forma de função. Foram geradas 2000 séries de horas de insolação com o mesmo tamanho da série histórica de Natal e para o cálculo da energia foi utilizado a mesma metodologia do item 4.2. Na Figura 5.4 são apresentados os valores de energia média anual para as 200 séries geradas para Natal.

FIGURA 5.10 - ENERGIA MÉDIA ANUAL PARA NATAL

Fonte: Elaborado pelo autor

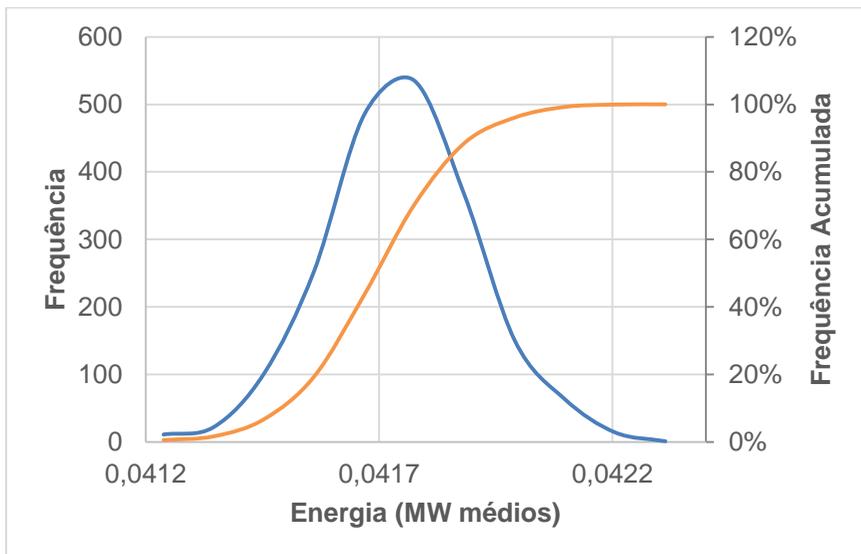
No Quadro 5.1 são apresentados os principais parâmetros estatísticos para as séries sintéticas par Natal.

QUADRO 5.4- PARÂMETROS ESTATÍSTICOS NATAL

Dimensão da amostra	2000
Média (MW)	0,0417
Variância (MW)	2,62E-08
Desvio Padrão (MW)	1,62E-04
Amplitude (MW)	1,08E-03
Máximo (MW)	0,0422
Mínimo (MW)	0,0411
Assimetria (MW)	-0,01
Curtose (MW)	0,28
Alfa	5,00%
Intervalo de Confiança (MW)	7,10E-06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para verificar se o teorema do limite central foi respeitado, foram verificadas a frequência com qual os valores de energia média anual ocorreram para Natal. As frequências também foram acumuladas e são apresentadas de forma percentual para corroborar com a análise. Os resultados obtidos foram considerados Normais e a aleatoriedade das velocidades foi refletida na frequência de valores como pode ser observado na Figura 5.11.

FIGURA 5.11 - FREQUENCIA DE ENERGIA PARA NATAL

Fonte: Elaborado pelo autor.

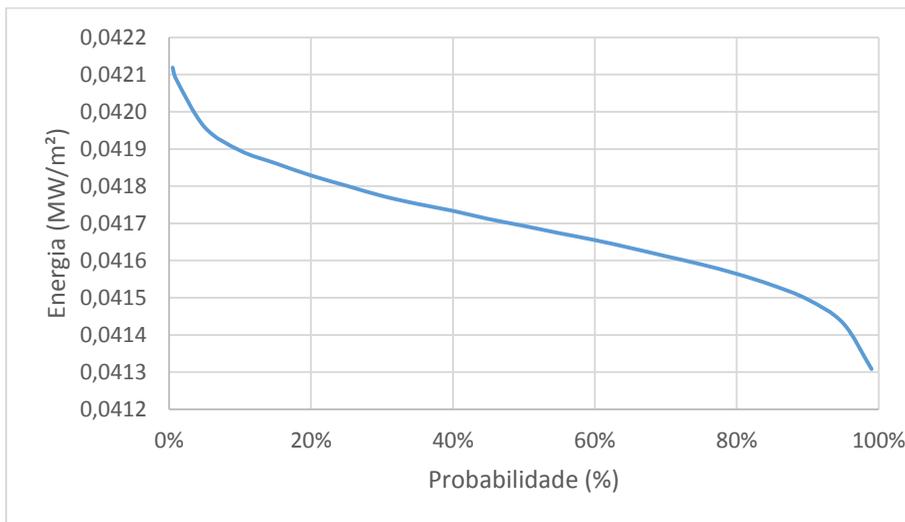
No Quadro 5.5 são apresentados os valores de energia associados à probabilidade para Natal, e na Figura 5.12 de forma gráfica.

QUADRO 5.5 - PROBABILIDADE DE ENRGIA PARA NATAL

Probabilidade (%)	Energia (MW/m²)
0,50%	0,0421
1,00%	0,0421
5,00%	0,0420
10,00%	0,0419
15,00%	0,0419
20,00%	0,0418
25,00%	0,0418
30,00%	0,0418
35,00%	0,0418
40,00%	0,0417
45,00%	0,0417
50,00%	0,0417
55,00%	0,0417
60,00%	0,0417
65,00%	0,0416
70,00%	0,0416
75,00%	0,0416
80,00%	0,0416
85,00%	0,0415
90,00%	0,0415
95,00%	0,0414
99,00%	0,0413

Fonte: Elaborado pelo autor.

FIGURA 5.12 - CURVA DE PROBABILIDADE DE ENERGIA PARA NATAL



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para 95% de probabilidade de ocorrência, ou 5% de risco de não atendimento, o risco de déficit adotada para o planejamento de expansão do SIN Natal pode gerar 0,0414 MW/m² médios. Para gerar os 3197 MW médios que foram privados da bacia do Xingu para a mesma probabilidade e considerando 19% de eficiência para os painéis como sugere a EPE seriam necessárias então 411 km² de painéis solares totalizando 406.124 MW.

5.3 - Energia térmica

As fontes de geração termoelétrica utilizam vapor para gerar energia. Para produzir vapor as termoelétricas usualmente utilizam no Brasil como combustível carvão, gás natural, nuclear e biomassa. A fonte térmica que será avaliada para suprir a energia privada da bacia do Xingu, para seu dimensionamento energético foi utilizado como fator de capacidade de 95%, então

para a produção de 3273 MW médios foi prevista uma usina de 3445 MW.

5.4 - Impactos e limitações dos parques geradores

A escolha do cenário 5 em detrimento do cenário 1 de partição de queda para a bacia do Xingu foi realizada dentre outros motivos, porque o cenário 5 foi dentre os cenários avaliados o que apresenta a menor área alagada e conseqüentemente o menor impacto socioambiental. As fontes de geração de energia que podem ser utilizadas para suprir a diferença de energia entre os cenários 1 e 5 também ocupam áreas e conseqüentemente impactam o ambiente. As áreas ocupadas pelas fontes analisadas são apresentadas no Quadro 5.6.

QUADRO 5.6 -ÁREAS IMPACTADA POR FONTE GERADORA DE ENERGIA

Fonte	Área (km ²)
AHE (Cenário 1 – Cenário 5)	3444
Eólica	7274
Solar	411
Térmica	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao se analisar as áreas que seriam ocupadas pelas fontes de geração de energia elétrica para produzir 3273 MW médios, nota-se que, a fonte eólica é a que ocuparia a maior área, em seguida a fonte hidráulica, a fonte solar e as usinas termoelétricas que ocupam áreas desprezíveis se comparadas com as outras fontes.

Os parques eólicos além da produção de energia não agregam outros benefícios diretos às localidades aonde são construídos. Os parques eólicos são responsáveis pela morte de passarinhos que se chocam com as turbinas. Os parques eólicos trazem transtornos a seus vizinhos devido à poluição sonora e visual. Um exemplo foi o que ocorreu na França, onde a usina eólica próxima ao castelo de Flers na região de Nord - Pas - de - Calais

foi desativada por decisão judicial, sendo responsabilizada por danos à saúde nas comunidades vizinhas, e por prejudicar a atividade turística (REUTERS, 2013)

As usinas hidrelétricas além de produzir energia, agregam benefícios indiretos a região onde são implantadas, tais como irrigação, lazer, transporte e turismo. Quando as usinas hidrelétricas possuem reservatórios de grande volume, estas podem regularizar as vazões, podendo atenuar secas e amortecer cheias, como as que ocorreram em março de 2014 nas cidades de Vitória do Xingu e Altamira onde mais de 800 famílias foram afetadas (PORTAL G1, 2014). Está cheia poderia ser amenizada caso os reservatórios de acumulação do cenário 1 fossem construídos.

Os parques solares, além da energia produzida não agregam benefícios indiretos às regiões aonde são instalados.

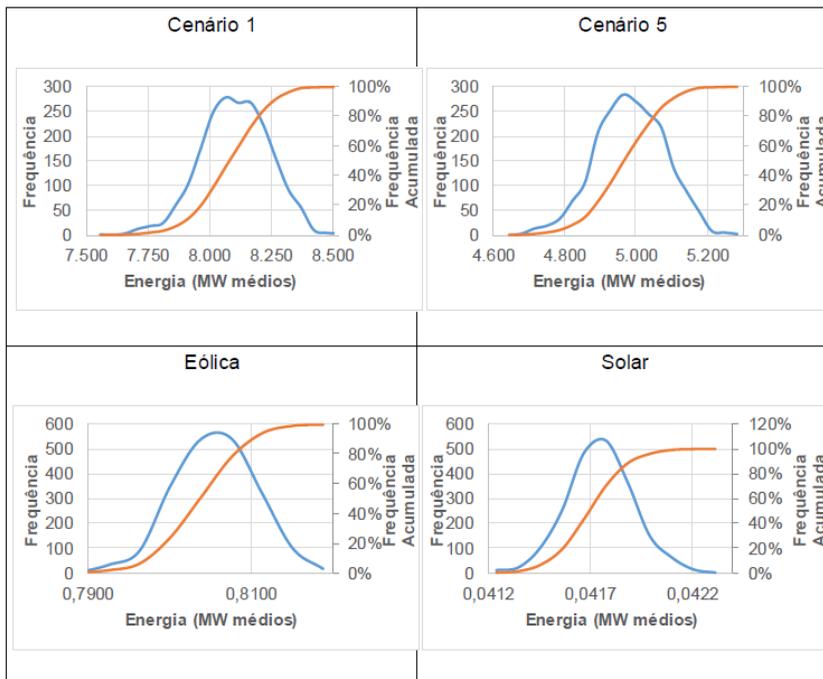
As usinas termoelétricas, além da produção de energia não agregam benefícios indiretos as regiões aonde são instalados. As usinas térmicas são responsáveis por poluição do ar em diferentes níveis dependendo do combustível utilizado. Sendo mais elevada para carvão e óleos em geral, e de menor vulto para gases (MENDES, 2007).

As fontes analisadas possuem limitantes técnicos importantes, tais como a impossibilidade de atendimento à geração de ponta para as fontes, eólica e solar. A fonte solar pode produzir energia apenas metade do dia, necessitando de um sistema de baterias para atender a demanda no restante do dia, ou ser suprido por outras fontes de geração de energia.

As fontes renováveis de energia analisadas, hidráulica, solar e eólica produzem energia utilizando recursos naturais como, sol, vento e água. Estes recursos possuem características aleatórias, sendo um processo repetitivo no qual os valores não possuem um padrão, mas seguem uma distribuição de probabilidade. Este caráter aleatório impõe um fator de imprevisibilidade sobre o

atendimento à demanda de energia elétrica, que ficam sujeitas às disponibilidades dos recursos, água, sol e vento. Na Figura 5.13 é apresentado um quadro comparativo entre as curvas de frequência de energia para as fontes renováveis analisadas, os cenários 1 e 5 do aproveitamento energético da bacia do rio Xingú, e os aproveitamentos eólico e solar para Natal.

FIGURA 5.13 - COMPARATIVO ENTRE AS CURVAS DE FREQUENCIA DE ENERGIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

A aleatoriedade das vazões afluentes para as usinas hidrelétricas pode ser reduzida, por meio da construção de reservatórios. Como pode-se notar de maneira qualitativa, a frequência com que os valores de energia do cenário 1 se concentraram ao redor da média apresentando uma curva de frequência mais abatida, em relação aos valores do cenário 5, resultado da regularização proporcionada pelos reservatórios. Já os aproveitamentos do sol e do vento não há a possibilidade de se reduzir a sua aleatoriedade devido à impossibilidade de se regularizar as velocidades do vento e as horas de insolação. Pode-se notar que as curvas de frequência para o aproveitamento solar e eólico de

natal apresentam valores mais dispersos em relação à média do que o cenário 1 de aproveitamento da bacia do rio Xingú.

6 - ANÁLISE ECONÔMICA

Para avaliar os impactos socioeconômicos devido ao abandono dos reservatórios de acumulação no planejamento da expansão do setor elétrico, será realizada uma análise sobre os valores de energia praticados no Brasil, e o aumento que vem ocorrendo nestes valores. Para as diversas fontes de geração de energia elétrica foram determinados os valores de sua comercialização a partir dos resultados dos últimos leilões realizados pela CCEE, sendo considerado os valores médios para cada fonte (Quadro 6.1).

QUADRO 6.1 - VALOR DE VENDA DA ENERGIA

Fonte	Valor da Energia/MWh
Térmica Óleo Diesel	R\$ 190,76
Térmica Gás de Processo	R\$ 188,57
Térmica Biomassa de Criadouro Avícola	R\$ 185,45
Térmica Biogás	R\$ 183,29
Térmica Óleo combustível	R\$ 179,61
Térmica Gás Natural Liquefeito	R\$ 179,32
Térmica Carvão Mineral	R\$ 174,14
Térmica Bagaço de Cana	R\$ 165,53
Térmica Gás Natural	R\$ 152,52
Térmica Cavaco de Madeira	R\$ 122,91
Solar	R\$ 215,53
Eólica	R\$ 132,59
PCH	R\$ 176,23
AHE (<700 MW)	R\$ 110,29
AHE Grande Porte (>700MW)	R\$ 87,39

Fonte: Elaborado pelo autor, dados CCEE

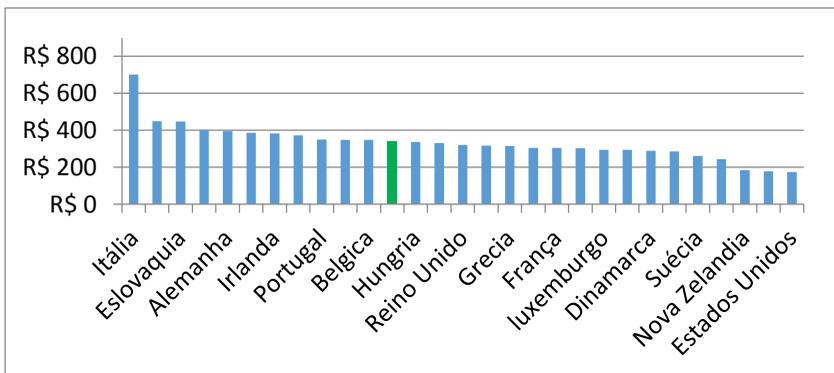
A fonte de energia negociada ao menor valor no mercado regulado de energia elétrica brasileiro, é a hidrelétrica, tendo apresentado o menor valor para as usinas de maior porte aproximadamente a metade do valor para as PCHs. As usinas

térmicas dos mais variados combustíveis e níveis de poluição do ar, tem sua energia negociada a valores que oscilam entre 122,91 R\$/MWh e 190,76 R\$/MWh, valores em geral superiores ao dobro da energia elétrica proveniente de grandes hidrelétricas. As fontes térmicas não estão sujeitas a grandes riscos técnicos, que as impeçam de produzir energia. Porém as fontes térmicas estão sujeitas a elevados riscos econômicos, como a variações nos preços de seus combustíveis, devidas a oscilações de oferta, a questões geopolíticas dentre outros fatores. Os valores de venda de energia proveniente das fontes termoelétricas negociado nos leilões é um valor médio referente as expectativas de despacho da usina ao longo de sua vida útil e nas expectativas dos preços dos combustíveis. Os valores negociados na prática podem ser muito superiores a estes apresentados, devido a oferta de energia, chegando até valores de 800 R\$/MWh. Devido ao despacho constante das usinas termoelétricas no ano hidrológico de 2013 -2014 com o governo tendo que repassar 59,4 bilhões R\$ as distribuidoras de energia para cobrir os custos extras. (VEJA, 2014). As usinas eólicas que foram inseridas no mercado de energia no ano de 2006, vem gradativamente reduzindo o valor da energia negociada, tornando-se grande competidora, com as PCHs e as usinas térmicas. As usinas solares iniciaram sua participação de maneira discriminada nos leilões de energia em outubro de 2014 negociando sua energia a valor médio de 215,53 R\$/MWh, valor superior ao da mais cara das térmicas. A energia solar vem tendo seu custo de implantação reduzida a nível mundial, e no horizonte da próxima década deve tornar-se mais competitiva com as demais fontes.

A tarifa industrial de energia elétrica média no Brasil é de 339 R\$/MWh, valor que no contexto mundial pode ser considerado moderado, e a tarifa residência de energia elétrica média é de 430 R\$/MWh que no contexto mundial pode ser considerado baixo. Na Figura 6.1 e na

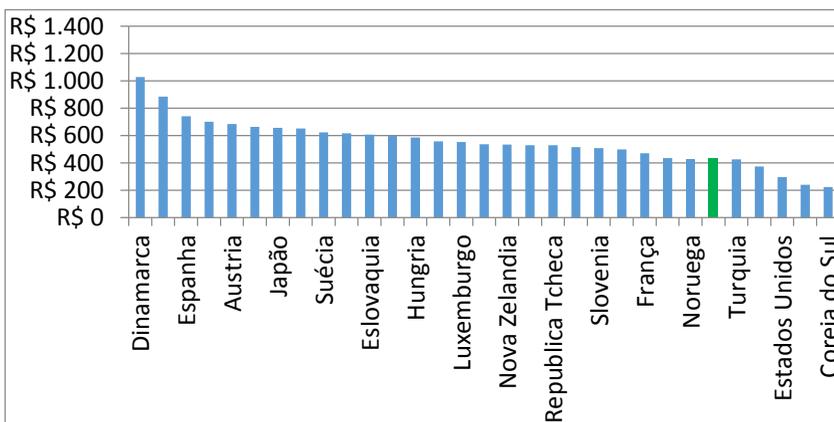
Figura 6.2 são apresentados os valores médios das tarifas unidas industrial e residencial respectivamente.

FIGURA 6.1 - TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA INDUSTRIAL EM 2010 NO MUNDO (R\$/MWH)



Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica 2013 EPE.

FIGURA 6.2 - TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL EM 2010 NO MUNDO (R\$/MWH)

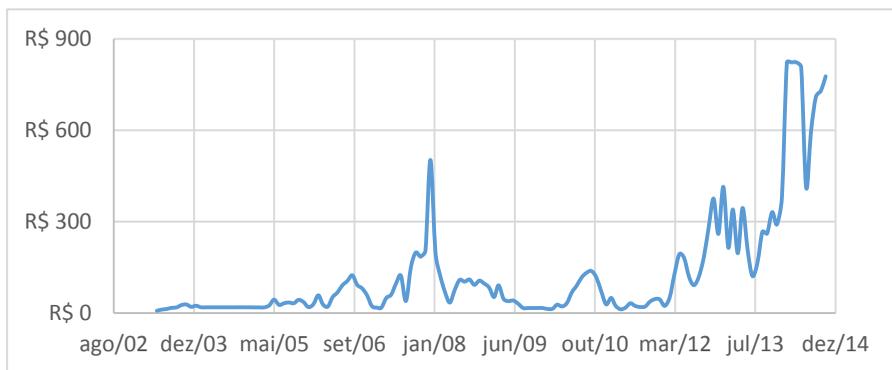


Fonte: Anuário estatístico de energia elétrica 2013 EPE.

A energia elétrica está presente em praticamente todas as atividades econômicas e cotidianas, e alterações no valor que ela

é negociada aos consumidores finais impacta a vida de todos os cidadãos da nação de maneira direta na conta da energia e de indireta nos valores de todos os produtos e serviços. No ano de 2014 o PLD chegou a seu limite superior 822,23 R\$/MWh, devido ao baixo valor de armazenamento dos reservatórios e ao aumento do despacho termoeletrico. Na Figura 6.3 é apresentada a série histórica do PLD médio.

FIGURA 6.3 - VARIAÇÃO DO PLD MÉDIO (R\$/MWH)



Fonte: Elaborado pelo autor, dados CCEE.

A energia elétrica de liquidação ao ser negociada a valores tão elevados pressiona o setor industrial. Um exemplo é a maior fabricante de alumínio do país, a ALCOA, que reduz sua produção, e fecha parte da fábrica de Minas Gerais e negocia a demissão de funcionários. Diminuir parece ser a única saída em um cenário em que os custos de energia disparam (REVISTA ISTOÉ DINHEIRO, 2014). A indústria do alumínio é uma das atividades industriais que mais dependentes da energia elétrica, casos como o da ALCOA ocorrerão com outros segmentos da indústria. O valor da tarifa de energia elétrica no Brasil no horizonte da próxima década é de crescimento, devido a maior participação das usinas térmicas, e a capacidade de armazenar energia nos reservatórios, que deverá se manter constante, o que pressiona os preços da energia no mercado de curto prazo em anos de hidrologia desfavorável.

A fim de ilustrar o custo econômico da resolução nº6 de junho de 2008 do MME, pode-se estimar o custo da energia necessária para suprir a diferença entre os cenários 1 e 5 como sendo a diferença entre o custo de produção de energia com os AHE de grande porte de 87,39 R\$/MWh, e o valor médio entre as fontes térmicas e a fonte eólica, as fontes mais viáveis atualmente, de 176,15 R\$/MWh. Uma diferença de 88,76 R\$/MWh que a longo de um ano representa 2,5 bilhões de R\$, imaginando a operação destas usinas ao longo de 30 anos em valor presente considerando uma taxa de desconto de 10%a.a. 24 bilhões de R\$ como custo total que deverá ser desembolsado por toda a sociedade.

7 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação sobre os impactos ao se abandonar os reservatórios de acumulação no planejamento da expansão do setor elétrico. Os impactos avaliados neste estudo foram o socioambiental, o econômico, e na estrutura do setor elétrico. Para estas avaliações foi utilizada a limitação imposta sobre o aproveitamento hidrelétrico da bacia do rio Xingú através da resolução nº6 de junho de 2008 do ministério de minas e energia, como um estudo de caso.

O principal objetivo foi analisar os efeitos ao se abdicar dos reservatórios de acumulação devido a seus impactos socioambientais, bemcomo se a construção de grandes reservatórios como sendo a melhor opção também naótica socioambiental para o aproveitamento hidrelétrico de uma bacia hidrográfica.

Partiu-se da diferença de energia, entre construir reservatórios de acumulação e a limitação imposta de só se construir o AHE de Belo Monte na bacia do rio Xingú. Foram estimadas as usinas necessárias para atender a energia abdicada da bacia do Xingú para as fontes, eólica, solar e térmica. Posteriormente foi realizada uma avaliação sobre os custos das fontes que poderão substituir o delta de energia e os impactos decorrentes da alteração dos custos da energia elétrica.

Os resultados, obtidos ao se estimar as alternativas para substituir os reservatórios da bacia do rio Xingú, mostram que as usinas eólicas seriam mais impactantes do que os reservatórios, pois ocupariam uma área maior para produzir a mesma energia média. As usinas solares, para produzir a mesma energia média, ocupariam uma área menor, logo impactariam menos o meio ambiente. As usinas térmicas ocupam áreas desprezíveis se comparadas com as usinas hidrelétricas, eólicas e solares. Porém as usinas termoelétricas, liberam gases poluentes na atmosfera para a produção de energia, sendo a fonte mais

impactante ao meio ambiente. Sobre os custos da energia no Brasil a avaliação realizada, indicou que as usinas hidrelétricas são a opção de menor custo de produção, posteriormente as usinas eólicas e térmicas e a de maior custo a energia solar, sendo o custo total estimado da resolução nº6 de junho de 2008 do MME de 24 bilhões de R\$ em valor presente.

Um ponto importante a ressaltar sobre os impactos causados pelas fontes de geração de energia elétrica analisadas, é sobre os benefícios indiretos decorrentes dos reservatórios, como a regularização das vazões para o controle de cheias e atenuação de secas, como a que ocorre neste ano na região sudeste brasileira. Os usos múltiplos deste reservatório como a navegação, lazer e turismo.

Um outro ponto importante a destacar é sobre a limitação técnica das fontes alternativas aos reservatórios de acumulação, como a impossibilidade de atendimento à geração de ponta para as fontes, eólica e solar. A fonte solar pode produzir energia apenas metade do dia, necessitando de um sistema de backup. Sobre o risco de déficit no fornecimento de energia as fontes eólica e solar não permitem armazenamento ou regularização, sendo mais sujeitas a déficits do que usinas hidrelétricas dotadas de reservatórios de acumulação.

Por fim, este trabalho pretende contribuir com a discussão sobre os impactos dos reservatórios de acumulação e sobre as importantes alterações que vem ocorrendo na matriz de produção de energia elétrica brasileira, que vem tornando-se mais cara, mais prejudicial ao meio ambiente e mais suscetível aos déficits de energia.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÈTRICA – ANEEL. Atlas da Energia, 2003.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÈTRICA – ANEEL. Resolução normativa nº 109, de 26 de outubro de 2004. Institui a convenção de comercialização de energia elétrica.

Anuário estatístico de energia elétrica 2013 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2013.

Atualização do Inventário Hidrelétrico da Bacia do Rio Xingu (2007) – Relatório Geral Volume I –Texto Tomo I.

Atualização do Inventário Hidrelétrico da Bacia do Rio Xingu (2007) – Relatório Geral Volume I –Texto Tomo II.

Avaliação indisponibilidade Comissão de integração Elétrica Regional (CIER) – Bracier 1990

BRASIL. Decreto nº. 5.163 de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.

BRASIL. Lei nº.10.848/04, de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nos 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. Histórico dos Leilões. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br/leilões/index.jsp>> Acesso em: Setembro 2014

CANAMBRA (1969).Canambra Engineering Consultants.Power Study of Brazil.Appendix XVII. Curitiba PR.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY – CIA. World Fact book Disponível em <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>> Acesso em: Outubro 2014.

DEWAR, E. Uma demão de verde: os laços entre grupos ambientais, governos e grandes negócios. Rio de Janeiro: Capax Dei, 2007.

ELETROBRAS – Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

ELETROBRAS - Instruções para estudos de viabilidade, 1997.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS – EPE. Nota técnica . “Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica Brasileira”. 2012.

FERREIRA, A. A. A. “Sistema de produção de energia eólica”. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, 2011.

FILL, H. D.; PÉRICO, G. Avaliação do risco associado a energia firme de um sistema hidrelétrico. In Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves – RS .2013.

GÓMEZ, L, A. Excel para engenheiros. Florianópolis: Visual Books, 2012.

HART, K. E, “A Monte Carlo Approach to Generator Portfolio Planning and Carbon Emissions Assessments od Systems with Large Penetrations of Variable Renewables”. Stanford University. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE Histórico do Produto Interno Bruto PIB Disponível em <http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/lista_tema.aspx?op=1&no=1> Acesso em: Outubro 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET – Banco de Dados Meteorológicos Disponível em

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> >

Acesso em: Abril 2014

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Normais Climatológicas (1961-1990). Brasília, INMET – Instituto Nacional de Meteorologia/Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, 1992.

KELMAN, J. Modelos estocásticos no gerenciamento de recursos hídricos. In: Modelos para gerenciamento de recursos hídricos. São Paulo: Nobel / ABRH, 1987.

LEVINE, D. M. / BERENSON, M. L./ STEPHAN, David. Estatística: Teoria e aplicações usando o Microsoft Excel em Português. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

MATSUMOTO, M. NISHIMURA, T “Mersene Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator”. Keio University/Max-Planck-Institut. 1998.

MENDES, G. L. “Análise da viabilidade econômica de uma usina termelétrica usando modelagem estocástica e teoria de opções reais”. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Sistemas Híbridos Soluções Energéticas para a Amazônia, 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Resolução nº6, de 3 de julho de 2008. Dispõe sobre o aproveitamento do potencial hidráulico para fins energéticos do rio Xingu, e dá outras providências.

Modelo de Simulação Individualizada MSUI ELETROBRAS Manual Metodologia 2014.

NAGHETTINI.N, PINTO, E, J, A – Hidrologia Estatística, CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Agosto de 2007.

NEIRA, L. K. “Curvas de regularização para Reservatórios Parcialmente Cheios e Confiabilidade Constante”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, UFPR, 2005.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Histórico da geração. Disponível em <http://www.ons.org.br/historico/geracao_energia.aspx> Acesso em: Outubro 2014

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Histórico da operação dos reservatórios. Disponível em <http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx> Acesso em: Outubro 2014

PEREIRA, B.E/ MARTINS, R. F./ ABREU, L. S./ RUTHER, R. – Atlas Brasileiro de Energia Solar,

Plano Decenal de Expansão de Energia 2022 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2013.

Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2014.

PORTAL G1 “Cheias no RioXingú”
<<http://g1.globo.com/pa/para/noticia/2014/03/cheia-atinge-491-familias-em-vitoria-do-xingu-no-para.html>> Acesso em:
Novembro2014.

REUTERS “GDF Suez appeals ruling to take down wind turbines near castle” <<http://uk.reuters.com/article/2013/10/03/us-france-wind-ruling-iUKBRE9920IB20131003>>Acessoem: Novembro 2014.

REVISTA INFOVIAS “Usina Hidrelétrica de Belo Monte”, Edição nº 9, ano 2.

REVISTA ISTOÉ DINHEIRO “A alcoa encolhe no Brasil”, Edição nº 860, 16 de Abril de 2014.

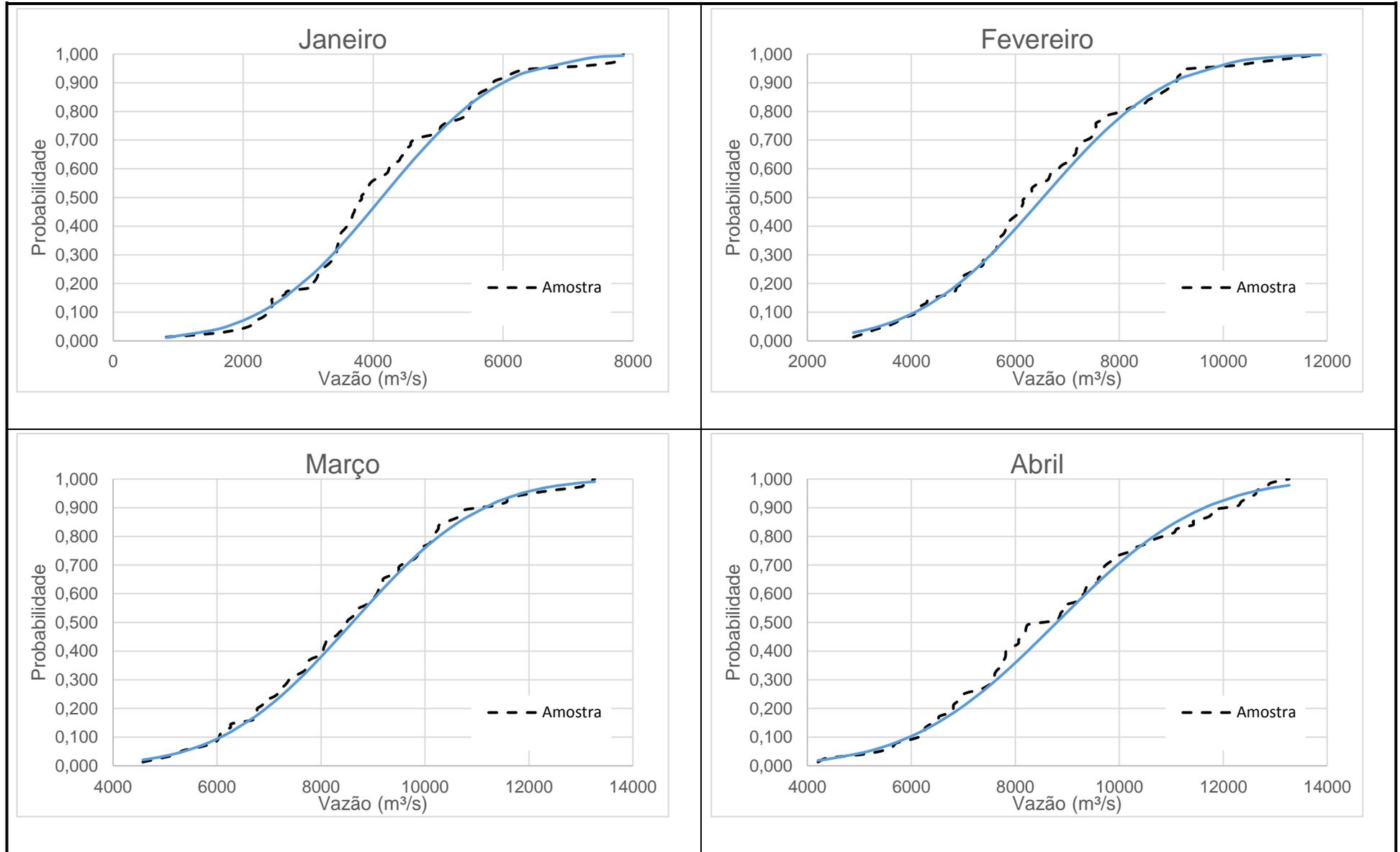
SCHREIBER, P. G. – Usinas Hidrelétricas, engevix. São Paulo: Blucher, 1978.

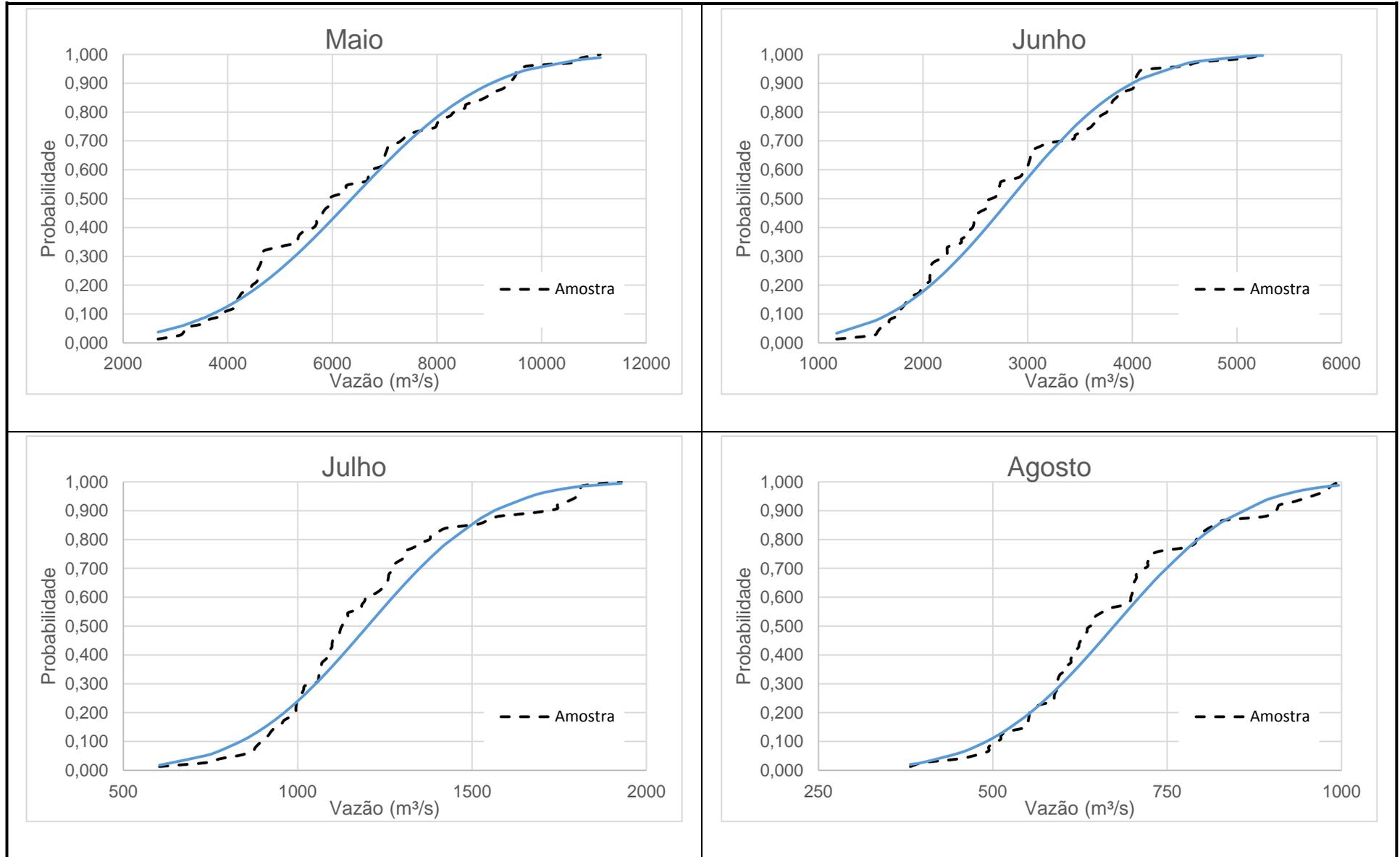
SIEMENS – Catálogo SWT-3.6-107

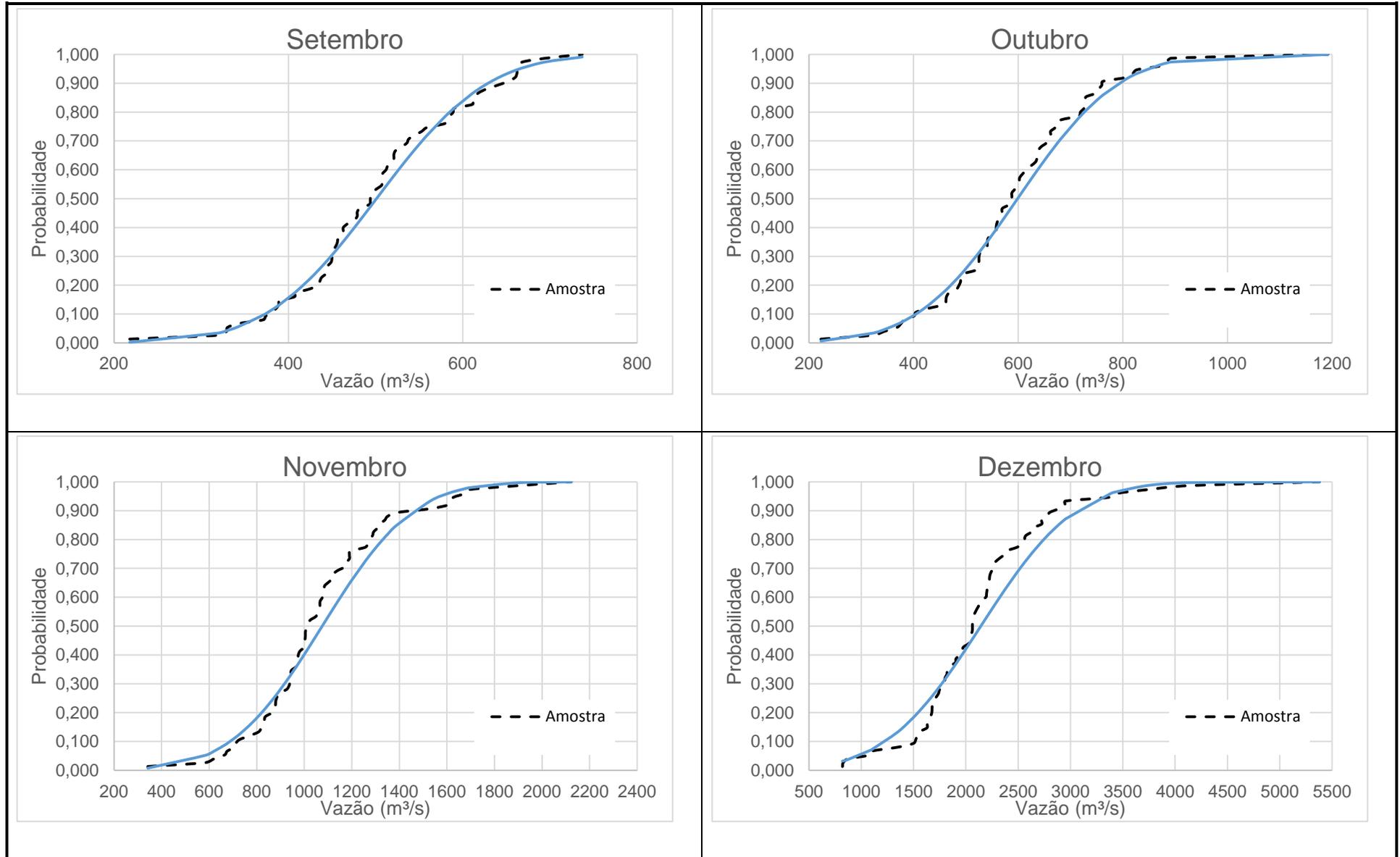
SOUZA, B. D. D. “Análise de valoração diferenciada de reservatórios de acumulação no planejamento da expansão”. Trabalho de conclusão de curso de MBA. Fundação Getúlio Vargas FGV, 2013.

VEJA “Governo Federal Perdeu 105 bi com crise do setor elétrico” <<http://veja.abril.com.br/noticia/economia/governo-federal-perdeu-r-105-bi-com-crise-do-setor-eletrico>> Acesso em: Novembro 2014.

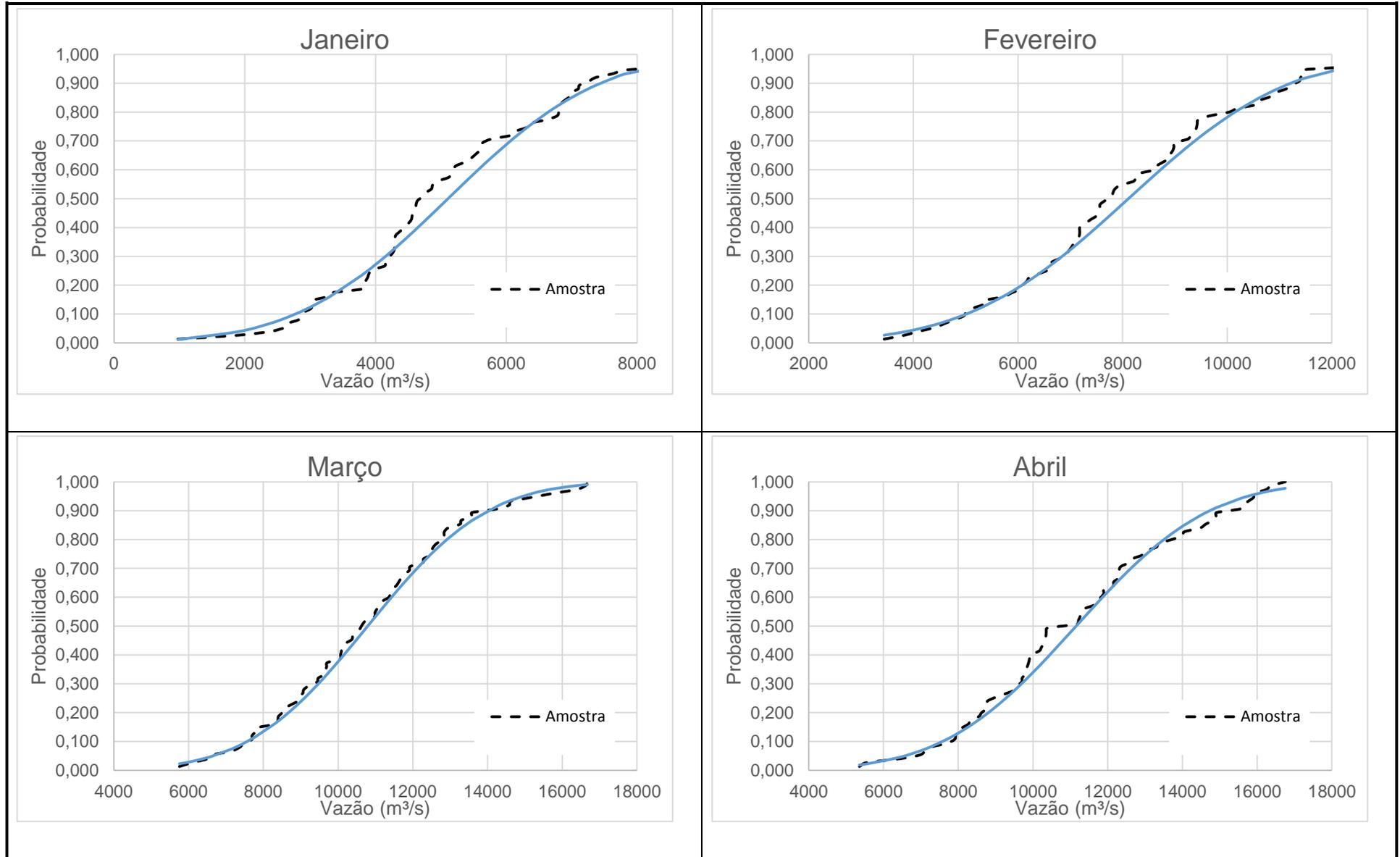
APÊNDICE A – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DE SÃO FÉLIX

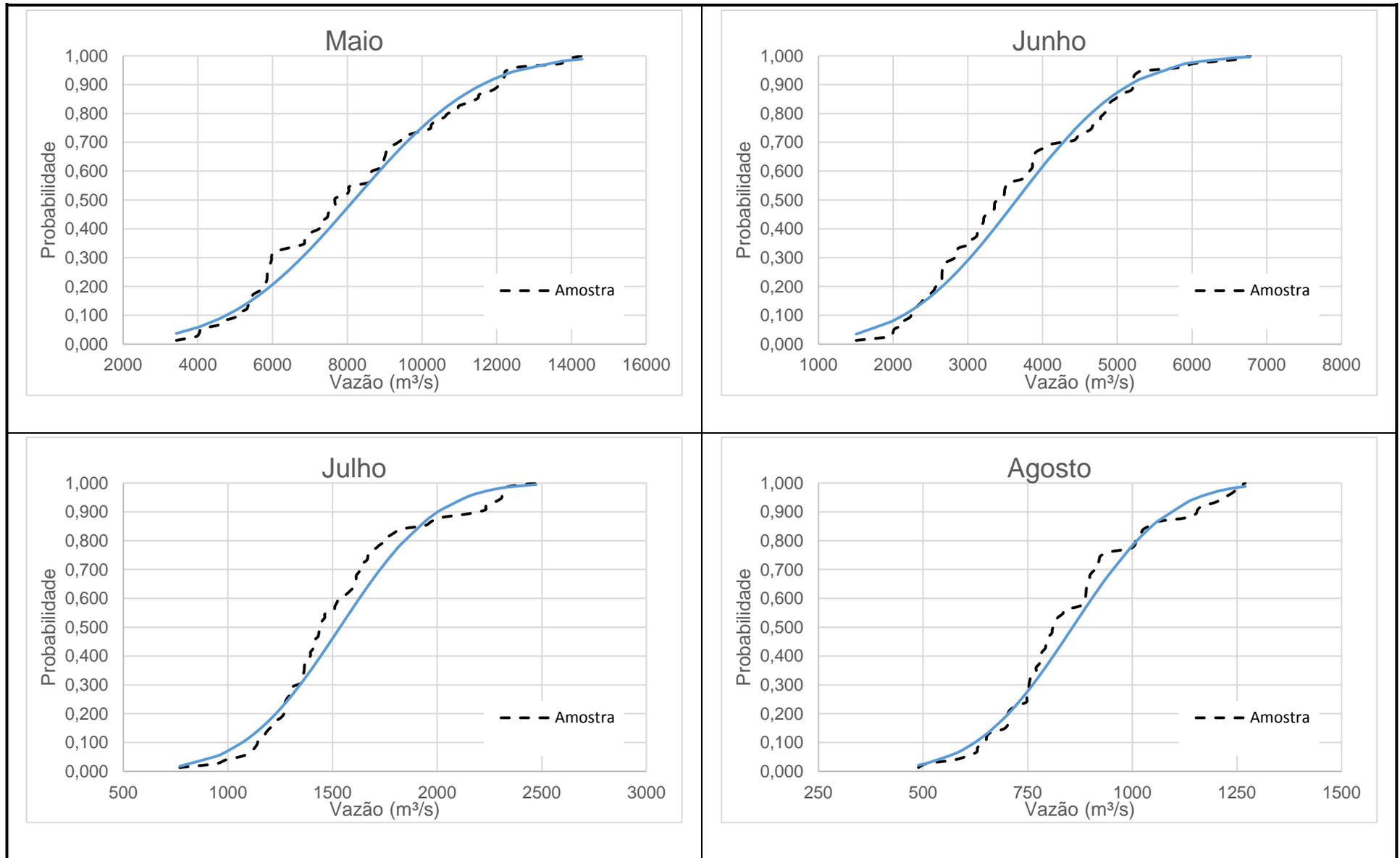


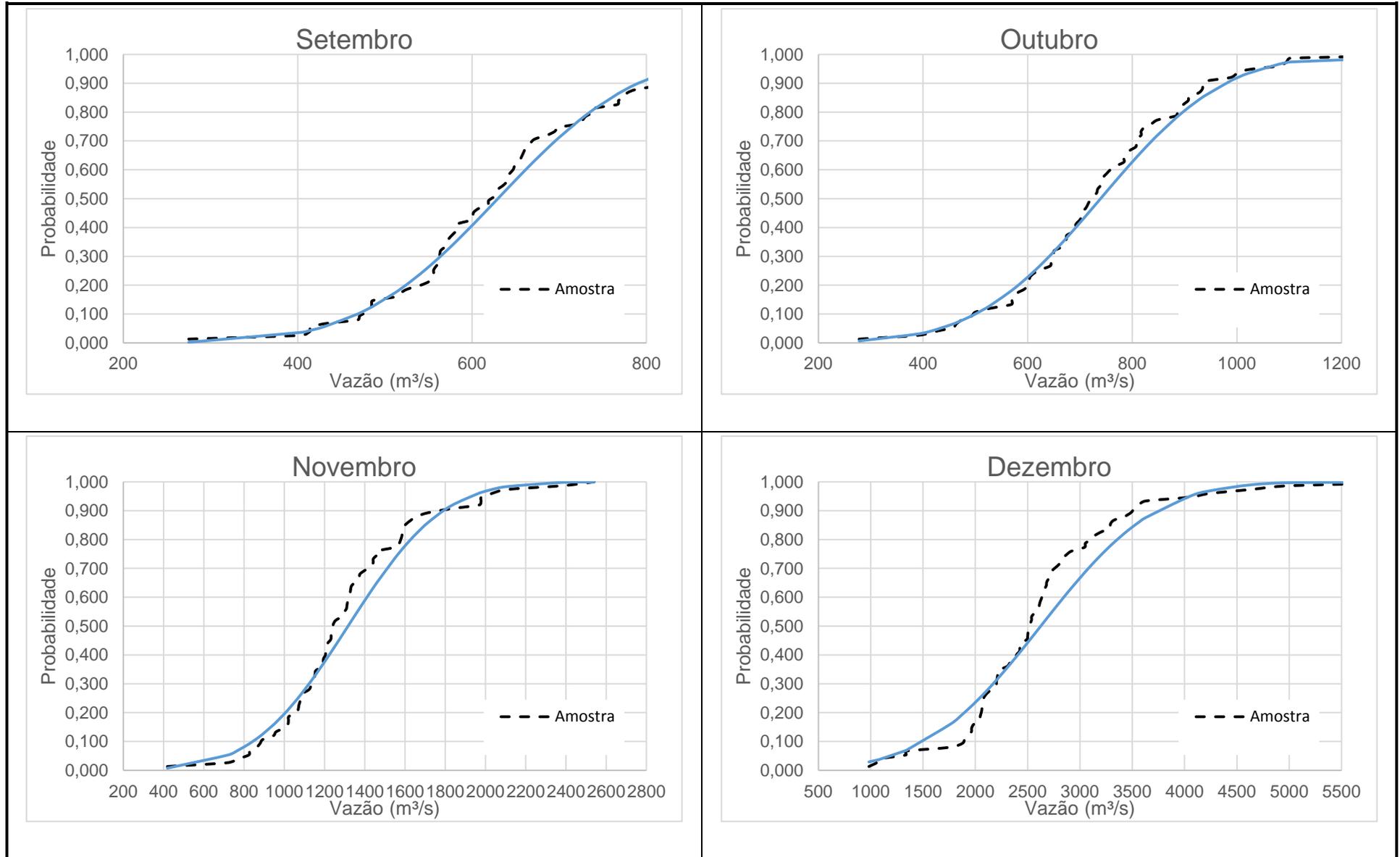




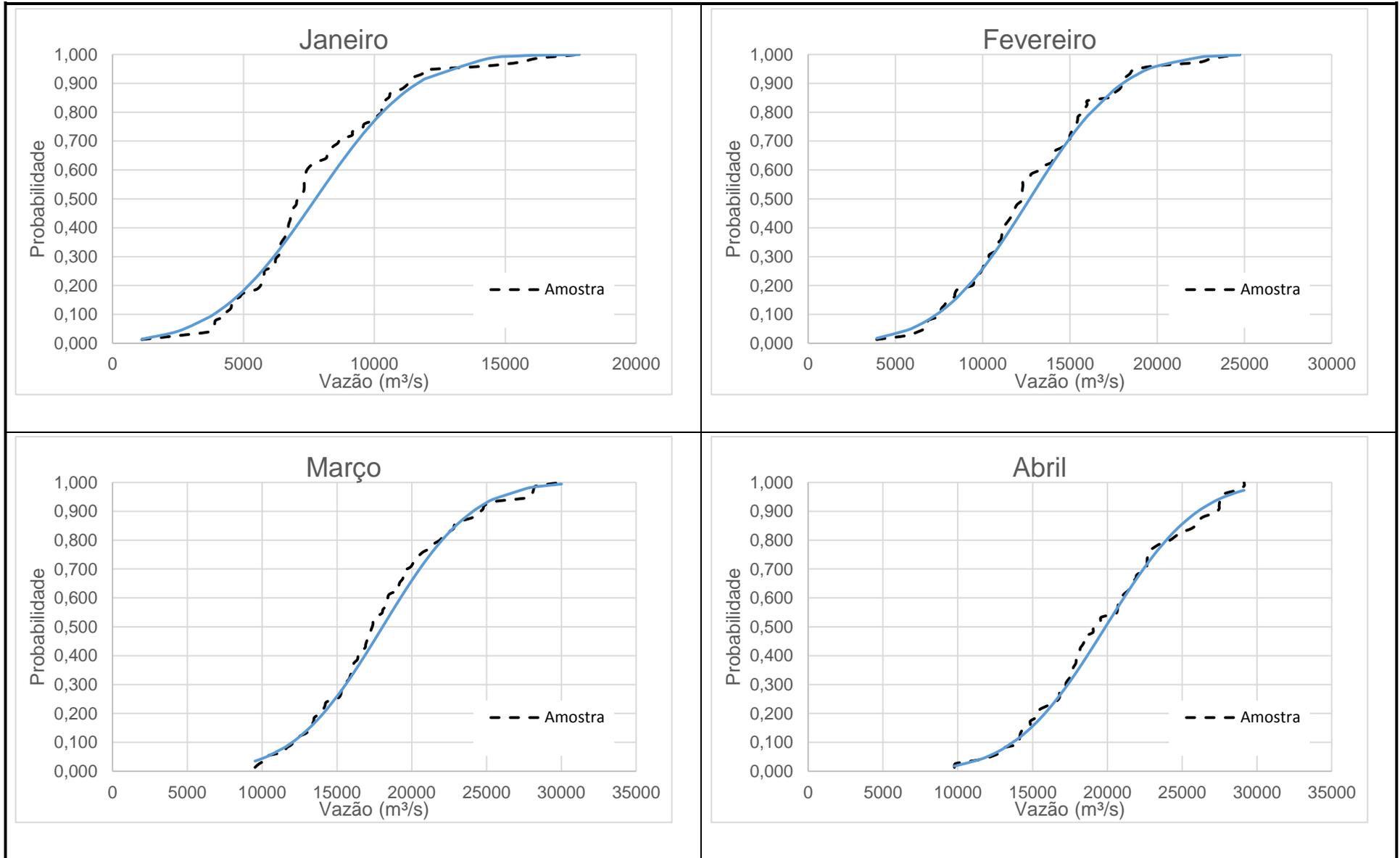
APÊNDICE B – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DE POMBAL

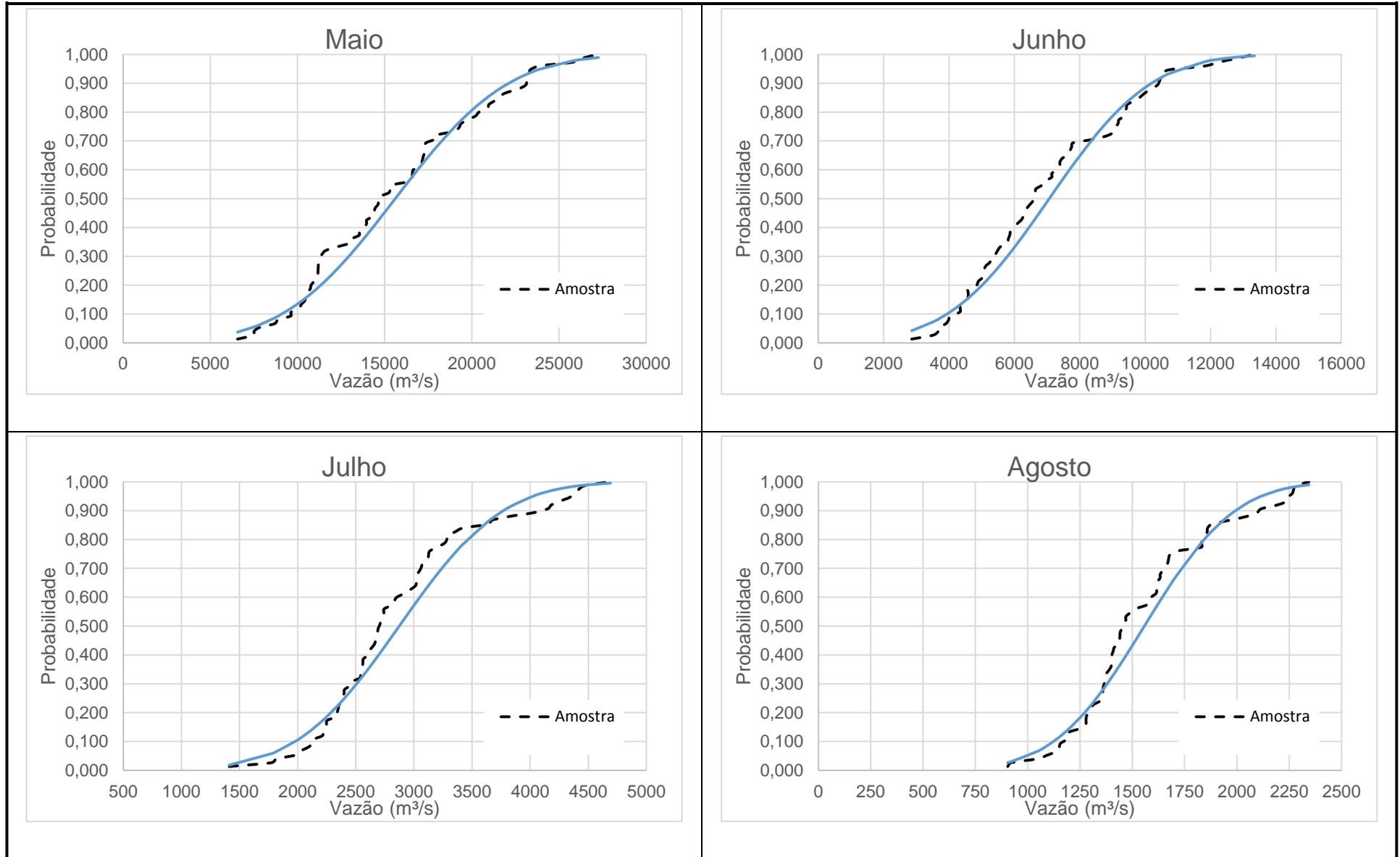


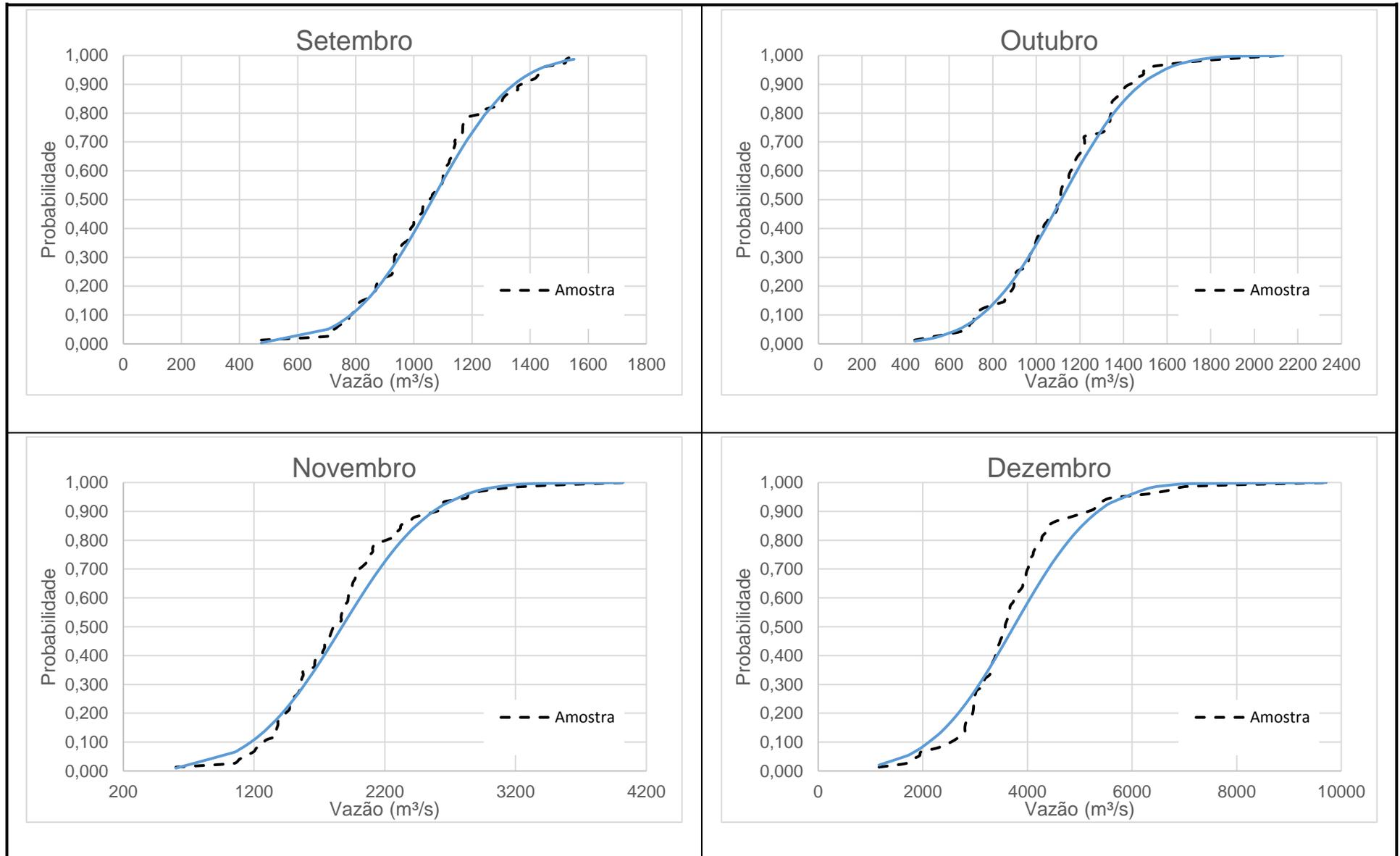




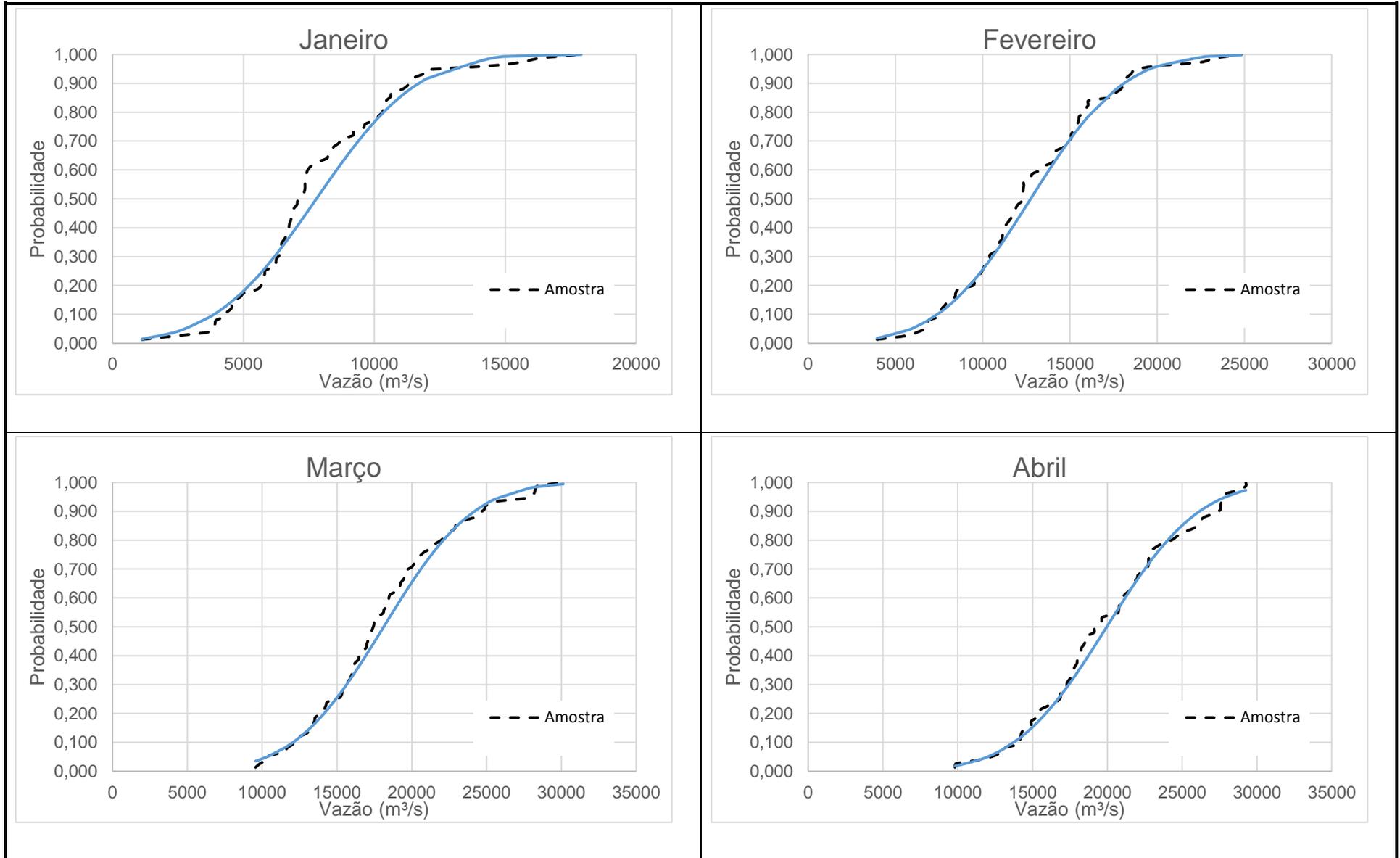
APÊNDICE C – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DE ALTAMIRA

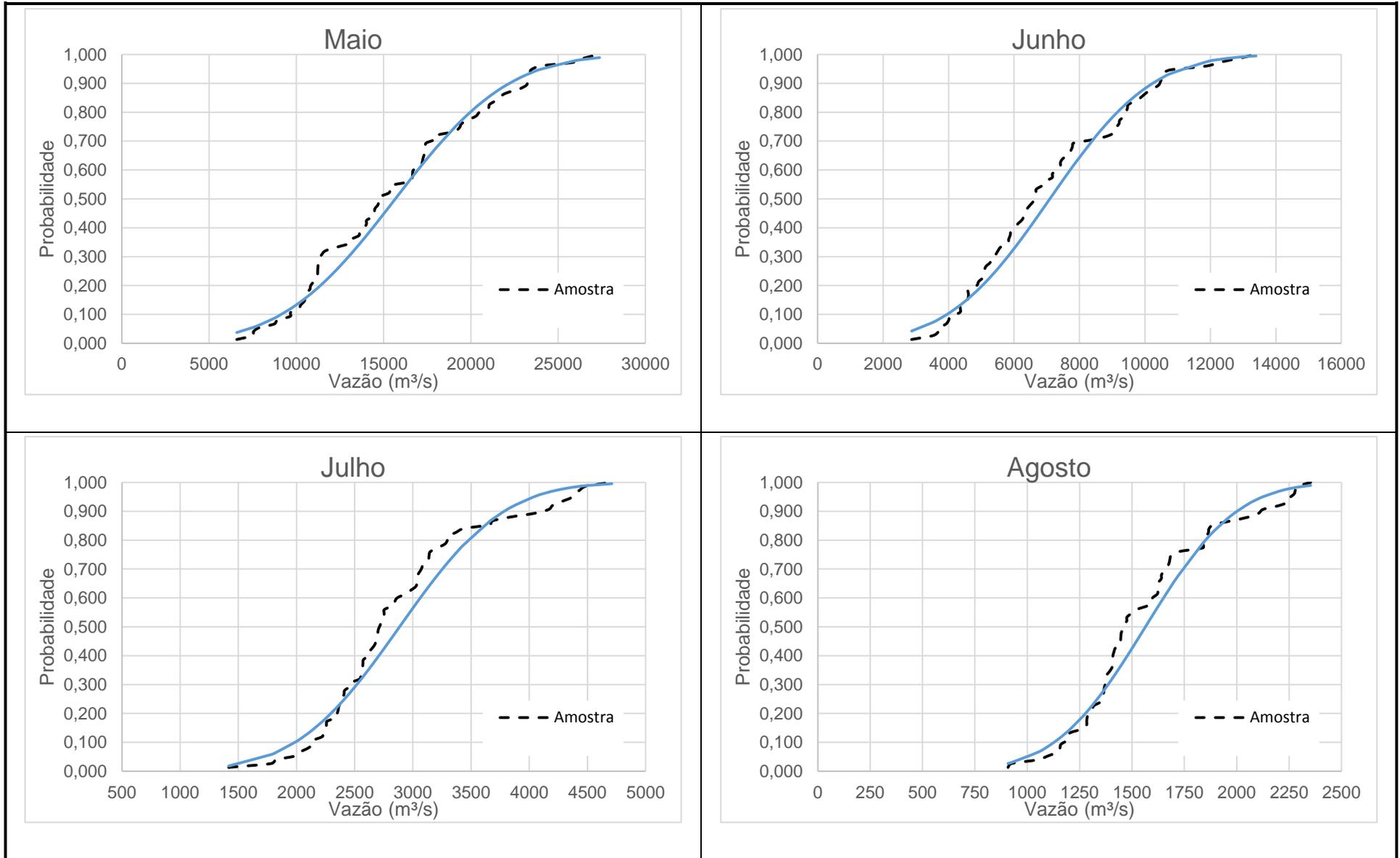


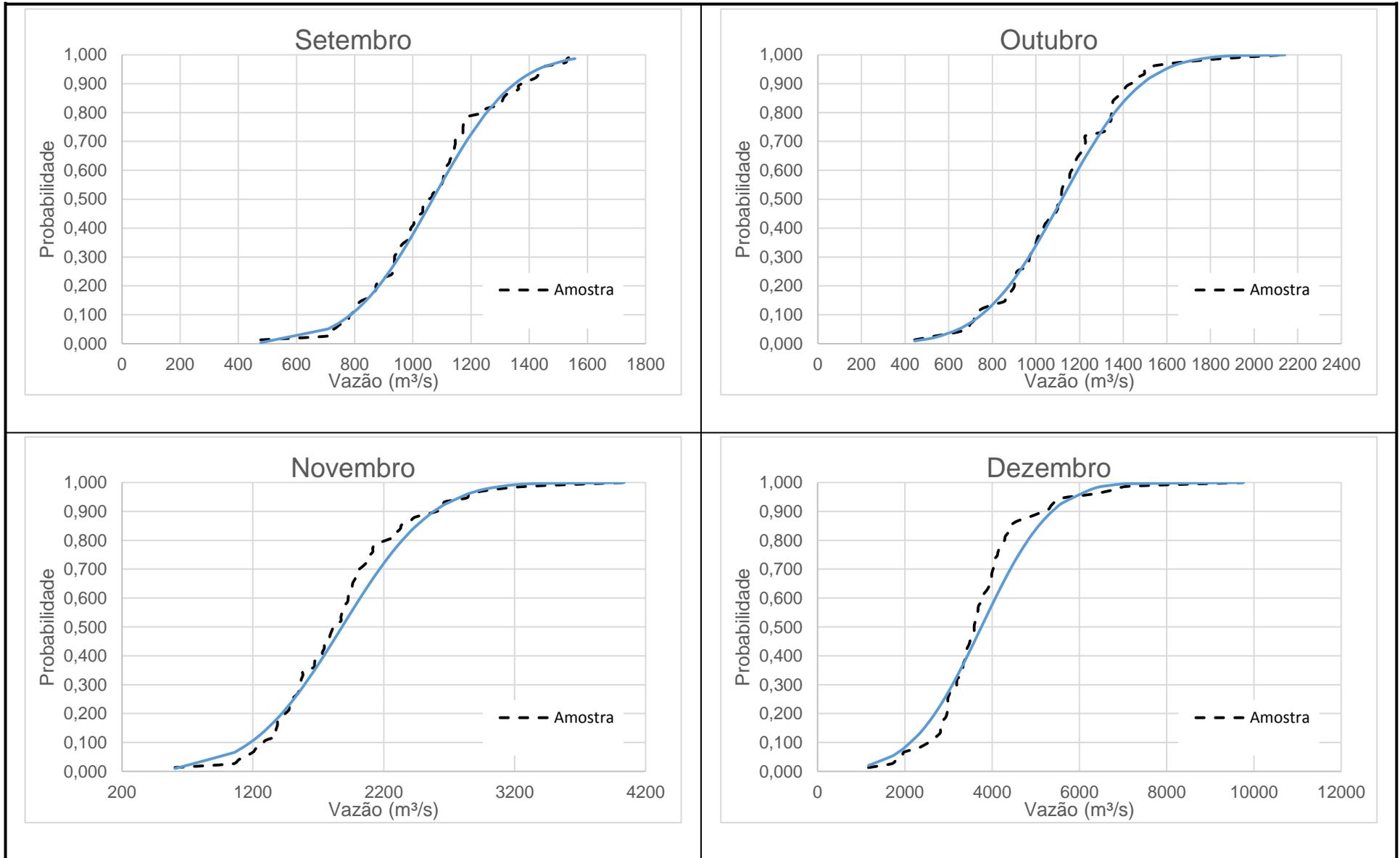




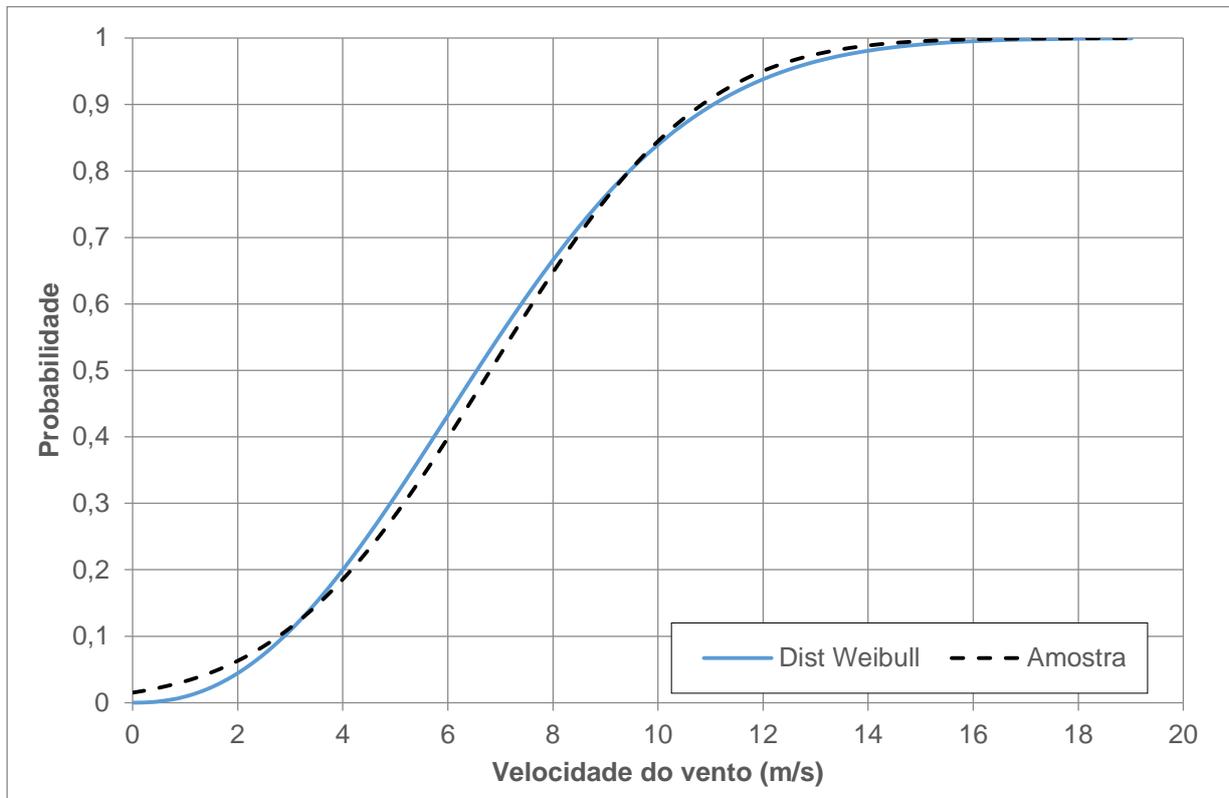
APÊNDICE D – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV DE BELO MONTE



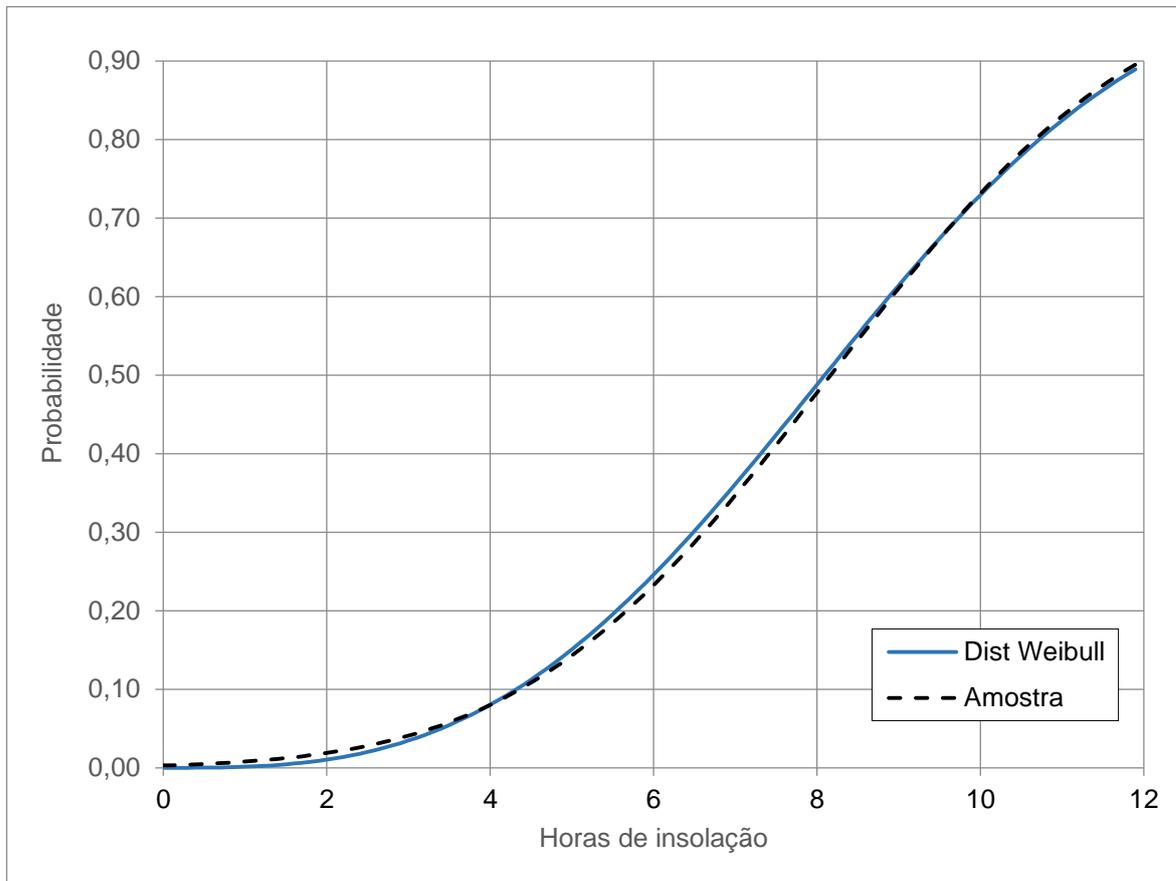




APÊNDICE E – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV VELOCIDADE DO VENTO NATAL RIO GRANDE DO NORTE



APÊNDICE F – TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV HORAS DE INSOLAÇÃO PARA NATAL RIO GRANDE DO NORTE



ANEXO A – RESOLUÇÃO Nº6, DE JULHO DE 2008

**Ministério de Minas e Energia
Gabinete do Ministro**

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA**RESOLUÇÃO Nº 6, DE 3 DE JULHO DE 2008.**

Dispõe sobre o aproveitamento do potencial hidráulico para fins energéticos do rio Xingu, e dá outras providências.

O PRESIDENTE DO CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA - CNPE, no uso de suas atribuições, tendo em vista o disposto no art. 2º da Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, no art. 1º, inciso I, do Decreto nº 3.520, de 21 de junho de 2000, no art. 15, parágrafo único, do Regimento Interno do CNPE, aprovado pela Resolução nº 17, de 16 de dezembro de 2002, nas deliberações contidas na Resolução nº 18, de 17 de dezembro de 2002, e considerando

o Decreto Legislativo nº 788, de 13 de julho de 2005, que autoriza o Poder Executivo a implantar o Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte, localizado no rio Xingu, no Estado do Pará, a ser desenvolvido após estudos de viabilidade pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - ELETROBRÁS;

a necessidade de novos parques geradores de energia elétrica para atender às expectativas de demanda geradas pelo crescimento econômico que o País deverá experimentar em futuro próximo;

a grande potencialidade que o rio Xingu apresenta em termos de possibilidade de instalação de aproveitamento hidrelétrico para o equilíbrio entre a oferta e a demanda de energia elétrica, no País, no próximo decênio;

a criação de diversas unidades de conservação ambiental e terras indígenas demarcadas pelo Governo Federal ao longo do rio Xingu;

a recente criação da Reserva Extrativista Médio Xingu, localizada no Município de São Félix do Xingu, que se incorpora ao conjunto de unidades de conservação existentes ao longo do rio Xingu e que evidencia o reconhecimento governamental sobre a importância de implementar medidas conservacionistas na Região;

a conclusão da Revisão dos Estudos de Inventário Hidrelétrico do rio Xingu em outubro de 2007, que recomenda, com base na avaliação de critérios técnicos, energéticos, econômicos e ambientais, a adoção da alternativa de divisão de queda do rio Xingu, constante de um único aproveitamento, situado à jusante da sede urbana da cidade de Altamira, no Estado do Pará, denominado Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte - AHE Belo Monte;

Resolução CNPE nº 6, de 3 de julho de 2008 - fl. 2

que o trecho do rio Xingu, entre a sede urbana de Altamira e a sua foz, dispõe de elevada queda natural e vazão bastante significativas que permitem a geração de energia em um único aproveitamento que tem como características elevada energia média gerada e possibilidade de integração ao Sistema Interligado Nacional - SIN, resolve:

Art. 1º Reconhecer o interesse estratégico do rio Xingu para fins de geração de energia hidrelétrica, bem como a importância estratégica de parcelas do território banhadas pelo rio Xingu para a conservação da diversidade biológica e da proteção da cultura indígena.

Art. 2º Determinar que o potencial hidroenergético a ser explorado será somente aquele situado no rio Xingu, entre a sede urbana do Município de Altamira e a sua foz.

§ 1º A determinação, mencionada no caput deste artigo, deverá ser operacionalizada nos Estudos de Planejamento Energético Nacional, coordenados e aprovados pelo Ministério de Minas e Energia.

§ 2º Determinar, ainda, que a ELETROBRÁS conduza as ações necessárias à continuidade dos estudos para o desenvolvimento e a conclusão da viabilidade do AHE Belo Monte, bem como realizar estudo de natureza antropológica, atinente às comunidades indígenas localizadas na área sob influência do aproveitamento hidrelétrico, devendo, ainda, ser ouvidas as comunidades afetadas.

Art. 3º O Ministério de Minas e Energia deverá acompanhar as ações para o desenvolvimento e a conclusão dos estudos de viabilidade do AHE Belo Monte, mantendo informado o CNPE.

Art. 4º Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

EDISON LOBÃO