

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE
DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL NO BRASIL ÀS
MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Eveline María Vásquez Arroyo

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Planejamento
Energético, COPPE, da Universidade Federal
do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Mestre em
Planejamento Energético.

Orientadores: Roberto Schaeffer

André Frossard Pereira de Lucena


Rio de Janeiro
Outubro de 2012

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DA
GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL NO BRASIL ÀS MUDANÇAS
CLIMÁTICAS

Eveline María Vásquez Arroyo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

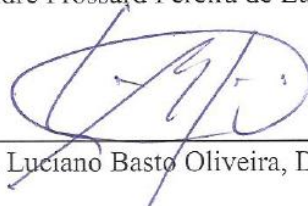
Examinada por:



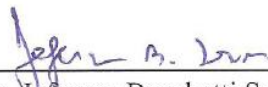
Prof. Roberto Shaeffer, PhD.



Prof. André Frossard Pereira de Lucena, D.Sc.



Dr. Luciano Basto Oliveira, D.Sc.



Dr. Jeferson Borghetti Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2012

Arroyo, Eveline María Vásquez

Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade da geração termelétrica a carvão mineral no Brasil às mudanças climáticas / Eveline María Vásquez Arroyo – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XVII, 176 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Roberto Schaeffer

André Frossard Pereira de Lucena

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 151-164.

1. Mudanças Climáticas. 2. Impactos. 3. Adaptação. 4. Termelétricas à carvão mineral. I. Schaeffer, Roberto, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Para meus pais, Tulio e Maria, por serem minha inspiração e exemplo de vida
e fortaleza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, por ter me dado a permissão de chegar até aqui, e por todas as pessoas que cruzaram meu caminho.

Aos meus orientadores Roberto Schaeffer e André Lucena. Muito obrigada pela paciência, compartilhamento de conhecimento e o estímulo à pesquisa. Além disso, à banca por ter aceitado examinar este trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro mediante a bolsa outorgada dentro do Programa PEC-PG.

Ao SEI pela outorga da licença do WEAP, em especial para o Charles Young. Thank you very much for all your support, I really appreciated it.

Aos Luiz Paulo do LAMCE e o Lázaro do IVIG, pelo assessoramento no uso do FERRET e conhecimentos em meteorologia, respectivamente.

Aos colaboradores do CENERGIA pelo convívio. Em especial ao Paulo, obrigada pelos momentos de risadas e valiosos ensinamentos e conselhos.

Aos funcionários do PPE, em especial à Sandrinha e o Paulo.

Aos meus mais que amigos do PPE: Luiza, Cynthia, Tamara, Clara, Natália, Nathalia, Victória, Daniele, Raquel, André, Rafael, Pedro R., Predo A. Muito obrigada pela amizade e apoio que sempre esteve presente. Ainda estou esperando o evento de Itaparica+20.

Aos meus amigos “gringos”: Gloria, Viviana, Rafa Che, Ana, Bilmer, Mauro e Giancarlo. Obrigada pelas vivencias compartilhadas e espero conservar nossa amizade a vida toda.

À minha “irmãzinha” Margarita que apesar da distância sempre esteve presente comigo. Além disso, gostaria agradecer às famílias Morales e Teodorani, por me tratar como uma filha mais e me dar todo o carinho, cuidados e apoio.

Ao Emiliano pelo carinho e apoio pessoal e profissional em estes últimos dois anos.

Aos meus pais, que me ensinaram a prosseguir sempre e que os obstáculos existem para serem superados. Aos meus sobrinhos: Guille e Gael por entenderem que a minha “escola” fica no Brasil, e ao Matias por cada vez que ver um computador pedir aos pais ligarem-no para falar com a “tia”.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DA GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL NO BRASIL ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Eveline María Vásquez Arroyo

Outubro/2012

Orientador: Roberto Schaeffer

André Frossard Pereira de Lucena

Programa: Planejamento Energético

Mudanças climáticas podem afetar a produção termelétrica a carvão mineral ao comprometer a eficiência do ciclo de geração e a disponibilidade hídrica para uso, principalmente, no sistema de resfriamento. O presente trabalho busca desenvolver uma abordagem metodológica para determinar a vulnerabilidade da termelétricidade a carvão mineral às mudanças climáticas no Brasil. Num primeiro momento, essa metodologia avalia uma possível variação na disponibilidade hídrica superficial devido a mudanças na precipitação e temperatura com base em uma modelagem de balanço hídrico que considera outros usos consuntivos. Num segundo momento, a abordagem metodológica aqui proposta também avalia a eficiência na geração termelétrica com um sistema de resfriamento fechado com torre úmida frente a uma mudança da temperatura do ar. Essa metodologia é aplicada a um estudo de caso para a usina CTSUL, comparando valores de temperatura e precipitação projetados até 2050 por três modelos climáticos de circulação geral e dois cenários de emissão de gases de efeito estufa com um cenário de referência construído com dados observados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR ASSESING THE VULNERABILITY OF
BRAZILIAN COAL-FIRED POWER PLANTS TO CLIMATE CHANGE

Eveline María Vásquez Arroyo

October/2012

Advisor: Roberto Schaeffer

André Frossard Pereira de Lucena

Department: Energy Planning

Climate change could reduce the generation efficiency and the water availability for cooling the requirements of coal-fired power production. Therefore, this study develops a methodological approach to determine the vulnerability of the coal-fired power generation to climate change in Brazil. First, this methodology evaluates the possible variations in freshwater availability due to changes in precipitation and temperature using a water balance model, taking into account other demand users. Secondly, based on the performance of a closed wet cooling tower system and possible changes in future air temperature, it is proposed a methodology to evaluate the effects on power generation efficiency. This methodology is applied to a case study for the CTSUL power plant. For this purpose, it is used temperature and precipitation projections values up to 2050. These projections are obtained from three general circulation climate models and two greenhouse gases emission scenarios. Finally, these scenarios are compared with a reference scenario based in observed data.

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO.....	1
II. TERMELETRICIDADE, USO DE ÁGUA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	5
2.1. Termeletricidade.....	5
2.2. Uso de água na termeletricidade	9
2.2.1. Sistema de Resfriamento	12
2.2.2 Introdução de tecnologia de captura de carbono e aumento do uso de água.....	22
2.3. Mudanças climáticas e sua influência no sistema de resfriamento e operação das usinas termelétricas.	24
III. PROPOSTAS METODOLÓGICAS PARA DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS TERMELETRICAS (CICLO RANKINE) ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.	36
3.1. Cenários de emissão de gases de efeito estufa e os modelos climáticos de circulação geral	37
3.1.1. Métodos de correção de modelos climáticos.....	42
3.2. Proposta de modelagem para determinação da disponibilidade hídrica de uma usina termelétrica frente às mudanças climáticas.	46
3.2.1. Descrição dos diferentes componentes na utilização do WEAP	50
3.2.2. Aplicação do WEAP na metodologia do trabalho.....	51
3.2.3. Definição da área de estudo.....	54
3.2.4. Informação Climatológica e Fluviométrica.....	57
3.2.5. Cobertura vegetal e uso do solo	60
3.2.6. Outras demandas hídricas.....	62
3.2.7. Infraestrutura física como regulador de vazão à jusante.	63
3.2.8. Alocação de prioridades	63

3.2.9.	Calibragem do modelo	63
3.2.10.	Construção das projeções dos cenários climatológicos.....	64
3.3.	Proposta metodológica para determinação da variação de eficiência de uma usina termelétrica com sistema de resfriamento fechado a torre úmida frente às mudanças climáticas.	65
IV. GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL E SUA VULNERABILIDADE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL: ESTUDO DE CASO UTE CTSUL		70
4.1.	Características das usinas termelétricas a carvão mineral no Brasil.	71
4.1.1.	Usinas em operação.....	73
4.1.2.	Expansões previstas.....	74
4.1.3.	Projetos em estudo	76
4.2.	Disponibilidade hídrica atual das bacias hidrográficas correspondentes às UTEs a carvão mineral no Brasil.	78
4.3.	Legislação ambiental aplicável para os sistemas de resfriamento das termelétricas a carvão mineral no Brasil	93
4.4.	Cenários climáticos nas áreas de localização das UTEs a carvão no Brasil.....	95
4.5.	Aplicação da metodologia proposta para determinação da disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas. Estudo de caso: UTE CTSUL	100
4.5.1.	Definição espacial da área de estudo.....	102
4.5.2.	Definição temporal do estudo: Informação Climatológica e Fluviométrica	106
4.5.3.	Uso do solo e cobertura vegetal	113
4.5.4.	Outras demandas hídricas.....	117
4.5.5.	Infraestrutura física de reservatórios com regulador de vazão.	119
4.5.6.	Alocação de prioridades	119
4.5.7.	Calibragem do modelo	120
4.5.8.	Construção das projeções dos cenários climatológicos e outros usos consuntivos para 2050	122

4.6.	Aplicação da metodologia para determinação da variação da eficiência frente às mudanças climáticas. Estudo de caso: UTE CTSUL.	129
4.7.	Resultados	133
4.7.1.	Resultados sobre a disponibilidade hídrica para UTE CTSUL	133
4.7.2.	Resultados da queda de eficiência da UTE CTSUL.....	137
4.8.	Medidas de Adaptação a Impactos Climáticos sobre UTEs à Carvão Mineral.....	141
V.	LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	145
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	151
	APENDICE A - Resultados de precipitação (mm) e temperatura para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3 para o cenário A2 e B1 no período 2021 – 2050.....	165

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1: Produção de energia térmica segundo o Ciclo <i>Brayton</i>	5
Figura II.2: Produção de energia térmica segundo o ciclo <i>Rankine</i> de vapor de água.	6
Figura II.3: Esquema da classificação de Usinas Térmicas de Ciclo <i>Brayton</i> e <i>Rankine</i>	8
Figura II.4: Uso de água no processo termelétrico em um ciclo <i>Rankine</i>	12
Figura II.5: Classificação dos tipos de Processos de Resfriamento	13
Figura II.6: Sistema de resfriamento de circulação fechada em torre úmida	14
Figura II.7: Sistema de resfriamento de circulação fechada em lagoa	15
Figura II.8: Sistema de resfriamento de circulação fechada indireta em torre seca	16
Figura II.9: Sistema de resfriamento de circulação fechada seca direta.....	17
Figura II.10: Sistema de resfriamento de circulação aberta	18
Figura II.11: Ciclo <i>Rankine</i> de vapor superaquecido representado pela relação de Temperatura – Entropia (T/S)	27
Figura II.12: Ciclo <i>Rankine</i> de vapor superaquecido representado pela relação de Temperatura – Entropia (T/S) com aumento de temperatura.	28
Figura III.1: Evolução da concentração de CO ₂ nos diferentes cenários de mudanças climáticas do IPCC. Fonte: IPCC (2000)	40
Figura III.2: Esquema dos métodos de correção das projeções dos modelos climáticos e sua função de densidade probabilística.....	43
Figura III.3: Fluxograma do desenvolvimento da aplicação do WEAP para determinação da disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas para uma usina termelétrica.	52
Figura III.4: Esquemática da capacidade da umidade das duas camadas do solo, mostrando as diferentes entradas e saídas hidrológicas para uma cobertura do solo ou tipo de cultura agrícola.	53
Figura IV.1: Localização das Usinas Termelétricas a Carvão Mineral em Operação, Construção e Outorga no Brasil.	77
Figura IV.2: Relação da Disponibilidade por Demanda nos Estados do Rio Grande do Sul e Ceará.....	82
Figura IV.3: Delimitação da Região Hidrográfica do Guaíba e localização da UTE CTSUL.	104

Figura IV.4: Definição das áreas de captação na bacia do Baixo Jacuí	105
Figura IV.5: Criação de isoietas nas áreas de captação.....	111
Figura IV.6: Mapa da cobertura do uso do solo para WEAP	115
Figura IV.7: Vazão observada e simulada no ponto localizado na estação fluviométrica Dona Francisca.	120
Figura IV.8: Vazão observada e simulada no ponto localizado na estação fluviométrica São Lorenzo.....	121
Figura IV.9: Análise da tendência do <i>baseline</i> com a projeção futura (2021-2050) para os modelos CGCM3.1, GFDL_CM2, MIROC3.2, UKMO-HADCM3.....	127
Figura IV.10: Esquema T-S para o ciclo de <i>Rankine</i> com reaquecimento da UTE CTSUL, simulado no software <i>Termograf</i>	130
Figura IV.11: Ciclo de temperaturas das etapas de condensação de vapor e resfriamento de água da UTE CTSUL.	132
Figura IV.12: Necessidades de água para a operação da Usina Termelétrica CTSUL segundo a modelagem no WEAP	133
Figura IV.13: Vazão do Rio Jacuí no ponto de captação para UTE CTSUL no cenário A2 para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3. Período de 2021 – 2050.	135
Figura IV.14: Porcentagem de permanência da vazão do Rio Jacuí no ponto de captação para UTE CTSUL no cenário A2 para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3. Período de meses de Janeiro-Fevereiro-Dezembro, 2021 – 2050.....	135
Figura IV.15: Vazão do Rio Jacuí no ponto de captação para UTE CTSUL no cenário B1 para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3, para o período de 2021 – 2050.	136
Figura IV.16: Porcentagem de permanência da vazão do Rio Jacuí no ponto de captação para UTE CTSUL no cenário B1 para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2 e UKMO-HADCM3. Período de meses de Janeiro-Fevereiro-Dezembro, 2021 – 2050.....	137

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1: Diferenças no uso da água nos processos de resfriamento de circulação aberta e de torre úmida de circulação fechada.	20
Tabela II.2: Consumo de água nos processos termoeletricos com sistemas de resfriamento a torre úmida.....	23
Tabela IV.1: Relação das UTEs a carvão mineral em operação no Brasil	73
Tabela IV.2: Relação das UTEs a carvão mineral em construção e outorgadas no Brasil...	75
Tabela IV.3: Relação de novos projetos de UTEs carvão mineral em estudo no Brasil segundo o Plano Nacional de Energia 2030	76
Tabela IV.4: Vazão média e disponibilidade hídrica das regiões hidrográficas onde ficam localizadas as UTEs a carvão mineral no Brasil segundo a ANA	81
Tabela IV.5: Identificação dos recursos hídricos que atendem às UTEs a carvão mineral..	84
Tabela IV.6: Índice da situação da criticidade dos corpos hídricos superficiais com respeito à sua disponibilidade hídrica	85
Tabela IV.7: Vazões médias, vazões Q_{95} , balanço hídrico da demanda x disponibilidade e a situação da disponibilidade hídrica detalhadas por Sub-bacia, segundo MMA	87
Tabela IV.8: Índice da situação da criticidade dos corpos hídricos superficiais com respeito à sua disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul.....	91
Tabela IV.9: Balanços Hídricos Considerados na Análise de Criticidade das Bacias Hidrográficas em Termos de Disponibilidade e Uso das Águas Superficiais no Rio Grande do Sul.....	92
Tabela IV.10: Legislação ambiental nacional do parâmetro físico Temperatura, aplicável para as usinas com sistema de resfriamento a circulação aberta.	94
Tabela IV.11: Resumo do clima do Século XX nas regiões do Nordeste, Sudeste e Sul	96
Tabela IV.12: Uso de água na usina de termelétrica CTSUL	102
Tabela IV.13: Fontes das variáveis climatológicas e fluviométricas para a construção do modelo em WEAP	106
Tabela IV.14: Qualidade da disponibilidade de dados históricos mensais das estações pluviométricas na região do Guaíba.	108

Tabela IV.15: Qualidade da disponibilidade de dados históricos mensais das estações pluviométricas na região do Guaíba.....	109
Tabela IV.16: Estações pluviométricas utilizadas para o desenho das isoietas na região do Guaíba.....	110
Tabela IV.17: Valores da estação pluviométrica base, isoietas e valor de correção por cada área de captação.....	112
Tabela IV.18: Classificação da cobertura do uso do solo original e agrupação utilizada no modelo	113
Tabela IV.19: Uso do solo da área de estudo durante as estações do ano.....	114
Tabela IV.20: Distribuição da cobertura do uso do solo	115
Tabela IV.21: Coeficiente de Cultura por Variação Temporal	116
Tabela IV.22: Parâmetros agronômicos utilizados no modelo.....	116
Tabela IV.23: Quantidade de cabeças de suíno para o ano base de 1987 por área de captação.	118
Tabela IV.24: Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe e Índice de BIAS para a construção do modelo para disponibilidade hídrica para UTE CTSUL.	120
Tabela IV.25: Diferenças na resolução dos modelos climáticos globais entre o TAR e o AR4 do IPCC.....	122
Tabela IV.26: Localização dos pontos de informação de cada AOGCM para o <i>downscaling</i> ao modelo hidrológico no WEAP.....	124
Tabela IV.27: Projeção dos usos consuntivos na montante da UTE CTSUL para o ano 2050	128
Tabela IV.28: : Dados técnicos de operação da UTE CTSUL	129
Tabela IV.29: Resultados dos estados do ciclo termodinâmico da UTE CTSUL.....	130
Tabela IV.30: Valores de Temperatura e Umidade Relativa: Média anual, Média de Verão, Média de Inverno. Cenário de referência (1987 – 2000) e Cenários A2 e B1 por modelo climático (2021 – 2050).....	138
Tabela IV.31: Redução de potência (MW) e perda de eficiência (%) para cenário de referencia, e cenários A2 e B1 (2021-2050).....	138
Tabela IV.32: Redução de potência (MW) e perda de eficiência (%) para cenário de referencia, e cenários A2 e B1 (2021-2050) para a estação do verão.	139

Tabela IV.33 Ganho de potência (MW) e de eficiência (%) para cenário de referencia, e cenários A2 e B1 (2021-2050) para a estação do inverno.....	140
---	-----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ANA	Agência Nacional Água.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
AOGCM	Modelos Climáticos Global de Circulação Geral acoplado Oceano-Atmosfera.
AR4	Fourth Assessment Report-IPCC (Quarto Relatório de Avaliação)
BIRD	Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento.
CCCMA	Canadian Center for Climate Modeling and Analysis.
CCSR/NIES	Center for Climate Studies and Research/National Institute for Environmental Studies.
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente.
CSIRO-Mk2	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research.
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos.
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
GEE	Gases de Efeito Estufa.
GFDL-CM2	National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA - Geophysical Fluids Dynamic Laboratory.
HadCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research.
IAEA	International Atomic Energy Agency.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia do Brasil

MDE	Modelos Digitais de Elevação.
MMA	Ministério de Meio Ambiente do Brasil.
MME	Ministério de Minas e Energia.
NCDC	National Climatic Data Center.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration.
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PNE	Plano Nacional de Energia
SEI	Stockholm Environment Institute.
SIG	Sistema de Informações Geográficas.
SRES	Special Report on Emission Scenarios (Relatório Especial sobre Cenários de Emissão do IPCC).
SREX	Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation
TAR	Third Assessment Report – IPCC (Terceiro Relatório de Avaliação)
UNFCCC	United National Framework on Climate Change Convection
UTE	Usina Termelétrica.
WEAP	Water Evaluation and Planning System.

I. INTRODUÇÃO

Mudanças nas variáveis climáticas, como temperatura, precipitação, velocidade do vento, etc. estão sendo associadas à acumulação de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera como consequência principalmente de atividades antropogênicas (ARNELL *et al.*, 2004 e 2005, DIBIKE e COULIBALY, 2005, IPCC, 2007, BIRD, 2010a, MCT, 2010). O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC) apresentou um relatório (IPCC, 2000) com diferentes cenários para avaliar a evolução das emissões de GEE relevantes até o final do Século XXI. Esses cenários foram classificados em quatro categorias principais, dois otimistas (B1 e B2) e dois pessimistas (A1 e A2). Em cada cenário analisam-se aspectos demográficos, econômicos e tecnológicos. Baseados nesses cenários, o IPCC, no Quarto Relatório de Avaliação sobre Mudanças Climáticas, indica que, entre 2090 e 2099, a temperatura média global pode aumentar entre 1,1 e 6,4 °C comparado com o período de 1980-1999 (IPCC, 2007). Ademais, assinala que as chuvas aumentariam nas regiões tropicais com máxima precipitação, além das áreas de altas latitudes, como consequência de uma intensificação geral do ciclo hidrológico. Porém, nas regiões subtropicais, a precipitação diminuiria e haveria um aumento na frequência e nas intensidades de ocorrência de eventos extremos (IPCC, 2012).

Essas mudanças podem gerar benefícios em certas regiões, mas deterioração em outras. Esses impactos positivos ou negativos poderiam impactar diferentes sistemas socioeconômicos e naturais, podendo intensificar conflitos entre eles. Dessa forma, estudos dos possíveis impactos advindos das mudanças climáticas ajudariam a formular estratégias de mitigação e adaptação (PEREZ-GARCIA *et al.*, 2002, ROSENZWEIG *et al.*, 2004, NICHOLLS, ROBERT J e TOL, 2006, SCHAEFFER *et al.*, 2008a, MCT, 2010).

O setor energético é vulnerável a impactos advindos de alterações no clima e eventos extremos, tanto na sua produção quanto no seu consumo (ARNELL *et al.*, 2005, BULL *et al.*, 2008, SCHAEFFER *et al.*, 2008a, BIRD, 2010a, LUCENA *et al.*, 2010,

SCHAEFFER *et al.*, 2012). Dessa forma, é importante realizar estudos que ajudem a definir e analisar as vulnerabilidades do sistema energético frente a variações do clima e, com esse fundamento, propor medidas de adaptação.

As mudanças climáticas poderiam impactar na eficiência da geração de energia termelétrica e nas necessidades de água em seu sistema de resfriamento (SCHAEFFER *et al.*, 2012). No caso de usinas termelétricas (UTE) a carvão mineral, o impacto centraliza-se no sistema de resfriamento do próprio ciclo *Rankine*. O sistema de resfriamento é utilizado para o processo de condensação do vapor expandido proveniente da turbina que gera trabalho mecânico e posteriormente energia elétrica.

A água utilizada para a condensação apresenta uma elevação na temperatura e pode ser devolvida diretamente a um corpo receptor (sistemas de resfriamento aberto) ou pode ser tratada e reutilizada (sistema de resfriamento fechado). Ainda, o sistema de resfriamento fechado pode subdividir-se em úmido (como as torres de resfriamento) e seco. Assim, dependendo do tipo de sistema de resfriamento, o fluxo de massa de água necessário é de aproximadamente 50 vezes o fluxo de massa do vapor d'água (CARNEY *et al.*, 2008). O sistema fechado com torre úmida precisa de aproximadamente 3% dessa quantidade de água para reposição devido à evaporação produzida na torre de resfriamento. Portanto, o uso de água é intensivo e esta pode ser captada de rios, lagos, reservatórios subterrâneos, mares, etc.

Com a alteração das condições climáticas e dos padrões históricos de precipitação, a operação de usinas termelétricas existentes pode vir a ser comprometida, assim como a seleção, concepção e localização de novas unidades (BULL *et al.*, 2008) devido a uma possível escassez na disponibilidade hídrica nos pontos de captação das usinas. A disponibilidade hídrica é necessária para não somente atender à crescente demanda da agricultura, indústria e outros setores produtivos e energéticos, como também satisfazer os requisitos de ecossistemas aquáticos e vazão ecológica (LÉVITE *et al.*, 2003). Porém, BIRD (2010) assinala que equilibrar a disponibilidade hídrica com a demanda de vários

setores será cada vez mais difícil, uma vez que a crescente demanda e as novas tecnologias podem exigir mais água nas regiões com disponibilidade reduzida.

Um possível aumento da temperatura do ar devido às mudanças climáticas e, como consequência, o aumento da temperatura da água utilizada para o resfriamento, origina, , uma queda na potência líquida gerada com a mesma quantidade de combustível fóssil consumido nas termelétricas (MIDEKSA, T. K e KALLBEKKEN, 2010, GOLOMBEK *et al.*, 2011). Além disso, o aumento de temperatura pode complicar as restrições da regulamentação ambiental sobre temperatura de descarga do efluente, o que pode levar a reduções na potência elétrica produzida pelas usinas termelétricas.

Nos casos de sistemas fechados úmidos, além do possível aumento da temperatura da fonte e da disponibilidade hídrica, a usina deverá levar em conta usuários à jusante devido ao consumo de água na evaporação. Além disso, a temperatura do ar e a umidade relativa ambiente também poderiam afetar esse tipo de resfriamento e, com isso, a eficiência na geração elétrica.

Assim, a geração termelétrica é dependente do recurso água e de múltiplas variáveis climáticas que afetam a produção de eletricidade. A competição por água pode criar tensões em um clima mais seco, devido à alta demanda de água para geração de energia e para outros usos consuntivos (Bull et al. 2007). Estudos recentes avaliam esses possíveis impactos em vários tipos de termelétricas com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade delas e, com isso, conseguir um melhor planejamento e estratégias de adaptação (DURMAYAZ e SOGUT, 2006, SCHAEFFER *et al.*, 2008b,, KOCH e VÖGELE, 2009, FÖRSTER e LILLIESTAM, 2010, MIDEKSA, T. K. e KALLBEKKEN, 2010, GOLOMBEK *et al.*, 2011, LINNERUD *et al.*, 2011) .

No presente trabalho, propõe-se uma metodologia para avaliar a disponibilidade hídrica para uma usina termelétrica a carvão mineral pulverizado mediante o uso do modelo *Water Evaluation and Planning System* (WEAP) do *Stockholm Environment Institute* (SEI). Esse modelo incorpora ferramentas para a avaliação das possíveis mudanças na temperatura

e precipitação projetadas para dois cenários de GEE (A2 e B1) considerados pelo IPCC (2000), baseado na modelagem de balanço hídrico de águas superficiais e subterrâneas. Além disso, o WEAP possibilita que o ponto de interesse interaja com outros usos consuntivos que poderiam entrar em conflito pelo uso de água na mesma área geográfica utilizando uma modelagem dinâmica.

Ainda, propõe-se uma metodologia adicional para determinação da eficiência na geração termelétrica com sistemas de resfriamento com torre úmida e seu possível impacto pela mudança de temperatura do ar.

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos, incluindo esta introdução. No Capítulo II, faz-se uma revisão da literatura científica sobre os sistemas termelétricos, o uso da água, a influência de variáveis climáticas e como as possíveis mudanças poderiam impactar na produção de termelétrica.

O Capítulo III apresenta as metodologias propostas para o estudo dos possíveis impactos das mudanças climáticas nas usinas termelétricas.

O capítulo IV apresenta uma descrição do sistema termelétrico a carvão mineral no Brasil. Além disso, inclui-se uma análise baseada na localização das UTEs a carvão mineral com estudos relacionados à atual disponibilidade hídrica das bacias comprometidas, descrição das condições climáticas observadas e as possíveis mudanças de acordo com cinco modelos climáticos de circulação geral segundo MARENGO (2007). O capítulo apresenta também o estudo de caso da aplicação das metodologias propostas e os respectivos resultados para a UTE Central Termoelétrica Sul (CTSUL), localizada no Estado do Rio Grande do Sul.

Finalmente, o Capítulo V conclui esta dissertação com as considerações finais e limitações encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa.

II. TERMELETRICIDADE, USO DE ÁGUA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

2.1. Termeletricidade

Dentre os diversos ciclos termodinâmicos que são aplicados à produção de energia, podemos destacar dois: o ciclo *Brayton* e o ciclo *Rankine* (CARNEY *et al.*, 2008). O ciclo *Brayton* (Figura II.1) trabalha em sistemas de turbinas a gás. Inicialmente, um compressor capta ar do meio ambiente e o comprime a alta pressão (processo isentrópico), o ar passa para uma câmara de combustão, na qual se realiza a combustão do gás combustível a pressão constante. Finalmente, na turbina a gás se expandem os gases de combustão (expansão isentrópica) e se produz trabalho mecânico, gasto em parte pelo funcionamento do compressor, gerando energia elétrica (WARK e RICHARDS, 2001, KHALIQ e KAUSHIK, 2004, WU, 2007, e CARNEY *et al.*, 2008).

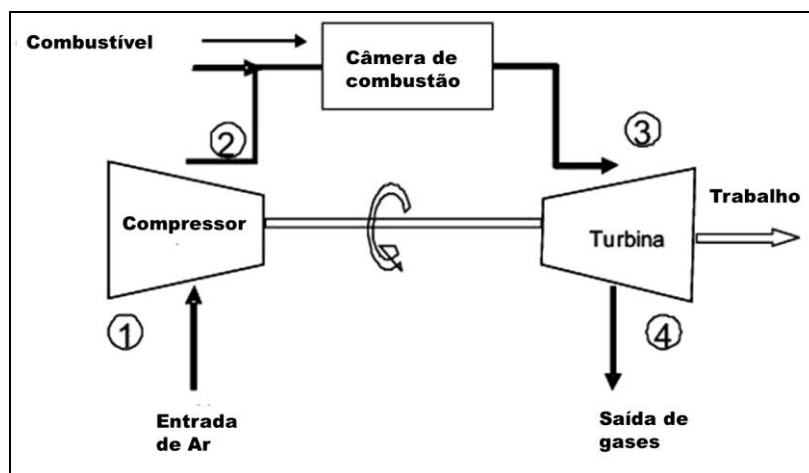


Figura II.1: Produção de energia térmica segundo o Ciclo *Brayton*.

Fonte: WARK e RICHARDS (2001)

Por outro lado, o ciclo *Rankine* (Figura II.2) é dado pela conversão de um líquido em gás a alta pressão (majoritariamente se usa vapor de água) produzido em uma caldeira, por meio de um processo de combustão de combustíveis fósseis (gás, carvão, petróleo ou seus derivados), biomassa (bagaço de cana, carvão vegetal, etc.), ou a partir da fissão nuclear do urânio em um reator nuclear (CARNEY *et al.*, 2008). O gás (vapor de água) se

expande em uma turbina produzindo trabalho mecânico e em seguida o gás de baixa pressão, que sai da turbina, é condensado¹ e bombeado de volta para a caldeira. (WARK e RICHARDS, 2001, WU, 2007, CARNEY *et al.* 2008, LIMA, 2012). Esta baixa pressão é crítica para a eficiência termodinâmica do processo, de forma que uma contrapressão maior irá diminuir a eficiência do processo (CARNEY *et al.*, 2008), ao evitar o esgotamento do vapor.

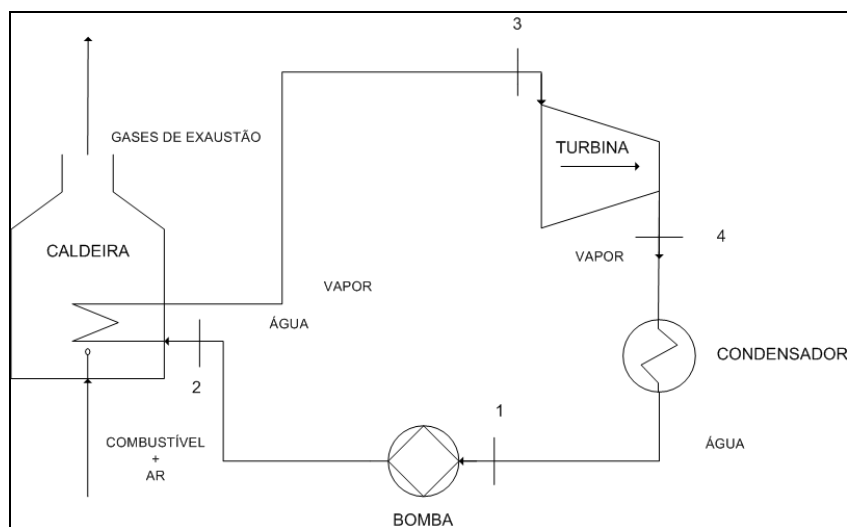


Figura II.2: Produção de energia térmica segundo o ciclo *Rankine* de vapor de água.

Fonte: LIMA (2012)

O ciclo combinado une um ciclo *Brayton* e um ciclo *Rankine* em cascata. Os gases de combustão que escapam da turbina a gás (ciclo *Brayton*) a temperaturas elevadas² entram no ciclo de energia a vapor, onde uma fração da sua exergia é recuperada ao alimentar a produção de vapor no ciclo *Rankine* (KHALIQ e KAUSHIK, 2004, EPE, 2007a, CARNEY *et al.*, 2008). CARNEY *et al.* (2008) indicam que os parâmetros de uma turbina a gás, como a temperatura máxima e a razão de pressão, afetam mais a eficiência do ciclo que aqueles do ciclo a vapor. WUNSCH (1985), apud KHALIQ e KAUSHIK (2004), assinala que a eficiência do ciclo combinado máxima é alcançada quando a temperatura dos gases de exaustão do ciclo *Brayton* é maior do que o correspondente à eficiência máxima

¹ O processo de condensação cria um vácuo para conseguir atrair o gás sobre a turbina.

² A mistura dos gases do ciclo *Brayton* com temperaturas de 1327°C - 627°C e do vapor do ciclo *Rankine* (577°C - 15 °C), produz uma eficiência do ciclo termodinâmico melhorado (BEÉR, 2004).

da turbina a gás. Com o ciclo combinado consegue-se uma melhor eficiência térmica, e por isso são mais utilizadas na base; sendo que, quando o combustível é o principal componente do custo total, a eficiência se torna fundamental (KHALIQ e KAUSHIK, 2004, EPE, 2007a). Em geral, usinas termoeletrica que compreendem um ciclo *Brayton* (inclusive os ciclos combinados) são alimentadas com gases combustíveis limpos, como o gás natural ou gás de síntese a partir de carvão ou biomassa (CARNEY *et al.*, 2008). A tecnologia de gasificação permite que o combustível líquido ou sólido seja convertido em gás de síntese (*synthesis gas*), em um processo a alta temperatura e com falta de oxigênio. Este gás pode ser alimentando no ciclo *Brayton*; porém, esta ainda não é uma tecnologia muito difundida (ANSOLABEHERE *et al.*, 2007, IEA, 2008, HOFFMANN, 2010).

Na Figura II.3 pode-se observar os diferentes tipos de classificação de geradores termelétricos a combustível fóssil e biomassa. Se para geração termelétrica é usado como combustível o carvão mineral, este pode ser pulverizado e alimentado como uma pasta no interior da caldeira, no que é chamado de sistema de carvão pulverizado (PC). Se a gasificação do carvão é usada para produzir o gás de síntese, que é então utilizado em um ciclo combinado, forma-se o chamado ciclo combinado com gaseificação integrada (IGCC). Para reatores nucleares, o combustível nuclear é a fonte de calor para geração do vapor de água. No caso da utilização do gás natural, pode ser aplicado um ciclo combinado conhecido como ciclo combinado de gás natural (NGCC). Outras possíveis fontes de calor são: a geotérmica e usinas concentradoras de energia solar (*Concentrated Solar Power* - CSP). Em certos casos, quando a temperatura para gerar vapor não é suficientemente alta, é usado outro fluido de trabalho, tais como o amônio ou um fluido orgânico (ex: propano).

O NGCC é o mais eficaz de todos os processos mencionados, enquanto que o IGCC é a tecnologia mais eficiente de segunda geração (CARNEY *et al.*, 2008). Para casos de PC, quanto maior a temperatura e a pressão do vapor mais eficiente é o processo. Desta forma, são identificados três tipos de queima de PC: subcrítica, supercrítica, e ultra-

supercrítica³ (ANSOLABEHERE *et al.*, 2007). Com respeito aos reatores nucleares, o vapor d'água permanece sobre pressões subcríticas, e por razões de segurança, são em geral menos eficientes do que as plantas de PC (CARNEY *et al.*, 2008).

FÖRSTER e LILLIESTAM (2010) indicam que devido às perdas durante a conversão de energia, a eficiência de uma planta nuclear encontra-se entre 32 e 38% e das usinas com combustível fóssil, entre 38 e 44%, sendo que existem considerações de eficiência de ciclo combinados até superior a 50% (EPE, 2007a), isto sem considerar o consumo de eletricidade da própria planta o qual pode ser entre 5 a 8%. Em todos os casos de geração, com exceção do ciclo aberto convencional, a condensação do gás para líquido é uma parte crítica da operação e prejudica a eficiência do processo. De forma geral, quanto mais eficiente o processo de conversão da energia térmica em energia elétrica menos água de resfriamento é necessária por quilowatt-hora (kWh) (CARNEY *et al.*, 2008).

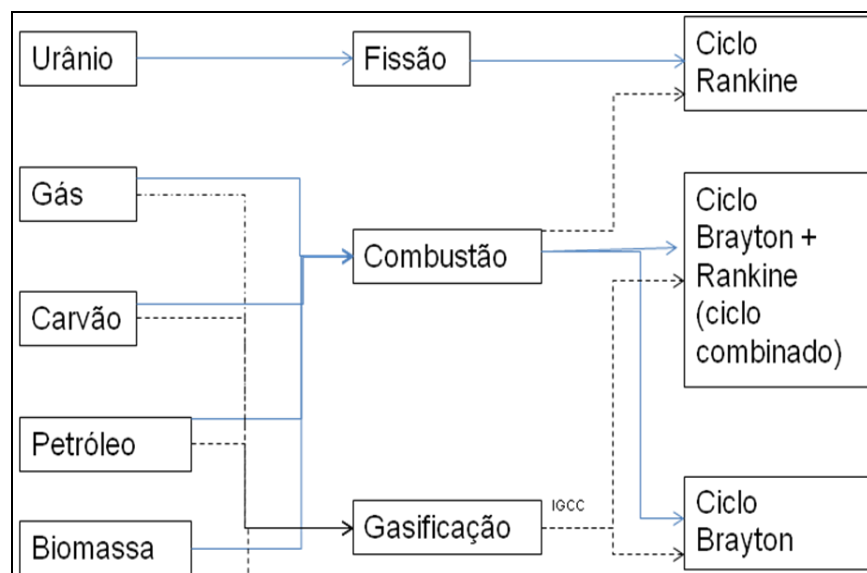


Figura II.3: Esquema da classificação de Usinas Térmicas de Ciclo *Brayton* e *Rankine*.
Elaboração própria.

³ Subcríticas: Pressão de vapor abaixo de 22,0 MPa e temperatura de cerca de 550 °C, atingindo uma eficiência de 33 a 37%. Supercrítica: Pressão de vapor de 24,3 MPa e temperatura de 565 °C, resultando em uma eficiência de geração de cerca de 38%. A eficiência é dependente da qualidade do carvão, operações e parâmetros de projeto e localização. Ultra-supercrítica: Pressão de vapor superior a 24,3 MPa e temperatura superior a 565 °C, conseguindo eficiências de até 46% (ANSOLABEHERE *et al.*, 2007).

2.2. Uso de água na termoelectricidade

A água é um recurso “renovável”, que cada vez mais se encontra limitado na qualidade e quantidade (UNESCO, 2012), uma vez que cresce o número de corpos hídricos poluídos, assim como o aumento da demanda para seus diferentes usos consuntivos (abastecimento humano, irrigação, indústria e criação de animais) e não consuntivos (navegação, turismo e lazer, pesca e preservação ambiental, etc.). E no futuro, segundo HIGHTOWER e PIERCE (2008), a disponibilidade de água doce será um importante motor econômico para o século XXI. Assim, os autores indicam que muitos governos acham que fazer um planejamento da água significa administrar as reservas de água não salgada. Porém, esse planejamento deveria ir mais além, quer dizer, analisar o uso futuro da qualidade, da disponibilidade e da eficiência de todos os recursos hídricos e assim garantir seu uso para necessidades futuras.

Segundo HIGHTOWER e PIERCE (2008), em uma perspectiva global, o setor energético é um dos maiores usuários de água. Já o Fórum Econômico Mundial indica que o setor energético retira aproximadamente 8% de água doce do mundo (WEF, 2008). As necessidades de água para geração de energia diferem dependendo da fonte de energia. O uso de água depende de características da planta, do tipo de combustível, e da região onde se encontra localizado o empreendimento (RIO CARRILLO e FREI, 2009, PAN *et al.*, 2012). A energia gerada a partir de recursos renováveis pode, também, requerer o uso de água. A hidroelectricidade retira grande quantidade de água que é devolvida a sua fonte. Porém, ocorre perda de água devido à evaporação nos reservatórios. Essa perda pode ser extremamente elevada, dependendo da região e área dos reservatórios. No entanto, a água armazenada em reservatórios de hidrelétricas serve geralmente a múltiplas finalidades. Assim, a geração hidrelétrica não é a única causa dessas perdas por evaporação (DOE, 2006).

A energia eólica e solar fotovoltaica necessitam de pouquíssima água. Porém, nos casos em que a energia solar é utilizada para termoelectricidade em sistemas CSP, onde as plantas concentram a luz solar para produzir vapor e gerar energia em um ciclo *Rankine*, há

uso de água pelo sistema de resfriamento e também no ciclo a vapor (DOE, 2006, IEA, 2008). Isto acontece igualmente para as geotérmicas (IEA, 2008).

O uso de água num processo de geração de energia termelétrica se deve principalmente às seguintes etapas:

- Geração de vapor d'água: A finalidade deste processo é a produção de vapor de água a alta temperatura para acionar as turbinas e gerar energia elétrica. Logo, o vapor passa por um processo de expansão e posterior condensação, onde finalmente é recirculado. Portanto, somente é necessária a captura de água nesta parte do sistema quando acontecem perdas durante o ciclo (*make-up*).
- Condensação do vapor d'água e resfriamento: A água utilizada no processo de condensação apresenta uma elevação na temperatura e pode ser devolvida diretamente a um corpo receptor (sistema aberto) ou pode ser tratada e reutilizada (sistema fechado). Estes sistemas serão descritos posteriormente. Segundo CARNEY *et al.* (2008), o fluxo de massa de água necessária nesse processo é aproximadamente 50 vezes o fluxo de massa do vapor d'água, uma vez que é recomendável que a água de condensação tenha um aumento de temperatura que não ultrapasse 15 °C a 25 °C. Assim, o sistema de resfriamento demanda um uso da água intensivo, água esta que pode ser captada de rios, lagos, reservatórios subterrâneos, mares, etc.
- Tratamento de emissões e material particulado: O processo de dessulfurização de gases de combustão (FGD) utiliza água de reposição para compensar perdas por evaporação no scrubber (BEDILLION, M *et al.*, apud ZHAI e RUBINA, 2011); e também devido à purga gerada durante o tratamento das emissões de enxofre (GERDES e NICHOLS, 2009). Além disso, utiliza-se água no tratamento das cinzas, como água de lavagem, na planta de tratamento de efluentes (FEELEY *et al.*, 2005) e no sistema de incêndio (PAN *et al.*, 2012).

Ainda, a introdução de tecnologias de pós-combustão para reduzir as emissões de GEE, como a Captura e Armazenamento de Carbono (*Carbon Capture and Storage* - CCS) com base na absorção química com o solvente monoetanolamina (MEA) (CIFERNO *et al.*, 2009, CHANDEL *et al.*, 2011, ZHAI *et al.*, 2011), pode representar um aumento no consumo de água de quase 100% (ZHAI *et al.*, 2011, GERDES e NICHOLS, 2009)⁴. Uma vez que o processo para captura de dióxido de carbono (CO₂) demanda água, principalmente para regenerar o solvente MEA (CHANDEL *et al.*, 2011); assim como para seus próprios sistemas de resfriamento (resfriamento do gás de exaustão, resfriamento da água de lavagem, resfriamento do absorvedor, resfriamento do *reclaimer*, resfriamento do solvente regenerado, resfriamento para a compressão do CO₂) e operação do condensador do refluxo (GERDES e NICHOLS, 2009). Além disso, essa tecnologia reduz a eficiência da usina e, para nivelar a potencia elétrica gerada, se torna necessário um aumento do *make-up* do processo de combustão e o processo de tratamento das emissões atmosféricas (CHANDEL *et al.*, 2011, ZHAI *et al.*, 2011). A Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA, 2008) indica que um terço de todas as usinas termelétricas a carvão mineral que não migrem para esse tipo de tecnologia poderia fechar antes do término da sua vida útil, tendo em vista as restrições de emissões de GEE.

Resumidamente, na Figura II.4, pode-se apreciar os diferentes usos de água para o processo termelétrico *em um ciclo Rankine*.

⁴ Ambos estudos fazem referência a usinas com um sistema de resfriamento de circulação fechado a torre úmida, a qual será explicada posteriormente.

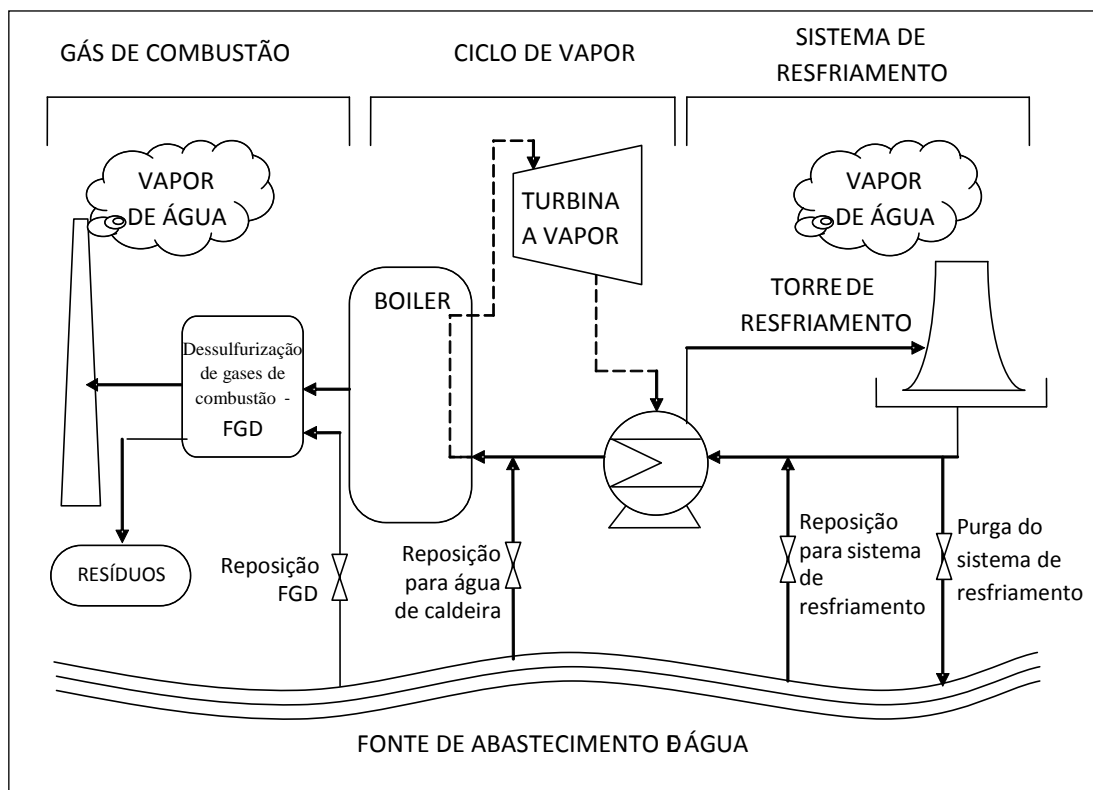


Figura II.4: Uso de água no processo termelétrico em um ciclo *Rankine*

Fonte: Adaptação de GERDES e NICHOLS (2009), traduzido do inglês

2.2.1. Sistema de Resfriamento

Durante o resfriamento, o volume de água usado depende do tipo de tecnologia adotada e a sua relação com as perdas por evaporação e/o descarte de efluentes (FEELEY *et al.*, 2005, GERDES e NICHOLS, 2009). Existem várias maneiras de classificar o sistema de resfriamento, sendo que o utilizado no presente trabalho é o sugerido por GERDES e NICHOLS (2009). Assim, os sistemas de resfriamento se dividem em dois: circulação fechada e circulação aberta (*once-trough*). No caso do sistema de circulação fechada, este pode se subdividir conforme mostra a Figura II.5.

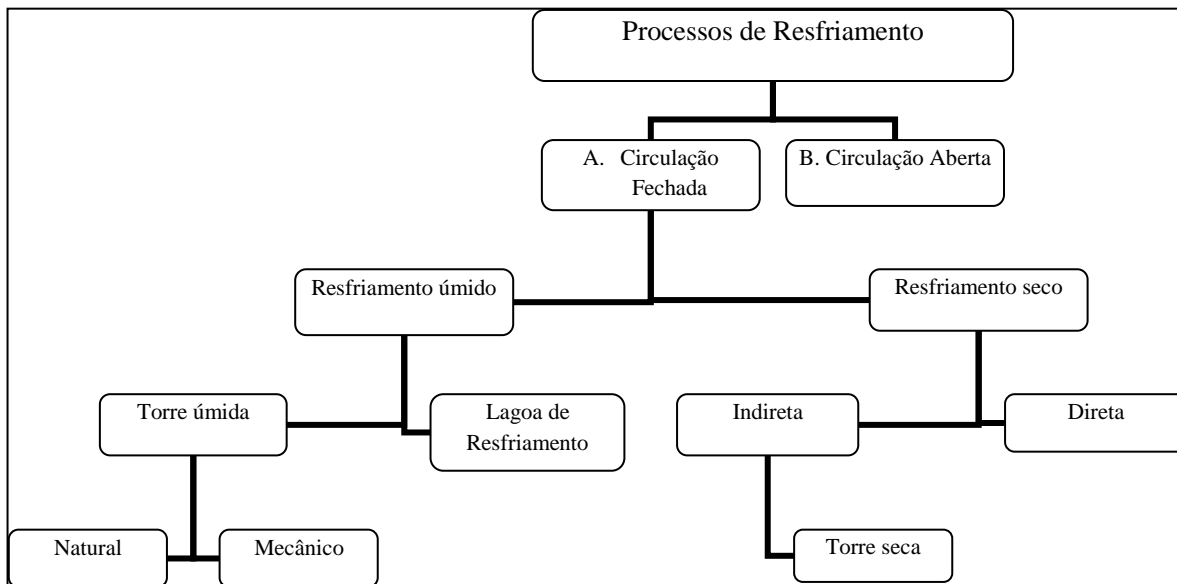


Figura II.5: Classificação dos tipos de Processos de Resfriamento

Fonte: GERDES e NICHOLS (2009), traduzido do inglês

A. Resfriamento a Circulação Fechada

Essa técnica utiliza o ar como *meio* para atingir o resfriamento da massa de água proveniente do condensador com temperaturas elevadas.

- Resfriamento de circulação fechada em torre úmida: Baseia-se no princípio da *evaporação*. A água, depois de ser utilizada no condensador, é resfriada por uma corrente ascendente de ar numa torre de resfriamento, podendo ser o ingresso do ar natural (mediante a construção de torres de elevado tamanho) ou mecânico (com uso de ventiladores) (MOHIUDDIN e KANT, 1996a, EPRI, 2002, FEELEY *et al.*, 2005). A água resfriada é recirculada no processo de condensação. Na torre úmida acontece uma transferência de calor com a atmosfera, devido ao calor latente de evaporação da água, perdendo uma quantidade de água necessária pelo sistema (MOHIUDDIN e KANT, 1996, ZHAI *et al.*, 2011). Além do mais, devido à evaporação, origina-se um aumento de concentração de minerais e sedimentos acarretando perdas de água pela purga gerada no processo, com a finalidade de

manter o desempenho do sistema de resfriamento (Figura II.6). O mesmo princípio se aplica a uma Lagoa de Resfriamento (Figura II.7).

Portanto, a água de reposição que será captada de corpos hídricos servirá para repor as perdas na evaporação e na água de purga. Sendo que a parte evaporada é considerada como a água consumida, não tendo mais retorno para sua fonte de origem. Do mesmo modo, cabe indicar que é importante a consideração da qualidade da fonte hídrica utilizada para o resfriamento, uma vez que com uma baixa qualidade, devido a concentrações elevadas de sais, minerais e sólidos suspensos, será necessária uma maior captação de água (MOHIUDDIN e KANT, 1996b, MILOSAVLJEVIC e HEIKKILÄ, 2001, AL-BASSAM e MAHESHWARI, 2011), isto com o objetivo de suprir a maior quantidade de purga gerada (GERDES e NICHOLS, 2009). Enfim, dependendo da concentração da água de purga, ela poderá ser direcionada para uma planta de tratamento e logo retornada ao corpo hídrico.

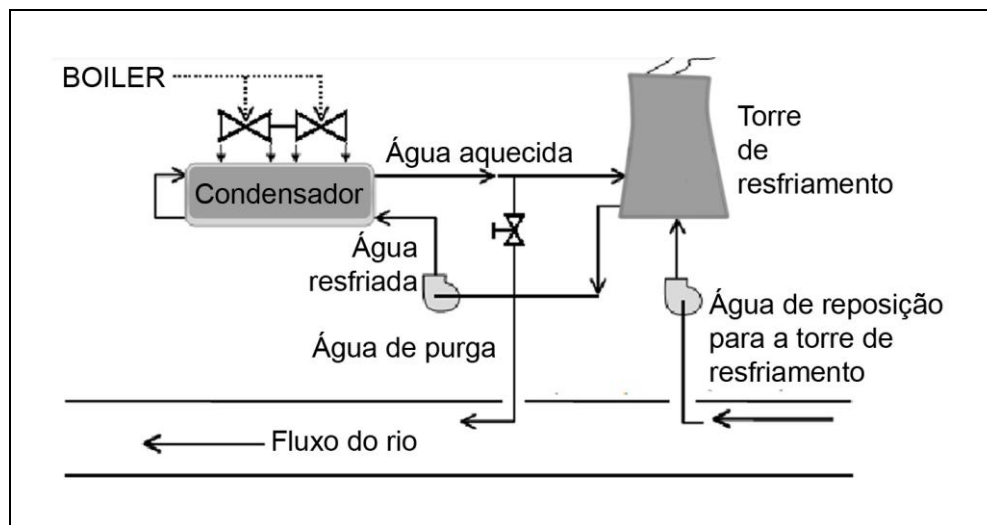


Figura II.6: Sistema de resfriamento de circulação fechada em torre úmida

Fonte: EPRI, (2002), traduzido do inglês

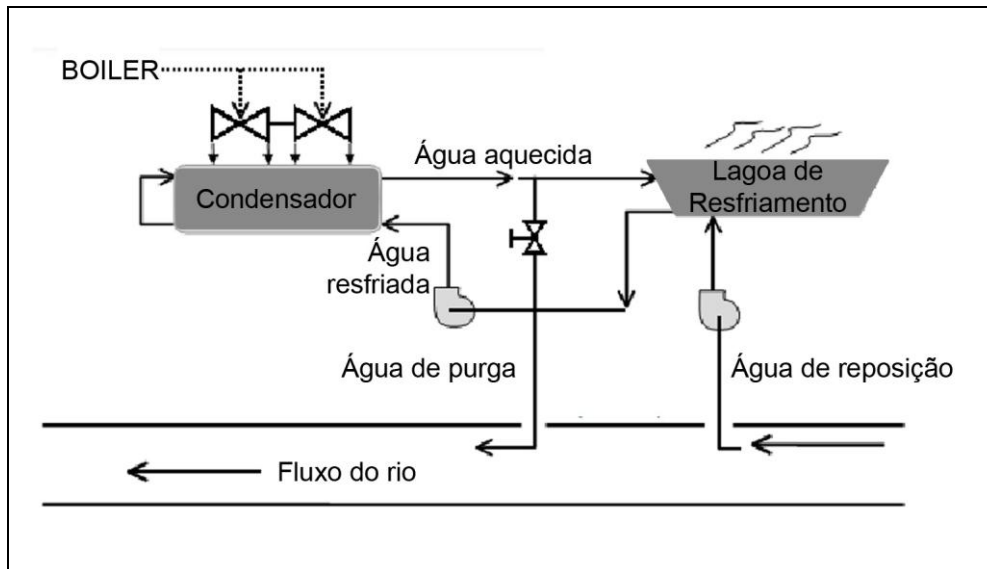


Figura II.7: Sistema de resfriamento de circulação fechada em lagoa

Fonte: EPRI (2002), traduzido do inglês

- Resfriamento de circulação fechada indireta em torre seca: Água dos condensadores não entra em contato com o ar de resfriamento diretamente, evitando assim a perda por evaporação e quantidades significativas de purga. Nesse processo a água flui através de tubos dentro da torre de resfriamento, onde é resfriada por uma corrente de ar que pode ser natural ou mecânica, produzindo uma troca de calor por condução (THERMAL POWERTEC LTD, 2011).

Este tipo de resfriamento é recomendável para regiões secas ou com pouca disponibilidade hídrica, uma vez que não precisa de quantidades elevadas de água para sua reposição. Assim, segundo ZHAI *et al.*, (2011), um sistema com resfriamento com torre seca poderia reduzir o uso da água comparado com um sistema a torre úmida em 80% e com a inclusão de uma tecnologia CCS até 40%. No entanto, este tipo de tecnologia tem elevados custos de capital, cerca de 12% do custo de capital total da planta (ZHAI e RUBINA, 2011) e baixo desempenho (FEELEY *et al.*, 2005). Um parâmetro chave de desempenho é a diferença inicial de temperatura entre o vapor de exaustão e da temperatura do ar (ambiente). Portanto, o custo é sensível a essa diferença de temperatura, que afeta fortemente o tamanho do sistema (custo de capital) (ZHAI e RUBINA, 2011). Na Figura II.8 se pode

apreciar o funcionamento de um sistema de resfriamento de circulação fechada indireta em torre seca.

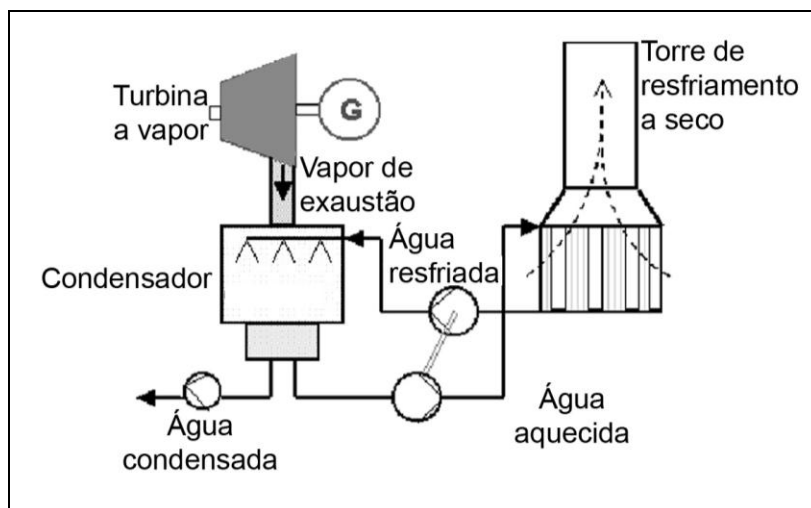


Figura II.8: Sistema de resfriamento de circulação fechada indireta em torre seca

Fonte: THERMAL POWERTEC LTD, (2011), traduzido do inglês

- Resfriamento de circulação fechada seca direta Figura II.9: O vapor d'água logo após ser utilizado pela turbina ingressa no condensador e mediante transferência de calor o vapor de processo passa pela massa de ar que flui dentro do condensador. O vapor se condensa e a água passa a ser reutilizada novamente no ciclo de vapor d'água (THERMAL POWERTEC LTD., 2011). O desempenho depende da temperatura ambiente do ar seco. Uma vez que a temperatura do ar seco é maior que a temperatura do ar úmido, esse tipo de sistema de resfriamento será menos eficiente do que uma torre úmida. Porém, mesmo sendo menos eficiente, é recomendável para regiões secas ou com pouca disponibilidade hídrica.

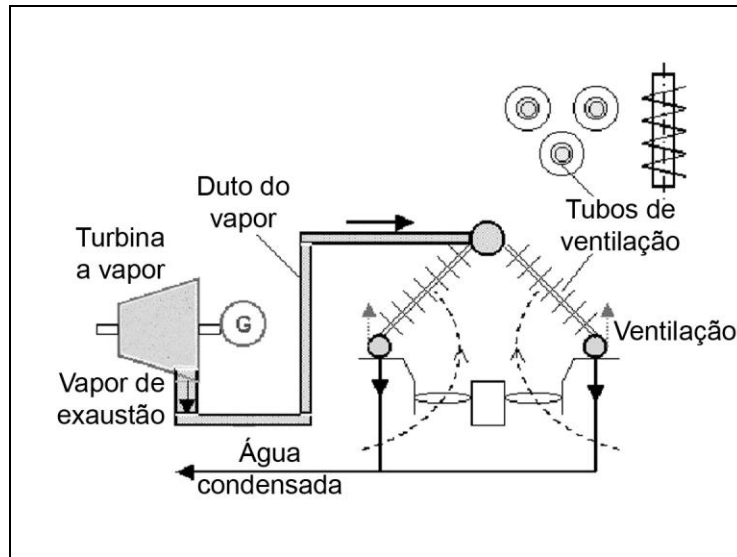


Figura II.9: Sistema de resfriamento de circulação fechada seca direta

Fonte: THERMAL POWERTEC LTD., (2011), traduzido do inglês

B. Resfriamento de circulação aberta (*once-trough*):

Neste sistema de resfriamento a água passa apenas uma vez pelo condensador. Essa água pode ser captada de diferentes fontes hídricas, como rios, lagos, mares, água subterrâneas, etc. Logo que a água cumpre a sua função de resfriamento é devolvida para o corpo de água onde foi captada inicialmente, mas com temperaturas elevadas e contendo sais e minerais gerados durante o processo (Figura II.10). Cabe indicar que nesse processo se requer uma maior quantidade de água a ser captada, mas o consumo total é menor, uma vez que ela é devolvida para os respectivos corpos de água. Já na circulação fechada, como no caso da torre úmida, o consumo de água é maior devido à evaporação produzida.

Porém, o retorno ao corpo receptor com altas temperaturas, entre 15 °C – 30°C a mais, poderia originar pequenas perdas por evaporação (1%) logo depois que a água retornar à sua fonte original, além de traços de cloro residual (EPRI, 2002). Essa evaporação indireta (devido à poluição térmica) origina um consumo de água que deveria ser atribuído às termelétricas. Mesmo sendo em pequenas quantidades, ele se torna importante devido à elevada quantidade de água requerida para este tipo de sistema de resfriamento (KOHLI e FRENKEN, 2011). Além disso, do ponto de vista ambiental, essa poluição térmica provoca

diminuição do oxigênio dissolvido (OD), o que origina uma menor autodepuração dos corpos hídricos, possível aumento na toxicidade de certas substâncias e ameaça ao nível de suporte térmico de algumas espécies (ENCALADA REYES, 1991).

Segundo FEELEY III *et al.* (2008) e GERDES e NICHOLS (2009), recentemente tem-se incorporado torres de resfriamento adicional no processo de alguns empreendimentos com o objetivo de baixar a temperatura da água de descarga quando for requerido.

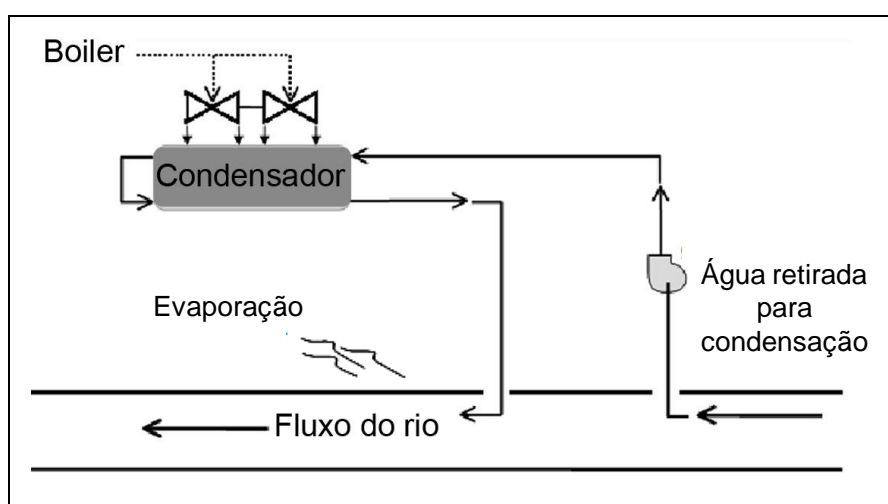


Figura II.10: Sistema de resfriamento de circulação aberta

Fonte: EPRI, (2002), traduzido do inglês

As tecnologias de resfriamento majoritariamente utilizadas são: sistema de circulação aberta e sistema fechado em torre úmida. Assim, FEELEY III *et al.* (2008) indicam que nos Estados Unidos da América sistemas de resfriamento a circulação aberta totalizam 42,7%, 41,9% circuito fechado a torre úmida, 14,5%, circuito fechado com lagoa de resfriamento e somente 0.9% corresponde a circuito fechado seco.

Segundo FEELEY *et al.* (2005) e FEELEY III *et al.* (2008), cada kWh de energia gerada necessita 94,63 l/ de água, valor considerado como a média da demanda de água de todos os tipos de resfriamento nos Estados Unidos da América (EUA). HUTSON *et al.* (2005) indicam que no ano de 2000 a maior quantidade total de água captada (doce e

salgada) nos EUA foi pelo processo termelétrico (48% da água captada)⁵, sendo que a captação de água doce se encontra em segundo lugar (39%), depois do uso para irrigação. Os autores também indicam que a água doce utilizada pelas termelétricas foi, na sua maioria, pelo processo de resfriamento aberto, lembrando que, no processo de resfriamento aberto a água é retirada e devolvida ao corpo hídrico com pequenas perdas por evaporação. Já nos EUA, em 1995, estatísticas indicaram que o consumo de água doce só compreendeu 3% do total de água retirada (FEELEY *et al.*, 2005).

Assim, pode-se entender que um sistema de resfriamento fechado com ar seco favorece a conservação do recurso hídrico, economizando 60% de água se comparado a um sistema de resfriamento fechado úmido (PAN *et al.*, 2012). Certamente, o processo de resfriamento fechado úmido é o que utiliza água em menor quantidade, mas a consome em maior volume comparado com um resfriamento de circulação aberta⁶, como se apresenta na Tabela II.1 (FEELEY *et al.*, 2005, EPRI, 2002). Porém, um resfriamento aberto custa 40% do que um a torre úmida, e inclusive uma torre seca custa de 3 a 4 vezes a mais do que uma tecnologia a torre úmida (GERDES e NICHOLS, 2009, ZHAI e RUBINA, 2011). Contudo, é necessário assegurar a alta disponibilidade quantitativa de água para sistema aberto, além de assegurar a não poluição térmica do corpo receptor, já que esse último poderia reduzir a eficiência da planta (KOCH e VÖGELE, 2009).

⁵ Seguido pelas demandas de irrigação (34%), abastecimento público (11%), industrial (5%) e as demandas de uso doméstico, aquicultura, pecuária, mineira (2%).

⁶ Um sistema fechado a torre úmida retira 97% menos do que um sistema aberto. Porém, mais do que 75% do retirado é consumido mediante a evaporação (FEELEY III *et al.*, 2008).

Tabela II.1: Diferenças no uso da água nos processos de resfriamento de circulação aberta e de torre úmida de circulação fechada.

Tipo de Sistema de Resfriamento	Média em l/kWh			
	DOE ⁷		EPRI ⁸	
	Captação total de água	Consumo total de água	Captação total de água	Consumo total de água
Circulação aberta	143	0,4	76 - 190	1
Torre úmida de circulação fechada	4,5	4,2	2,0 – 2,3	2

Fonte: Adaptação do FEELEY *et al.* (2005) e EPRI (2002).

Cabe indicar, que no estudo da EPRI (2002), o consumo de água é maior porque considera-se 1% da evaporação da água logo que ela é devolvida ao corpo receptor.

Por outro lado, FEELEY III *et al.*, (2008) avaliaram a diferença na demanda e consumo de água para diferentes sistemas de resfriamento em uma gama de cenários climáticos para 2030, tendo como ano base de referência 2005. Os resultados mostram que a retirada de água pode ser reduzida em 30%, enquanto que o consumo pode aumentar em quase 50%. Portanto, para a implantação de uma nova usina termelétrica é necessário conhecer a situação da disponibilidade hídrica da área onde se quer localizar a planta, assim como o tipo de sistema de resfriamento mais recomendável e as necessidades das outras demandas a jusante do ponto de captação em caso de corpos hídricos superficiais como os rios. Por exemplo, a China, devido à escassez de água em algumas regiões do país, tem implementado sistema de resfriamento fechado de ar seco, atingindo 4,24% da capacidade total (9120 MW de geração elétrica e 2500 MW de co- geração) (PAN *et al.*, 2012). Além disso, PAN *et al.* (2012) realizaram igualmente uma avaliação de cenários a respeito da necessidade de água no futuro de usinas a carvão mineral para 2030 tendo como ano base

⁷ Não especifica o tipo de geração termelétrica.

⁸ Dados de uma combustão com combustível fóssil/biomassa/resíduos. Não termelétrica Nuclear.

2008. Os resultados mostram que mesmo em um cenário com um aumento da capacidade instalada de usinas a carvão mineral em 83%, o uso de água poderia se reduzir em 36% (com recirculação de água tratada para o sistema de resfriamento, aumento na implementação de sistemas de resfriamento fechado com ar seco, etc.).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) se encontra no processo de desenvolvimento de uma norma ambiental (Cooling Water Intake Structures—CWA §316(b)) com o propósito de incentivar a implementação de uma melhor tecnologia de resfriamento disponível que minimize os impactos ambientais, entre elas a promoção do uso ou *retrofitting* para sistemas de resfriamento de circulação fechada (USEPA, 2011a). Do mesmo modo, alguns estados como a Califórnia, Delaware e Nova Iorque também estão desenvolvendo políticas e facilidades para que as empresas mudem para sistemas de resfriamento fechado (USEPA, 2011b). Porém, como assinala FEELEY III *et al.* (2008), a disponibilidade e uso do recurso hídrico apresentam variações regionais, o que dificulta a natureza das políticas públicas e resposta tecnológica.

Ainda, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (KOHLI e FRENKEN, 2011) e AVERYT *et al.* (2011) indicam a necessidade das agências governamentais responsáveis pelo uso da água coletar e emitir relatórios desagregados por sub-setor, mantendo a retirada de água das termelétricas separada das industriais e hidrelétricas, além de um planejamento que indique quais são os lugares onde a retirada de água seja mínima (como é o caso dos sistemas de circulação fechada), mesmo com um aumento de custos de capital.

O crescimento populacional pode aumentar a demanda de água e de energia, agravando o estresse na disponibilidade hídrica (AVERYT *et al.*, 2011). No caso das termelétricas, a introdução de nova tecnologia para reduzir as emissões de GEE (CCS) originaria um aumento na demanda de água e a criação de novos conflitos com outros usos consuntivos. Assim, precisa-se compreender a interdependência entre energia e água e com isto criar integrações na política e o planejamento de ambos. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), no ano 2005, criou um programa de pesquisa nesta área, o qual

integra os estudos sobre geração de energia e uso do recurso hídrico. Igualmente, o Fórum Econômico Mundial (WEF), no ano 2008, expressou sua preocupação sobre a escassez da água e sua interdependência com a geração de energia (UNITED NATIONS NEWS SERVICE, 2008). Assim, o WEF, em seu relatório *Thirsty Energy: Water and Energy in the 21st Century* (WEF, 2008) e AVERYT *et al.* (2011) falam sobre a importância do estudo em conjunto da energia e a água. Além disso, deixam aberta a necessidade de um aprofundamento sobre a influência das mudanças climáticas para ambos recursos.

2.2.2 Introdução de tecnologia de captura de carbono e aumento do uso de água.

Como se indicou anteriormente, como parte da tecnologia de pós-combustão para captura de dióxido de carbono, o método de absorção química com monoetanolamina (MEA) é uma das mais maduras (HOFFMANN, 2010, ROCHEDO, 2011, MERSCHMANN *et al.*, 2012), em que diversos projetos pilotos consideram a possibilidade da captura até de 90% (CIFERNO *et al.*, 2009).

Porém, a inclusão dessa tecnologia originará um aumento no consumo de água em quase 100% (ZHAI *et al.*, 2011, GERDES e NICHOLS, 2009)⁹. Na Tabela II.2, apresenta-se o consumo da água nos processos termoeletrônicos, segundo um estudo do Laboratório Tecnológico Nacional de Energia dos Estados Unidos (NETL) (GERDES e NICHOLS, 2009). Nela pode-se apreciar a diferença na quantidade de consumo de água nos diferentes sistemas de geração de energia termelétrica com e sem captura, considerando um mesmo sistema padrão de resfriamento, neste caso, circulação fechada torre úmida.

⁹ Ambos casos fazem referência a usinas com um sistema de resfriamento de circulação fechado a torre úmida, a qual será explicada posteriormente.

Tabela II.2: Consumo de água nos processos termoeletricos com sistemas de resfriamento a torre úmida.

Tipo de termelétrica	Consumo de água sem tecnologia de CCS (l/MWh)	Consumo de água com tecnologia de CCS (l/MWh)	% de aumento no consumo da água
Nuclear	2726	---	---
Carvão pulverizado subcrítico	1968	3748	342
Carvão pulverizado supercrítico	1703	3180	328
IGCC	1173	1703	171
Ciclo combinado a gás natural (NGCC)	719	1287	296

Fonte: Adaptação do GERDES e NICHOLS, 2009

As usinas nucleares não requerem de CCS, porém são os maiores consumidores de água para um sistema de resfriamento fechado a torre úmida, uma vez que toda a energia gerada provém do ciclo de vapor a baixa pressão e temperatura e, por isso, é que requer maior quantidade de vapor e de resfriamento. Além disso, pode-se observar que, uma vez que possuem uma menor eficiência, as usinas a carvão pulverizado com combustão subcrítico consomem uma maior quantidade de água por MWh de energia produzida. Isto, se deve à baixa pressão do vapor que faz que menos energia possa ser transferida da caldeira para turbina, fazendo com que seja necessário maior geração de vapor e, assim, uma maior quantidade de água para seu resfriamento. Do mesmo modo, com a adição de uma tecnologia com CCS e em sistema de resfriamento a torre úmida, o aumento de água poderia chegar até 90% do uso atual. E com uma tecnologia de supercrítica este consumo poder-se-ia reduzir em 17% (GERDES e NICHOLS, 2009). Com respeito às usinas NGCC e IGCC, elas consomem menos quantidade de água, uma vez que os dois terços da geração termelétrica proveem de turbinas a gás que requerem menos quantidade de água quando comparado a um ciclo a vapor como é o caso duma planta a PC.

2.3. Mudanças climáticas e sua influência no sistema de resfriamento e operação das usinas termelétricas.

As variáveis climáticas como temperatura, precipitação, umidade, velocidade e direção do vento, etc., são fatores importantes a se considerar na produção e distribuição da eletricidade, de forma que mudanças destas variáveis que estejam fora da faixa permitida de desenho das plantas causarão modificações no abastecimento de energia (MIDEKSA e KALLBEKKEN, 2010).

BULL *et al.* (2008), TOLMASQUIM *et al.* (2003), apud SCHAEFFER *et al.* (2008a), e BIRD (2010a) concordam que entre as variáveis climáticas que influenciam na geração da termelétricidade estão a temperatura e umidade; já BULL *et al.*, (2008) adiciona a velocidade do vento; mas a precipitação também se encontra relacionada indiretamente, uma vez que poderia intervir na quantidade de disponibilidade hídrica para o resfriamento da planta. Como discutido, o principal uso da água numa planta termelétrica é destinado ao processo de resfriamento, o qual a utiliza para condensar o vapor de água junto com o calor residual que formam parte de um ciclo de vapor *Rankine*. Segundo CARNEY *et al.* (2008), o total de água requerido em cada planta dependerá da tecnologia e capacidade de geração, o meio ambiente de impacto direto, e as condições climáticas. As últimas o autor as indica como o fator mais importante que definirá a eficiência no uso da água. LINNERUD *et al.* (2011) concorda com esses requisitos, mas adiciona a legislação ambiental local como um fator importante, principalmente para plantas com resfriamento aberto.

Uma mudança na temperatura ambiental afeta o desempenho de uma usina térmica, o qual pode influenciar na eficiência e respectiva capacidade de carga da planta (LINNERUD *et al.*, 2011). Esse impacto se dá de maneira direta (tanto em um ciclo *Brayton* como ciclo *Rankine*) e indireta (em um ciclo *Rankine*). No caso de um impacto direto no ciclo *Brayton*, quanto maior a temperatura do ar, menor será sua densidade, influenciando seu ingresso no compressor. No caso de um ciclo *Rankine*, a eficiência na geração da eletricidade pode ser impactada positiva ou negativamente dependendo do diferencial de temperatura no processo de resfriamento com a temperatura ambiente de

duas maneiras: (i) impactando diretamente no trabalho dos sistemas de resfriamento úmido, devido ao contato direto do ar com a água para resfriar; (ii) por outro lado, uma mudança da temperatura ambiental influenciará também na temperatura da fonte hídrica (impacto indireto) utilizada para o sistema de resfriamento da usina. Um alto diferencial faz com que a eficiência seja melhor e vice-versa. Por exemplo, DURMAYAZ e SOGUT (2006) demonstram que para o caso da eleição da localização de novas plantas térmicas nucleares na Turquia, o fator a considerar foi o diferencial da temperatura da fonte hídrica com a temperatura da água na saída do resfriamento, os resultados indicaram que a fonte hídrica com menor temperatura foi escolhida, uma vez que ela iria incrementar a eficiência da planta em 0,8%.

Quando um fluido (água) cumpre um ciclo termodinâmico passando por diferentes estados com valores bem definidos de temperatura e pressão, esse fluido pode transferir energia de um reservatório de calor a temperatura mais alta (T_H) para outro de temperatura mais baixa (T_C), gerando trabalho mecânico e rejeitando calor à temperatura inferior. Segundo a primeira lei da termodinâmica, o total de trabalho mecânico produzido somado ao calor rejeitado deve ser igual à energia fornecida ao fluido. Assim, a relação entre o trabalho mecânico e a energia fornecida ao fluido se define como rendimento termodinâmico do ciclo (eficiência de primeira lei). O máximo rendimento possível em um ciclo termodinâmico, entre dois valores T_C e T_H bem definidos, é chamado rendimento de Carnot, o qual exprime a máxima eficiência teórica no processo, ou seja, com a menor quantidade de energia perdida. O rendimento de Carnot (η_c) é o rendimento de um ciclo constituído por duas transformações adiabáticas e duas isotérmicas de forma alternada (WARK e RICHARDS, 2001).

$$\eta_c = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \times 100 \%$$

Eq. 1

Assim, por exemplo, se o ciclo refere-se a uma central termoelétrica qualquer em que trabalho mecânico é produzido por uma turbina a vapor (ciclo *Rankine*), T_C será a temperatura da corrente fria de água do resfriamento em graus Kelvin (°K), e T_H será

temperatura do vapor ao ingressar à turbina também em graus Kelvin (°K). Portanto, uma mudança marginal na temperatura do resfriamento fará com que varie a eficiência (LINNERUD *et al.*, 2011), da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \eta_C}{\partial T_c} = -\frac{1}{T_H} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

De fato, o ciclo de Carnot é um ciclo termodinâmico teórico. Numa aplicação tecnológica real (produção de energia numa central termelétrica), o ciclo cumprido pelo fluido, com T_C e T_H bem definidas, teria que se aproximar o melhor possível para um ciclo de Carnot e tendo seu próprio rendimento termodinâmico, que somente poderia ser menor.

O ciclo real cumprido pelo vapor será então uma variante do ciclo *Rankine*, que terá sua eficiência máxima teórica de referência no Ciclo de Carnot correspondente. O ciclo *Rankine* de vapor superaquecido pode ser representado pela relação de Temperatura – Entropia (T/S). Assim na Figura II.11 mostra-se o ciclo *Rankine* superaquecido e, da mesma maneira, Figura II.12 mostra-se o que acontece numa máquina térmica com um aumento da temperatura da água de resfriamento:

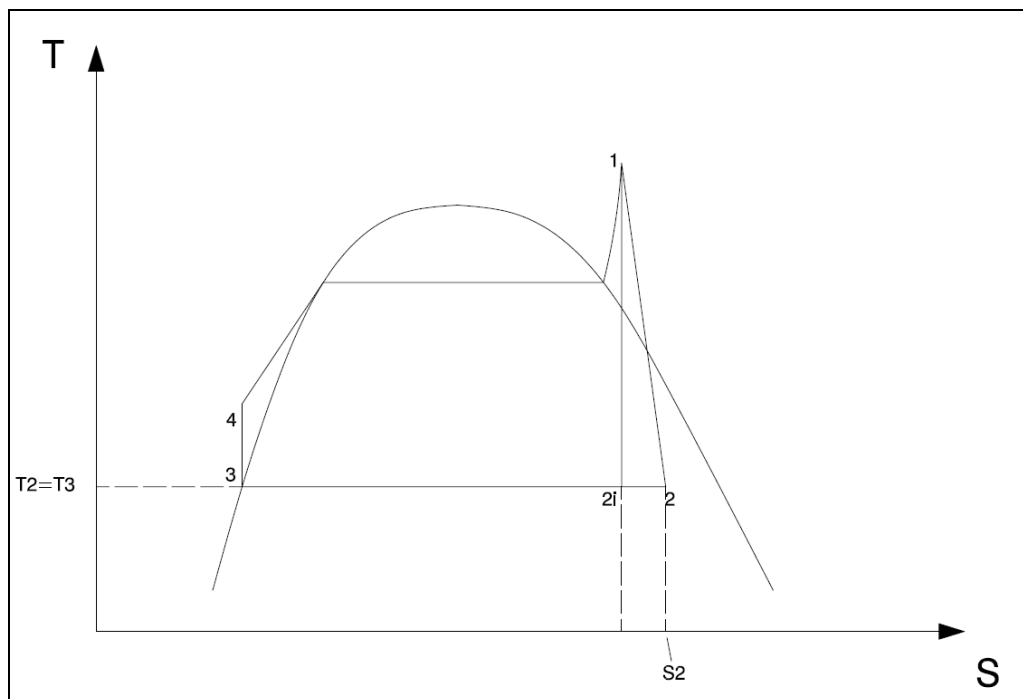


Figura II.11: Ciclo *Rankine* de vapor superaquecido representado pela relação de Temperatura – Entropia (T/S)

Na Figura II.11 a Temperatura (T) versus Entropia (S) no ciclo *Rankine* a vapor superaquecido é identificado pelo sistema 1-2-3-4:

- **4-1:** Aquecimento da água na caldeira. No ponto (1) o vapor encontra-se superaquecido pronto para seu ingresso na turbina. Processo isobárico.
- **1-2:** Expansão do vapor superaquecido na turbina para gerar trabalho mecânico. Teoricamente esta transformação é isentrópica, na qual o vapor expandido passará do estado (1) para (2i) (i=ideal). Na realidade o vapor leva a um aumento da entropia, indo até (2);
- **2-3:** Condensação do vapor expandido, o qual pode ser mediante um sistema de resfriamento aberto ou fechado. A transformação será isotérmica, no qual o vapor cederá seu calor latente de evaporação.
- **3-4:** Após a condensação, a água é bombeada para o boiler. Processo isentrópico, com um aumento na pressão da água. Além disso, produz-se um aumento de temperatura na água líquida por efeito da bomba, mas desprezível.

O trabalho mecânico cedido pelo fluido à turbina encontra-se exprimido pela área do gráfico. Sendo que um aumento na temperatura de resfriamento fará com que o sistema mude para a nova eficiência, com trabalho expresso pela área $4'-1-2'-3'$ (Figura II.12).

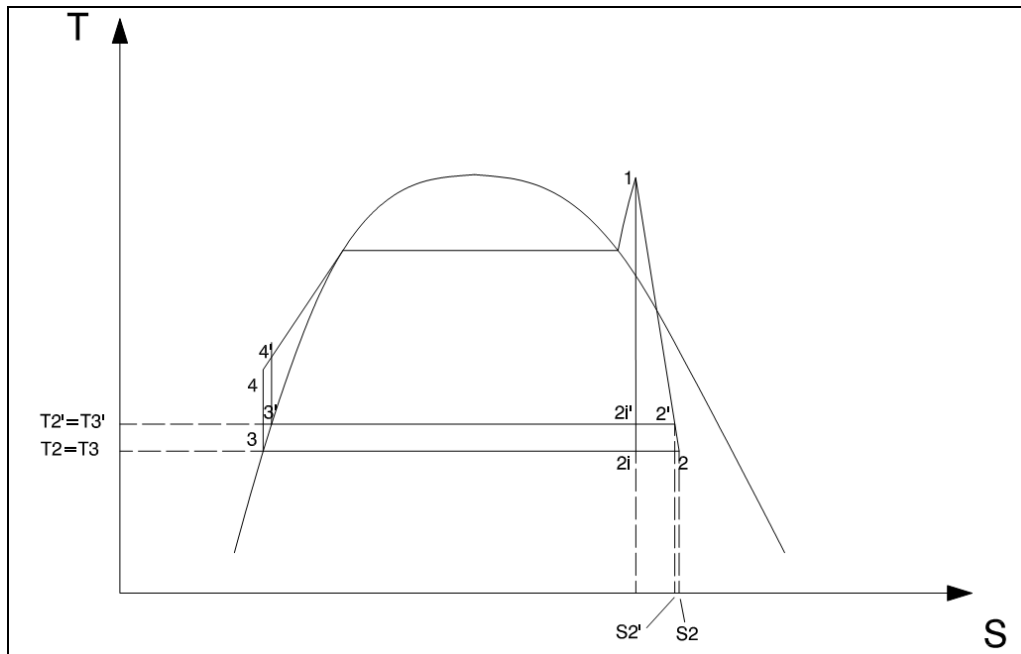


Figura II.12: Ciclo *Rankine* de vapor superaquecido representado pela relação de Temperatura – Entropia (T/S) com aumento de temperatura.

Se a temperatura de água de resfriamento aumenta devido a fatores ambientais, a temperatura do vapor de exaustão deve ser também maior, mantendo igual o diferencial entre os dois e desta maneira se garante o funcionamento do condensador. Na Figura II.12, ao mudar a temperatura de exaustão, não mudará as condições de ingresso do vapor na turbina (1), mas as condições de saída que serão identificados por um ponto (2') que se encontrará na mesma recorrida da expansão (1 - 2). Igualmente, será definido um ponto teórico (2i') à mesma temperatura (2'), a qual se encontrará na linha que define a expansão isentrópica teórica (1 - 2i); Do mesmo modo, define-se o ponto (3') como a saída da condensação. O trabalho mecânico cumprido pelo vapor no ciclo assim modificado será exprimido pela área: $1-2'-3'-4'$. A perda de trabalho mecânico será então exprimida aproximadamente por: $2'-2-3-3'$. Sendo desprezível a diferença de temperatura entre T2 e

T3 com a entropia, pode-se aproximar o cálculo da diferença de trabalho mecânico para uma área trapezoidal.

Como se indicou anteriormente é desejável que se mantenha um diferencial entre a temperatura da água de resfriamento de ingresso e saída do condensador. Já que isto poderia limitar a máxima pressão do condensador¹⁰. Assim, quando uma usina chega a seu nível máximo de pressão no condensador, ela gera energia a uma capacidade menor, reduzindo o consumo de combustível e mantendo eficiência da usina estável (LINNERUD *et al.*, 2011), mas não cumprindo com o fornecimento de energia à rede.

Da mesma forma, CHUANG e SUE (2005) estudaram melhorias na eficiência com a diminuição de 1°C (e, por tanto, queda na pressão), para uma planta de ciclo combinado de 457,6 MW de potência líquida (02 turbinas a gás, 02 geradores de vapor de recuperação de calor e 01 a turbina a vapor) e sistema de resfriamento fechado com ar seco, em Taiwan. A pesquisa conclui que a potência aumenta em 0,6% e a eficiência melhora em 0,1%. A potência de saída líquida e taxa de calor estão relacionadas com a temperatura ambiente e pressão do condensador, que é controlada, pelo número de ventiladores de funcionamento (CHUANG e SUE, 2005). Portanto, no caso de aumento de temperatura do ar, a melhor opção seria um aumento de ventiladores para realizar o controle da pressão do condensador, porém isto causaria uma penalidade para potência gerada.

Para o caso do sistema de resfriamento tipo aberto (principalmente) apresenta-se uma dificuldade a mais: os limites de temperatura estabelecidos por lei para o despejo nos corpos receptores. Os limites de temperatura de despejo podem variar dependendo do tipo de corpo receptor e do meio que depende dele (ecossistema aquático). Além disso, à medida que a temperatura do corpo receptor eleva-se (por possível efeito das mudanças

¹⁰ Sendo que a temperatura é diretamente proporcional à pressão, um aumento da temperatura da água de resfriamento no ingresso do condensador originará um aumento de pressão. A eficiência global é determinada pela temperatura mais baixa na saída da turbina de baixa pressão, que é por sua vez determinada pela pressão do condensador (sob condições de saturação), e a pressão do condensador é determinada pela temperatura da água de resfriamento (LINNERUD *et al.*, 2011).

climáticas), a água será capaz de absorver menos calor antes de exceder o limite máximo permissível para a temperatura da água de retorno. Isto é explicado pela fórmula seguinte:

$$Q = m \times dT \times c$$

Eq. 3

A potência térmica cedida (ou absorvida) por um fluido Q (Watt) é diretamente proporcional ao fluxo mássico m (kg/h) e à diferença de temperatura entre os dois extremos da corrente do fluido, dT (°K). A constante de proporcionalidade, neste caso, é o calor específico do fluido, c . Assim, o limite máximo de temperatura do efluente influencia diretamente o dT .

Assim, as usinas terão que reduzir a geração elétrica até poder se adequar aos requerimentos legais, ou adicionar um sistema de resfriamento complementar, por exemplo um sistema tipo fechado úmido, o qual seria acionado nos meses de maior temperatura da água de resfriamento; ou igualmente, poderiam aumentar o fluxo de corrente de água de ingresso ao condensador. Porém, deve-se ter em conta nos últimos dois casos, novamente, a penalidade energética originada pela adição de novos equipamentos ao processo geral e aumento de custos (capacidade de bombas maiores). Neste caso, o Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento - BIRD (2008) indica que o efluente deverá resultar em um aumento de temperatura não maior de 3°C no limite da zona onde a mistura inicial e diluição tem lugar. Sempre que a zona não esteja definida, deve-se usar 100 metros a partir do ponto de descarga quando não existem ecossistemas aquáticos sensíveis dentro desta distância; além disso, assinala que o valor deve corresponder a um monitoramento diário.

Ainda, as altas temperaturas do ar provocariam uma evaporação maior e, somados a possíveis baixas precipitações, poderia limitar a disponibilidade hídrica por eventos extremos como períodos de secas chegando a originar cortes na geração elétrica. Com referencia à equação 3, este aspecto influencia o fluxo mássico (m), uma vez que a vazão do rio decresce fazendo baixar a quantidade de calor removido para uma diferencial igual de temperatura. Assim, segundo a *International Atomic Energy Agency* – IAEA (2004), a

Europa teve uma queda na geração térmica de energia durante o verão de 2003, devido à redução de potência ou mesmo paralisação de várias usinas nucleares pela baixa disponibilidade hídrica. Igualmente, segundo GOLOMBEK *et al.* (2011), essa queda aconteceu novamente em 2006 em países como França, Espanha e Alemanha. Do mesmo modo, nos Estados Unidos, o Programa Americano de Ciências das Mudanças Climáticas (*U.S. Climate Change Science Program And the Subcommittee on Global Change Research - CCSP*) (BULL *et al.*, 2008) cita a Universidade de Missouri-Columbia reportando em 2004 reduções de potência e paradas de planta relacionadas com mudanças no nível do rio e limites térmicos de emissão. No presente ano a França esteve em alerta por aumento de temperatura em Agosto (RFI, 2012). A onda de calor fez uma queda na produção em algumas usinas nucleares, devido às altas temperaturas da água do rio; porém, o organismo responsável (EDF) indicou que o fenômeno não durou o tempo suficiente (72 horas) para causar problemas maiores (ECKERT, 2012, STETZEL, 2012). Todavia, nos EUA as temperaturas elevadas dos rios e a seca fizeram com que ao menos uma usina nuclear de 880 MW parasse de funcionar e outras usinas térmicas reduziram sua produção neste verão (EATON, 2012, LAMONICA, 2012, WEBBER, 2012). Por outro lado, o IPCC (2007), como parte do quarto relatório do Grupo II referente à Europa, coloca como um aspecto relevante as variações climáticas e os possíveis impactos na disponibilidade hídrica, para o qual cita ARNELL, *et al.* (2005). Já para o caso da América Latina, o relatório do IPCC dá maior ênfase à geração hidrelétrica e não à térmica.

Para o caso do sistema de resfriamento fechado a torre úmida com ventilação natural, a temperatura do ar não só influencia a temperatura da água que ingressa ao sistema, mas também no processo de resfriamento da mesma, uma vez que quanto mais baixa for a temperatura do ar, melhor será o resfriamento. A transferência de calor em uma torre úmida combina os mecanismos de transferência de calor sensível e de massa em um processo geral que utiliza o diferencial de entalpia como a força motriz para a transferência de calor (MOHIUDDIN e KANT, 1996a, COUTURE, 2010). Ou seja, a transferência de calor é proporcional à diferença de entalpia entre a corrente de água de resfriamento e o ar externo. No caso que a entalpia do ar externo aumenta, essa diferença é reduzida e também como consequência do diferencial de temperatura entre o ingresso e saída de água na torre.

A entalpia do ar externo é relacionada à temperatura e à umidade relativa do ar (temperatura de bulbo úmido, variável relevante para o desempenho da torre úmida (MOHIUDDIN e KANT, 1996a). Além disso, na ventilação natural a baixas velocidades de vento podem limitar a capacidade de resfriamento. Porém, altas velocidades não permitem um bom contato ar-água originando perdas de água relativamente altas (COUTURE, 2010). Também, MOHIUDDIN e KANT (1996a) sinalizam que um controle preciso da temperatura da água fria pode ser conseguido com ventilação artificial. Mas, a operação deste sistema e custo de manutenção favorece a ventilação natural. Além disso, o uso de ventiladores pode causar problemas com a geração de nebulização dentro da torre.

Por outro lado, como foi dito anteriormente, a precipitação é uma variável climática que influencia indiretamente no funcionamento do sistema de resfriamento de uma usina térmica, uma vez que guarda uma estreita relação com a disponibilidade de água, no qual o sistema de resfriamento aberto é o maior dependente. HIGHTOWER e PIERCE (2008), indicam que nos EUA a retirada de água é maior do que as precipitações em algumas áreas, originando a escassez e, além disso, essas mesmas áreas possuem a característica de concentrar a maior densidade populacional.

Assim, o uso da água gerará uma competição (*“trade-offs”*), sendo um ou vários setores afetados de acordo com as prioridades que a lei dispõe. O setor termelétrico retira água, majoritariamente, dos rios e mares para o processo do resfriamento. Portanto, uma redução do fluxo dos rios ou elevação na temperatura dos corpos hídricos fazem com que a geração se torne vulnerável. Essa vulnerabilidade, no caso da diminuição do fluxo de corrente nos rios, será agravada pela competição dos usos consuntivos, assim como da vazão ecológica para a conservação dos ecossistemas aquáticos e a qualidade da água.

As mudanças climáticas podem trazer períodos mais secos e quentes ou o contrário (IPCC, 2007). Portanto, um possível aumento da temperatura do ar devido às mudanças climáticas e, como consequência, o aumento da temperatura da água utilizada para o resfriamento faz com que o diferencial de temperatura seja menor originando uma queda na

potência líquida gerada com a mesma quantidade de combustível fóssil. (MIDEKSA, T. K e KALLBEKKEN, 2010), o que GOLOMBEK *et al.* (2011) chamam de Efeito Carnot.

Pesquisadores (DURMAYAZ e SOGUT, 2006, LINNERUD *et al.* 2009, apud MIDEKSA, T. K. e KALLBEKKEN, 2010, FÖRSTER e LILLIESTAM, 2010, e GOLOMBEK *et al.*, 2011) estudaram os impactos na geração de energia devido à mudança na temperatura da água para usinas nucleares com sistema de resfriamento aberto LINNERUD *et al.* (2011), e para um sistema fechado de torre úmida. Assim, DURMAYAZ e SOGUT (2006) indicam que com um aumento de 1°C do ar ambiente, reduz-se a potência de saída das usinas nucleares em 0.45 pontos, enquanto que FÖRSTER e LILLIESTAM (2010) indicaram uma redução de 1.6%. Da mesma forma, LINNERUD *et al.* (2011) indicam que para um sistema fechado com torre úmida, um aumento de 1°C do ar, reduz a potência de saída das usinas nucleares em 0.4%. Por outro lado, LINNERUD *et al.* 2009, apud MIDEKSA, T. K. e KALLBEKKEN (2010), realizaram a mesma pesquisa para geração térmica a gás e carvão, a qual identificou que a perda da eficiência comprometia em uma perda de potência de 0.6%. Finalmente, GOLOMBEK *et al.* (2011) identificou que a redução na eficiência das plantas térmicas no oeste europeu cairia uma média de 1.7% para combustíveis fósseis e em 2.3% para plantas nucleares no ano 2085.

No caso do Brasil, SCHAEFFER *et al.* (2008a e 2008b) realizaram um estudo de avaliação dos impactos das mudanças climáticas no setor energético com base nas projeções climáticas para os cenários A2 e B2 do IPCC realizadas pelo modelo climático global HadCM3¹¹ com o *downscaling* feito pelo modelo regional PRECIS/HadRM3. Nesses estudos, os autores consideraram uma térmica a gás natural a ciclo combinado como esquema de central de referência. SCHAEFFER *et al.* (2008b) realizaram um estudo para o país todo baseado nas usinas existentes e nas projeções de geração de eletricidade da Empresa de Pesquisa Energética do Brasil (EPE) (até 2030) e a IAEA (até 2025), utilizando o período das projeções climáticas de 2071 a 2100 em grupos de períodos de 5 anos. Já no caso de SCHAEFFER *et al.* (2008a), foi realizado um estudo utilizado as mesmas projeções

¹¹ O qual será explicado na seção 3.1.

climáticas desde o 2005 a 2035 em períodos de 5 anos e somente trabalhando com as usinas existentes no país dividido pelas 5 macrorregiões brasileiras. Os estudos mostram que ao subir a temperatura e a umidade do ar que ingressa ao compressor em um ciclo *Brayton*, antes da câmara de combustão, aumenta também o trabalho mecânico necessário para comprimir esse ar desde a pressão atmosférica local até a pressão do trabalho operacional. A perda de eficiência se pode exprimir como menor produção de energia elétrica mantendo a mesma quantidade de consumo de gás combustível ou aumentando-o e conseguir a mesma produção de geração de eletricidade. Os resultados indicaram, em todos os casos, que a perda de eficiência operacional da turbina não passa dos 2% e, portanto, mostra-se que se desejasse manter a produção de energia elétrica deve-se aumentar o consumo do combustível fóssil. Do mesmo modo, SCHAEFFER *et al.* (2008a) conclui que, com essa avaliação, a geração elétrica não renovável é menos vulnerável frente às mudanças climáticas. Essa conclusão não leva em consideração os efeitos das mudanças climáticas sobre a eficiência do ciclo *Rankine* (que forma parte do segundo processo dentro de um ciclo combinado), em particular afetando a eficiência no sistema de resfriamento.

Do mesmo modo, outro impacto importante da mudança do clima é a influência do sistema hidrológico sobre o fluxo do rio, ou de descarga. A correlação entre mudanças no escoamento e fluxo do rio e as projeções da mudança do clima é muito diferente, dependendo da área (UNFCCC, 2011). Assim, nas regiões áridas e semi-áridas, devido à pequena diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial, qualquer redução na precipitação tem sérias implicações para os rios, mesmo levando-os a secar. Se mudarem as condições climáticas e isto afetar os padrões históricos de precipitação, pode complicar ainda mais as operações de usinas existentes, e a seleção, concepção e localização de novas unidades (BULL *et al.*, 2008). O relatório do BIRD (2010) indica que, o clima vai além de impor um novo conjunto de condições relativas à concepção e localização de uma usina nova, também influenciará na operação e manutenção de infraestrutura existente e planejada, igualmente assinala que, equilibrar a disponibilidade hídrica com a demanda de vários setores será cada vez mais difícil, uma vez que a crescente demanda e as novas tecnologias podem exigir mais água nas regiões com disponibilidade reduzida. Já, FÖRSTER e LILLIESTAM (2010) e KOCH e VÖGELE (2009) indicam a preocupação da

escassez na disponibilidade hídrica para geração térmica devido às mudanças climáticas. Os autores desenvolveram um modelo para avaliar o impacto das alterações climáticas na demanda e disponibilidade de água para usinas nucleares com sistema de resfriamento a ciclo aberto. Assim, avaliaram os efeitos de diferentes estratégias de adaptação e os efeitos frente à regulamentação ambiental, por exemplo, a configuração dos limites de temperatura de emissão dos efluentes. Além da disponibilidade hídrica, FÖRSTER e LILLIESTAM (2010), adicionaram ao modelo o estudo do impacto das mudanças climáticas integrado com o aumento da temperatura para geração de uma usina nuclear na Europa Central, onde identificou-se a redução da carga média anual em 11.8%.

Portanto, para sistemas de resfriamento a ciclo aberto a vulnerabilidade se baseará na disponibilidade de grandes quantidades de água, na temperatura da água de ingresso e na regulamentação ambiental da temperatura de descarga do efluente. Nos casos de sistemas fechados úmidos, além do possível aumento da temperatura da fonte e a disponibilidade hídrica a usina deverá tomar em conta os usuários a jusante¹², uma vez que este tipo de resfriamento consome aproximadamente 75% da água retirada. Além disso, a temperatura do ar e a umidade relativa ambiente também poderiam afetar a vulnerabilidade deste tipo de resfriamento.

Por outro lado, ARNELL *et al.*(2005) indicam sua preocupação, também, na localização da infraestrutura das usinas, uma vez que a vulnerabilidade poderia aumentar ao se localizar em torno da costa, cujo propósito é o acesso à água de resfriamento do mar, e assim seriam ameaçados pela elevação do nível do mar. Da mesma forma, como parte de eventos extremos, fortes tempestades podem levar a inundações dos rios que depois pode lavar ou degradar a infraestrutura das plantas térmicas. Por tanto, os fatores climáticos serão os condicionantes na avaliação da localização de futuros empreendimentos e de propostas de adaptação para as existentes.

¹² Nos casos em que a fonte do fornecimento de água seja um rio.

III. PROPOSTAS METODOLÓGICAS PARA DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DAS TERMELÉTRICAS (CICLO RANKINE) ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.

Tendo visto a ligação existente entre energia-água-clima para o sistema termelétrico, se evidencia a influência do clima para a geração elétrica. A necessidade de água para o sistema de resfriamento torna essas tecnologias suscetíveis a alterações hidrológicas, tanto no que diz respeito à disponibilidade quanto à temperatura do ar e da água da fonte hídrica. Da mesma forma, a temperatura e umidade do ar têm efeito sobre o desempenho do sistema de resfriamento (ciclo *Rankine*). Da mesma maneira, para o caso particular das usinas a ciclo combinado, além de apresentarem vulnerabilidade no sistema de resfriamento (ciclo *Rankine*), a temperatura e umidade do ar afetam também o desempenho das turbinas a gás natural (ciclo *Brayton*) e com isto causando impactos na eficiência de operação da usina.

Dessa forma são propostas duas metodologias para a determinação de vulnerabilidades de usinas termelétricas frente às mudanças climáticas. A primeira metodologia visa determinar como uma possível mudança no clima poderia originar uma variação na disponibilidade hídrica, gerando restrições à operação de usinas. A segunda busca determinar como uma mudança na temperatura do ar afeta o desempenho do sistema de resfriamento e com isto a eficiência da geração elétrica. Ambos os casos são estudados para um ciclo *Rankine* com um sistema de resfriamento fechado com torre úmida.

Partindo do resultado de projeções climáticas de modelos climáticos globais de circulação geral acoplado Oceano-Atmosfera– AOGCM, que serão explicados na seção seguinte 3.1, propõe-se uma metodologia para traduzir variações em precipitação e temperatura em variações na vazão natural afluyente ao ponto de captação da usina termelétrica. Tem-se, assim, a necessidade da construção de um modelo hidrológico para simular as diferentes interações de vazão afluyente (oferta e demanda hídrica) antes de chegar ao ponto de captação. Propõe-se, para essa etapa, a aplicação de um programa chamado WEAP. Na proposta metodológica, por fim, avalia-se como as modificações na

disponibilidade hídrica afetam as necessidades da usina para seu sistema de resfriamento e, com isto, a geração de energia elétrica.

Além disso, usando as mesmas projeções climáticas de temperatura, também é avaliado mediante uma fórmula de desempenho de um sistema de resfriamento com torre úmida, o impacto na eficiência da usina. O procedimento é baseado na aplicação da equação de Merkel (Eq.11) e na variação da entalpia.

Assim, no presente capítulo são explicadas em detalhe as etapas mencionadas acima, partindo da modelagem climática atualmente utilizada para estudos de determinação das mudanças climáticas para, em seguida, proceder com a descrição das metodologias de disponibilidade hídrica e desempenho de um sistema de resfriamento fechado em torre úmida para operação de uma usina térmica ciclo *Rankine*. Buscou-se propor uma metodologia que, embora seja geral o suficiente para ser aplicada a estudos de sistemas termelétricos com ciclo *Rankine*, como o caso de usinas a carvão mineral, se aplique ao contexto brasileiro. Ou seja, trata-se de uma metodologia que considera: as especificidades das características do sistema termelétrico a carvão mineral do país e a limitação da base de dados disponíveis para o território nacional, principalmente no que diz respeito a dados meteorológicos.

3.1. Cenários de emissão de gases de efeito estufa e os modelos climáticos de circulação geral

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas conclui no seu Quarto Relatório de Avaliação sobre Mudanças Climáticas – AR4 (IPCC, 2007) que as projeções da temperatura média do ar da superfície global continuam em aumentos durante o Século XXI, impulsionadas principalmente pelo aumento nas concentrações antropogênicas de GEE, com o aquecimento proporcional ao forçamento radiativo. Os modelos globais do IPCC têm mostrado que entre 2090 e 2099 a temperatura global à superfície pode aquecer entre 1,1 e 6,4 °C comparado com o período de 1980-1999 (IPCC, 2007). Além disso, projeta-se um aumento na média global de vapor de água, evaporação e precipitação (IPCC,

2007). Ademais, modelos climáticos indicam que as chuvas aumentariam nas regiões tropicais, além das áreas de altas latitudes, como consequência de uma intensificação geral do ciclo hidrológico. Porém, nas regiões subtropicais a precipitação diminuiria.

Eventos extremos¹³ como secas, enchentes, ondas de calor e de frio, furacões e tempestades têm produzido enormes perdas econômicas e de vidas (MARENGO, 2007). Como exemplos podemos citar a onda de calor na Europa em 2003, furacão Catarina em março de 2004 no Brasil, os furacões Katrina, Wilma e Rita no Atlântico Norte em 2005, a seca na Amazônia em 2005, o inverno extremo da Europa e Ásia em 2006, enchentes em 2009 no Brasil. O último Relatório Especial sobre Gerenciamento de Riscos de Eventos Extremos e Desastres para Promover Adaptação à Mudança do Clima (*Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation - SREX*) do IPCC (2012), indica que mesmo sem mudanças no clima, existe um risco do aumento de desastres por causa de eventos extremos à medida que mais pessoas e ativos vulneráveis estejam expostos a esses acontecimentos. Além disso, o IPCC (2012) sinaliza que na América Latina e no Caribe nas próximas duas ou três décadas, o aumento esperado na frequência de extremos climáticos provavelmente será relativamente pequeno comparado às variações normais anuais de tais extremos. No entanto, à medida que os impactos das mudanças climáticas tornam-se mais dramáticos, seus efeitos em uma faixa de extremos climáticos tornar-se-ão ainda mais importantes, e terão um papel ainda mais significativo nos impactos dos desastres (CDKN, 2012, e IPCC, 2012). Segundo UNFCCC (2011), a mudança climática provocaria um aumento de tempestades em quase toda parte, principalmente em latitudes médias e altas; além disso, o número de dias secos entre tempestades nas regiões subtropicais e as latitudes médias mais baixas poderá aumentar.

Os cenários de emissão de gases de efeito estufa são descrições de possíveis estados do mundo futuro. O IPCC criou no relatório “*Special Report on Emissions Scenarios - SRES*” (IPCC, 2000) diferentes cenários para avaliar em um horizonte de tempo as

¹³ Parâmetro meteorológico cuja ocorrência pode ser por acima (ou abaixo) de um intervalo de valores permitido, podendo ficar no limite superior (ou inferior) do intervalo de valores observados da variável (IPCC, 2012).

emissões de GEE relevantes. Neste relatório foram criados quarenta cenários, subdivididos em quatro grandes famílias, que são utilizados como referência para modelagem climática. Em cada uma destas famílias analisa-se aspectos demográficos, econômicos e tecnológicos, considerados como forças motrizes para geração dos (IPCC, 2007). Os quatro cenários descritos no relatório mencionado são apresentados a seguir:

- **Cenário A1:** neste cenário considera-se um crescimento acelerado da população mundial, que tem um pico de crescimento que declina pela rápida introdução de tecnologias mais eficientes. Há três direções possíveis para a modificação tecnológica no sistema energético: uso intensivo de energia fóssil (A1F1), uso de fontes não fósseis (A1T) e balanceamento entre fontes (A1B).
- **Cenário A2:** neste cenário considera-se um mundo diferenciado. O objetivo é autosuficiência e preservação das identidades locais. Os índices de natalidade da população mundial passam a convergir lentamente e o crescimento da população mundial é contínuo. O desenvolvimento econômico é orientado regionalmente, o crescimento econômico per capita e a mudança tecnológica são mais fragmentadas e lentas em relação aos outros cenários.
- **Cenário B1:** aqui projeta-se um mundo submetido a uma rápida mudança nas estruturas econômicas transformando-se em uma economia de serviços e informações. A ênfase é em soluções globais para as questões econômicas, sociais e de sustentabilidade ambiental, incluindo redução das desigualdades, porém sem nenhuma política para a mitigação das Mudanças climáticas.
- **Cenário B2:** um mundo com ênfase em soluções locais para as questões sociais, econômicas e de sustentabilidade ambiental. A população mundial é crescente, porém com uma taxa inferior à do cenário A2, níveis intermediários de desenvolvimento econômico e modificação tecnológica mais lenta e diversificada em relação aos cenários A1 e B1. Este cenário também é orientado para a proteção ambiental e igualdade social, no entanto, é focado em soluções locais e regionais.

O SRES foi elaborado para a edição do Terceiro Relatório de Avaliação (TAR) sobre Mudanças Climáticas do IPCC (2001) e do AR4 sobre Mudanças Climáticas do IPCC (2007). O TAR e o AR4 substituíram os cenários que foram utilizados no segundo relatório de avaliação do IPCC, cenários IS92 (1996). Os gráficos apresentados na Figura III.1, apresentam a evolução dos GEE nos diferentes cenários de mudanças climáticas considerando todas as fontes (energia, indústria e uso do solo) de 1990 a 2100. As faixas coloridas mostram a evolução da concentração de CO₂ nos diferentes cenários de mudanças climáticas do IPCC.

As forças que impulsionam cada cenário influenciam na geração das emissões de CO₂, mas também de outros GEE. No entanto, o relacionamento dessas forças com outros GEE são, em geral, mais complexas, apresentam menos estudos a respeito e para sua avaliação os modelos utilizados para sua análise são menos sofisticados levando à maior incerteza de sua predição (IPCC, 2000).

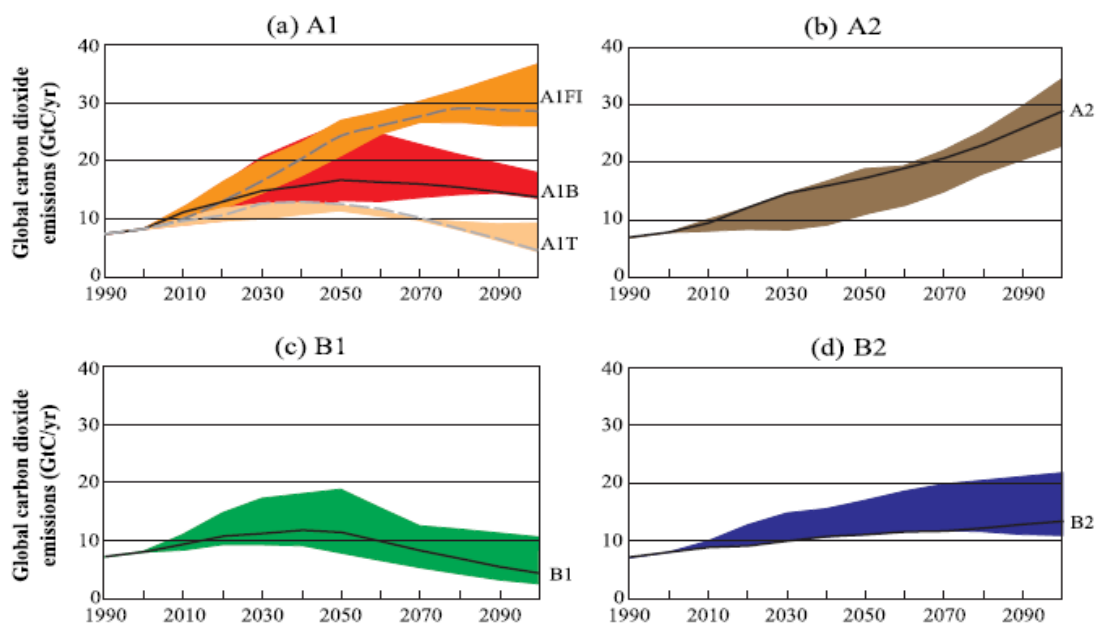


Figura III.1: Evolução da concentração de CO₂ nos diferentes cenários de mudanças climáticas do IPCC. Fonte: IPCC (2000)

Um AOGCM é um modelo de circulação geral acoplado Oceano-Atmosfera. É o instrumento mais confiável para simular séries temporais de variáveis climáticas no mundo, frente a diferentes níveis de concentração de GEE na atmosfera (GHOSH e MUJUMDAR, 2008). Este modelo numérico consiste em uma representação tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos e dinâmicos, assim como as interações entre as componentes do sistema climático e os mecanismos de retro-alimentação entre os processos físicos (MARENGO, 2007). Portanto, baseiam-se em leis físicas fundamentais, que são submetidas a aproximações físicas adequadas para a escala global do sistema climático e também através de discretização matemática; porém têm-se limitações computacionais que restringem a obtenção de modelos com uma melhor resolução (IPCC 2001 e 2007).

Os modelos climáticos têm sido utilizados para reproduzir características observadas do clima recente e as mudanças climáticas do passado (IPCC, 2007). Avanços na modelagem de mudanças climáticas permitem melhores estimativas e prováveis faixas de incerteza avaliadas para o aquecimento projetado para diferentes cenários de emissões (IPCC, 2007). É assim que no AR4 foram apresentados vinte e três modelos climáticos.

Uma das causas da incerteza com respeito ao clima está relacionada à construção dos cenários de emissão dos GEE e aerossóis¹⁴, assim como à sensibilidade dos AOGCMs, e suas projeções, uma vez que a representação topográfica e o processamento climático nesses sistemas são imperfeitos e, como foi dito anteriormente, com limitações computacionais (MARENGO, 2007, MINVILLE *et al.*, 2008).

Os AOGCMs produzem diferentes estimativas do clima futuro e magnitude do aquecimento. Cada modelo climático simula um clima global e regional com algumas diferenças nas variáveis climáticas como temperatura do ar, chuva, nebulosidade e circulação atmosférica (MARENGO, 2007). Já HAWKINS *et al.* (2012) indicam que os AOGCMs mostram uma ampla variação de temperaturas para um mesmo local observado

¹⁴ Emissões futuras, atividades vulcânica e solar que afetam a forçamento radiativo do sistema climático.

(podendo ter um diferencial de até 6 °C). Esse local pode ser representado a partir de observações que variam espacialmente em uma mesma grade, mesmo se todos os AOGCMs produzirem uma mudança de temperatura no mesmo futuro¹⁵, o valor absoluto dessas temperaturas será muito diferente.

O tamanho do grid dos AOGCMs é muito maior do que o requerido para modelos hidrológicos ou agrícolas, sendo necessário algum tipo de *downscaling* do território (GHOSH e MUJUMDAR, 2008, MINVILLE *et al.*, 2008, UNFCCC, 2011, BERG *et al.* 2012, HAWKINS *et al.*, 2012, e TEUTSCHBEIN e SEIBERT, 2012). Existem dois tipos principais de *downscaling*, o dinâmico e o estatístico. O *downscaling* dinâmico transfere a informação em larga escala do AOGCM (300km a 400km) para escalas de resolução maiores (25km a 50km), o que faz mais possível seu uso nas áreas de captação dos modelos hidrológicos (TEUTSCHBEIN e SEIBERT, 2012). O *downscaling* dinâmico é feito através de um novo modelo climático regional (RCM – *Regional Climate Model*). No *downscaling* estatístico a informação no nível regional é uma variável dependente condicionada à informação do AOGCM (variável independente) através de funções determinísticas ou estocásticas estimadas empiricamente a partir de observações históricas (KUNDZEWICZ *et al.*, 2007). Essa mesma metodologia de *downscaling* estatístico pode ser utilizada também para RCMs, mas considerando-a como fatores de ajuste, uma vez que mesmo RCMs contando com uma escala espacial maior possui desvios sendo necessária a aplicação desses fatores de ajuste das projeções climáticas (BERG *et al.*, 2012, e TEUTSCHBEIN e SEIBERT, 2012).

3.1.1. Métodos de correção de modelos climáticos

Como foi dito anteriormente, a informação de um AOGCM cobre uma área maior que a cobertura de uma informação meteorológica disponível, sendo necessária uma resolução espacial mais detalhada para trabalhar com modelos hidrológicos (BERG *et al.* 2012, HAWKINS *et al.*, 2012, TEUTSCHBEIN e SEIBERT, 2012). Além disso, os AOGCMs são representações imperfeitas da realidade e por isso acontecem discrepâncias

¹⁵ Por exemplo uma mudança na temperatura como resposta do forçamento radiativo (como GEE).

entre a simulação dos modelos e os valores reais observados (HAWKINS *et al.*, 2012), criando incerteza no clima futuro projetado. Com isto, é preciso aplicar métodos de correção para os resultados dos modelos climáticos. Estes métodos de correção foram desenvolvidos para corrigir dados dos RCMs ou realizar um tipo de *downscaling* estatístico simples dos AOGCMs (TEUTSCHBEIN e SEIBERT, 2012).

Para realizar esse ajuste são utilizados principalmente dois métodos (HO *et al.*, 2012): o “*bias correction*” e o “*change factor*”, Figura III.2. Estas metodologias têm a vantagem de serem independentes da forma de distribuição dos dados climáticos, além de realizar o *downscaling* das projeções à escala espacial das informações observadas disponíveis. Isto favorece quando se tem várias estações de valores observados dentro de uma mesma grade do AOGCM (HAWKINS *et al.*, 2012).

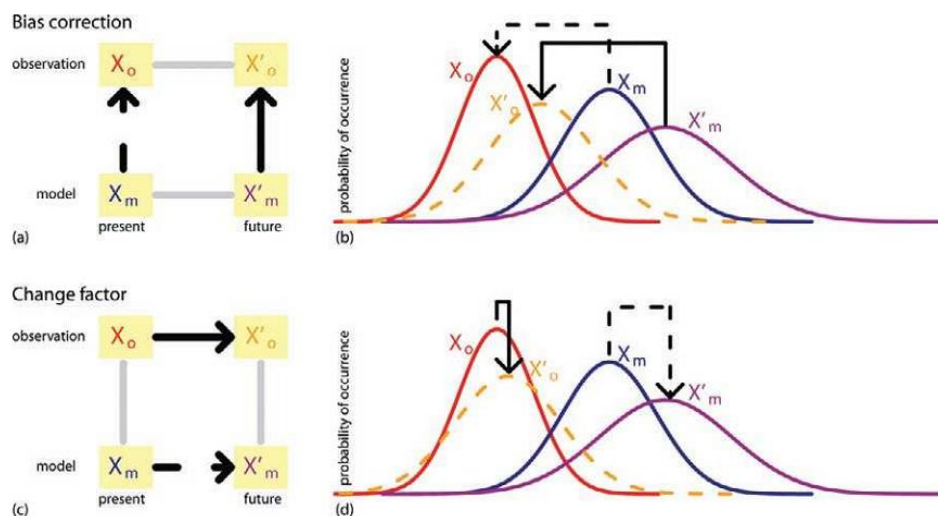


Figura III.2: Esquema dos métodos de correção das projeções dos modelos climáticos e sua função de densidade probabilística.

Fonte: HO *et al.*, 2012.

O método *bias correction* (Eq.4 e Eq.5) assume que as defasagens da projeção do modelo climático permanecem constantes no tempo. Por exemplo, a relação entre a distribuição do valor histórico observável e o valor do *baseline* é a mesma que a relação do valor da projeção futura corrigida com o valor da projeção futura sem corrigir. Isso

possibilita que as previsões futuras observáveis possam ser obtidas mediante as projeções futuras simuladas (HO *et al.*, 2012).

$$T_{corr}^{m,a} = T_{proj}^{m,a} + (\bar{T}_{obs}^m - \bar{T}_{baseline}^m) \quad \text{Eq. 4}$$

$T_{corr}^{m,a}$: Temperatura corrigida da projeção do mês “m” e ano “a”

$T_{proj}^{m,a}$: Temperatura projetada do mensal mês “m” e ano “a”

\bar{T}_{obs}^m : Temperatura media do mês “m” do período de valores observados

$\bar{T}_{baseline}^m$: Temperatura media do mês “m” do *baseline*

$$P_{corr}^{m,a} = P_{proj}^{m,a} * \frac{\bar{P}_{obs}^m}{\bar{P}_{baseline}^m} \quad \text{Eq. 5}$$

$P_{corr}^{m,a}$: Precipitação corrigida da projeção do mês “m” e ano “a”

$P_{proj}^{m,a}$: Precipitação projetada do mensal mês “m” e ano “a”

\bar{P}_{obs}^m : Precipitação media do mês “m” do período de valores observados

$\bar{P}_{baseline}^m$: Precipitação media Temperatura media do mês “m” do *baseline*

TEUTSCHBEIN e SEIBERT (2012) indicam que o dimensionamento do *bias correction* possui maior consistência na variabilidade dos AOGCMs. Porém, todos os eventos são corrigidos com o mesmo fator de ajuste mensal.

O método *change factor* (Eq.6 e Eq.7) assume que a mudança na distribuição do valor observado do presente para o futuro será a mesma com relação à mudança da distribuição do valor simulado do *baseline* para projeção futura simulada. Isto permite que as previsões futuras possam ser obtidas em função dos dados históricos observados (MINVILLE *et al.* 2008, HO *et al.*, 2012)

$$T_{corr}^{m,a} = T_{obs}^{m,h} + (\bar{T}_{proj}^m - \bar{T}_{baseline}^m) \quad \text{Eq. 6}$$

$T_{corr}^{m,a}$: Temperatura corrigida da projeção do mês “m” e ano “a”

$T_{obs}^{m,h}$: Temperatura observada do mês “m” e ano do período histórico “h”

\bar{T}_{proj}^m : Temperatura media do mês “m” do período projetado

$\bar{T}_{baseline}^m$: Temperatura media do mês “m” do *baseline*

$$P_{corr}^{m,a} = P_{obs}^{m,h} * \frac{\bar{P}_{proj}^m}{\bar{P}_{baseline}^m} \quad \text{Eq. 7}$$

$P_{corr}^{m,a}$: Precipitação corrigida da projeção do mês “m” e ano “a”

$P_{obs}^{m,h}$: Precipitação observada do mês “m” e ano do período histórico “h”

\bar{P}_{proj}^m : Precipitação media do mês “m” do período projetado

$\bar{P}_{baseline}^m$: Precipitação media do mês “m” do *baseline*

A vantagem deste método é que só requer de informações de AOGCMs mensais, e com essa informação consegue-se aplicar para escala diária (necessária para modelagem hidrológica) (MINVILLE *et al.*, 2008). Além disso, os autores indicam que os outros métodos estatísticos precisam de dados de AOGCMs na escala de tempo diária e isto pode ser considerado menos preciso. A limitação deste método é que a série temporal de clima futuro corrigido terá uma variabilidade constante para cada mês tanto para ocorrência de precipitação (em %) como temperatura (diferencial) (MINVILLE *et al.* 2008, PIANI *et al.* 2010, BERG *et al.* 2012). Em algumas aplicações, pode ser mais importante avaliar as mudanças na variância das variáveis climáticas futuras e não só nas médias (MINVILLE *et al.*, 2008). Por outro lado, assinala-se que um período de curto tempo para o cenário de referência afeta a simulação dos modelos climáticos (especialmente quando são AOGCMs), uma vez que as oscilações naturais do clima podem não estar em sincronia com o registro

de observação utilizado (BERG *et al.*, 2012). Isso pode afetar, não apenas a média, mas também outros momentos da distribuição.

HO *et al.* (2012) aplicaram os métodos de calibragem para uma mesma projeção de temperatura na Europa (*baseline*: 1970-1999; projeção: 2070-2099) e identificaram que cada método de ajuste leva a um padrão espacial de aquecimento diferente. Porém, não se pode definir que estratégia dá resultados mais plausíveis para usos aplicados (HAWKINS *et al.*, 2012).

Portanto, o fato de haver diferentes metodologias para o ajuste do modelo faz com que a incerteza aumente. Já, DIAZ-NIETO e WILBY, (2005) e HO *et al.* (2012) sinalizam a necessidade de maior pesquisa estatística sobre metodologias para calibragem de modelos climáticos; sugerindo mais complexas técnicas estatísticas de *downscaling* para pesquisa de mudanças na sequência temporal e dos acontecimentos diários. É por isso que é importante identificar, além do tipo de modelo climático e o tipo de cenário, o método de ajuste adotado nos diferentes estudos sobre impacto das mudanças climáticas para um determinado setor.

3.2. Proposta de modelagem para determinação da disponibilidade hídrica de uma usina termelétrica frente às mudanças climáticas.

Existem diferentes tipos de modelos hidrológicos para determinar sua alteração frente às mudanças climáticas. Assim (LUCENA (2010) indica que eles podem ser divididos em modelos físicos, modelos conceituais e modelos estatísticos. Os modelos físicos têm seus parâmetros baseados em medições reais, destarte, com uma grande demanda por dados. Porém, isto dificulta sua aplicação a bacias hidrográficas de grande porte ou com problemas de acesso e coleta de informações. Por outro lado, os modelos conceituais são baseados em relações físicas do ciclo hidrológico, com seus parâmetros sendo calibrados ao invés de medidos, identificando, através de diferentes técnicas, uma combinação de parâmetros que gere um comportamento do modelo simulado consistente com dados observados ou com a experiência histórica (BRYANT e WESTERLING, 2009,

apud (LUCENA, 2010). Por último, modelos estatísticos são baseados em relações empíricas entre as variáveis climáticas, como os modelos de regressão múltipla, onde vazão é estimada como função de variáveis climáticas como chuva e temperatura, mas sem explicitar diretamente as relações físicas por trás do mecanismo através do qual as variáveis climáticas influenciam a vazão de uma bacia hidrográfica. Para maiores detalhes vide (LUCENA, 2010).

O modelo hidrológico proposto no presente estudo baseia-se em um modelo conceptual, o qual simula o balanço hídrico entre oferta e demanda de um sistema hidrológico determinado que é calibrado com base em informação real observada. Em seguida, esse modelo é usado para simular as diferentes variações frente às mudanças climáticas nesse sistema.

O *Water Evaluation and Planning System* é uma ferramenta criada pela *Stockholm Environment Institute* dos Estados Unidos, a qual é a mesma instituição que também tem desenvolvido o software LEAP (*The Long Range Energy Alternatives Planning*), programa que ajuda a fornecer um apoio integrado e confiável para o desenvolvimento de estudos de planejamento energético integrado (SEI, 2012a). WEAP opera sobre princípio básico de um balanço hídrico. Com ele pode-se simular a demanda setorial, a conservação da água, os direitos de água e as prioridades de alocação, o fluxo superficial e recarga de águas subterrâneas a partir da precipitação, as operações dos reservatórios, a disponibilidade para geração de energia hidrelétrica, demandas de energia, controle de poluição de qualidade da água, a avaliação das vulnerabilidades e características dos ecossistemas aquáticos e as análises financeiras de custo-benefício de projetos. Por fim, essa ferramenta ajuda a desenvolver estratégias de gerenciamento preventivo do uso múltiplo da água em diversos cenários, através do princípio básico de balanço hídrico. Para maiores informações sobre o modelo WEAP, vide SEI (2001, 2012b).

O WEAP pode ser utilizado para o desenvolvimento de diferentes estratégias no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. WEAP inclui rotinas destinadas a distribuir água entre os diferentes tipos de usuários e ecossistemas. Ele pode ser utilizado

para estimar mudanças no abastecimento de água (mudanças projetadas na precipitação) e demanda de água (mudanças na evaporação de culturas agrícolas), que produzem diferentes balanços hídricos em uma determinada região hidrográfica (SEI, 2009). É assim que esta ferramenta tem sido utilizada por projetos de avaliação da disponibilidade hídrica para agricultura e os futuros impactos devido às mudanças climáticas (ROSENZWEIG *et al.*, 2004), assim como na modelagem de novas propostas de planejamento integrado com energia, uso da terra e clima (*Climate Land Use, Energy and Water* – CLEW) interagindo com modelos setoriais para cada área mencionada (BAZILIAN *et al.*, 2011).

As principais características do WEAP segundo (SEI, 2009) são apresentadas a seguir:

A. Estrutura de Planejamento Integrado e Abrangente

WEAP pode avaliar um problema específico de uso da água em um contexto mais amplo. O modelo procura a integração entre a demanda e a oferta, entre a quantidade e a qualidade da água e entre objetivos de desenvolvimento econômico e as restrições ambientais.

B. Análise de cenários.

WEAP se baseia no ajuste de um ano base e em um cenário de referência (*business-as-usual*), cuja informação ou base de dados corresponde a dados históricos observados para uma área em estudo. No modelo, pode-se também desenvolver cenários futuros alternativos baseados em políticas públicas, desenvolvimento tecnológico, crescimento populacional, mudanças nos padrões de desenvolvimento econômico, alterações nas regras de operação de reservatórios, mudanças na exploração das águas subterrâneas, introdução de requisitos de conservação da água e subsistência dos ecossistemas, adicionalidade de novas fontes de poluição hídrica ou aumento de concentração devido a um aumento de fontes emissoras, efficientização das técnicas de irrigação, mudanças na composição de culturas agrícolas, etc.

Para efeito do presente projeto serão construídos cenários referentes à possível alteração da disponibilidade hídrica no futuro devido às mudanças climáticas segundo AOGCMs¹⁶.

C. Gestão da demanda da água

A demanda por água pode ser derivada de um conjunto de usos finais em diferentes setores econômicos. Por exemplo, no setor agrícola o uso da água depende das diferentes culturas agrícolas, das áreas específicas e técnicas de irrigação. No setor urbano, o uso pode ser organizado a partir de definições políticas, como municípios, estados, etc. No setor industrial, o consumo varia por tipo de processo produtivo. Comparando a modelagem da disponibilidade hídrica com as diferentes demandas pode-se ajudar a evitar conflitos futuros do uso da água e com isto auxiliar o planejamento e a gestão de recursos hídricos.

Esta abordagem coloca objetivos de desenvolvimento e permite uma avaliação do efeito da implementação de novas ou melhoradas tecnologias sobre esses usos, assim como os efeitos sobre as variações dos preços sobre a quantidade de água demandada. Além disso, permite priorizar a alocação de água entre demandas particulares ou de fontes que podem ser especificadas pelo usuário.

D. Diagnóstico dos efeitos ambientais nos corpos receptores

O WEAP pode identificar, com base nos diferentes usos da água e na emissão de efluentes nos corpos receptores, os impactos devido à concentração dos poluentes sobre a qualidade da água e a capacidade de suporte dos ecossistemas aquáticos.

E. Facilidade de utilização

Um dos pontos fortes do WEAP é que ele é adaptável aos dados disponíveis. Ou seja, ele pode ser usado para uma base de dados diária, semanal, mensal ou anual. A escala de tempo para caracterizar o sistema de abastecimento de água e de demandas é flexível o que significa que o modelo pode ser aplicado a várias escalas espaciais e temporais, sendo uma boa ferramenta para ser utilizada na análise de um conjunto diversificado de questões de

¹⁶ Descritos na seção 3.1

gestão de água para comunidades pequenas ou de bacias hidrográficas. Além disso, o WEAP permite aos usuários desenvolver seu próprio conjunto de variáveis e equações para refinar e/ou se adaptar a restrições e condições locais.

3.2.1. Descrição dos diferentes componentes na utilização do WEAP

A. Climatologia e Hidrologia da área estudada

WEAP baseia-se na lógica que a oferta hídrica é dependente da quantidade de precipitação e de água subterrânea na área de estudo (bacia hidrográfica) e de outros parâmetros climatológicos. É assim que, a primeira “demanda” que deverá ser atendida refere-se à evapotranspiração natural da bacia, a qual dependerá das diferentes características climatológicas e de superfície. Portanto, o restante servirá para atender as diversas demandas dos diferentes usuários.

B. Demanda

O WEAP incorpora dentro da sua análise a definição das demandas e as prioridades de atendimento entre elas, por exemplo, em uma cidade uma prioridade 1 poderá corresponder ao abastecimento humano e agricultura e uma prioridade 2 ao consumo de uma atividade industrial. É possível que várias atividades tenham uma mesma prioridade. Por exemplo, no Brasil, a Lei n 9433 (08 de janeiro de 1997), indica como parte dos fundamentos da Política Nacional dos Recursos Hídricos, em situações de escassez, o uso prioritário é o consumo humano e a dessedentação de animais.

C. Restrições de vazão mínima e máxima

As restrições do fluxo de vazões estão dirigidas a uma vazão mínima necessária em um ponto de um corpo hídrico (rio) ou o desvio de água para atender e conservar ecossistemas aquáticos, além de garantir a navegação, recreação, ou outros requisitos localizados a jusante. A vazão máxima está orientada principalmente para o controle de efluentes de reservatórios que podem alterar o fluxo normal do rio a jusante. Estas restrições são de

maior utilidade para tempos de secas assim como de inundações e enchentes respectivamente.

3.2.2. Aplicação do WEAP na metodologia do trabalho

Para fins da metodologia proposta neste trabalho para avaliar a vulnerabilidade dos possíveis impactos de efeitos climáticos sobre a operação de usinas termelétricas no Brasil, o WEAP é aplicado na análise do balanço hídrico e posterior disponibilidade quantitativa de água no ponto de captação de uma usina termelétrica. Essa análise é feita mediante uma integração do processo físico hidrológico (ciclo da água) com a gestão atual das diversas demandas e usuários de cada unidade hidrográfica em estudo (áreas de captação), permitindo realizar múltiplas simulações para diversas situações climáticas a partir de projeções de modelos climáticos.

Como primeira fase para o desenvolvimento da pesquisa, centraliza-se na determinação espacial e temporal do modelo com o propósito de realizar sua calibragem e verificar se os resultados da simulação são equivalentes aos observados pelas estações de monitoramento de vazões. Adicionalmente, se identificam as diferentes variáveis climatológicas (precipitação, temperatura, umidade e velocidade do vento) e demandas, desde o tipo e uso do solo como os outros usuários da água. Para esta finalidade é utilizada um Sistema de Informação Geográfica (SIG), o qual ajuda a realizar as respectivas delimitações, assim como a interpretação do tipo de topografia, distribuição hidrológica, localização dos usuários e diferenciação das coberturas vegetais em cada caso.

Como segunda fase, após a respectiva calibragem, tem-se a identificação dos dados de temperatura e precipitação projetados para cada cenário de cada AOGCM dentro da grade da área de estudo. O estudo se limita a estas duas variáveis, pois são as forças motrizes atmosféricas de maior impacto nos modelos hidrológicos. Essas projeções são ingressadas no WEAP para conseguir obter os resultados dos diferentes cenários de mudança no clima. Para esta finalidade, é usado o software denominado FERRET da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2011), o qual é um programa

de visualização de um conjunto de dados em grade e de análise do ambiente oceanográfico e meteorológico. Para maiores informações sobre o *FERRET*, vide HANKIN *et al.* (1995).

Assim, no fluxograma a seguir (Figura III.3) resumem-se os passos da abordagem metodológica proposta:

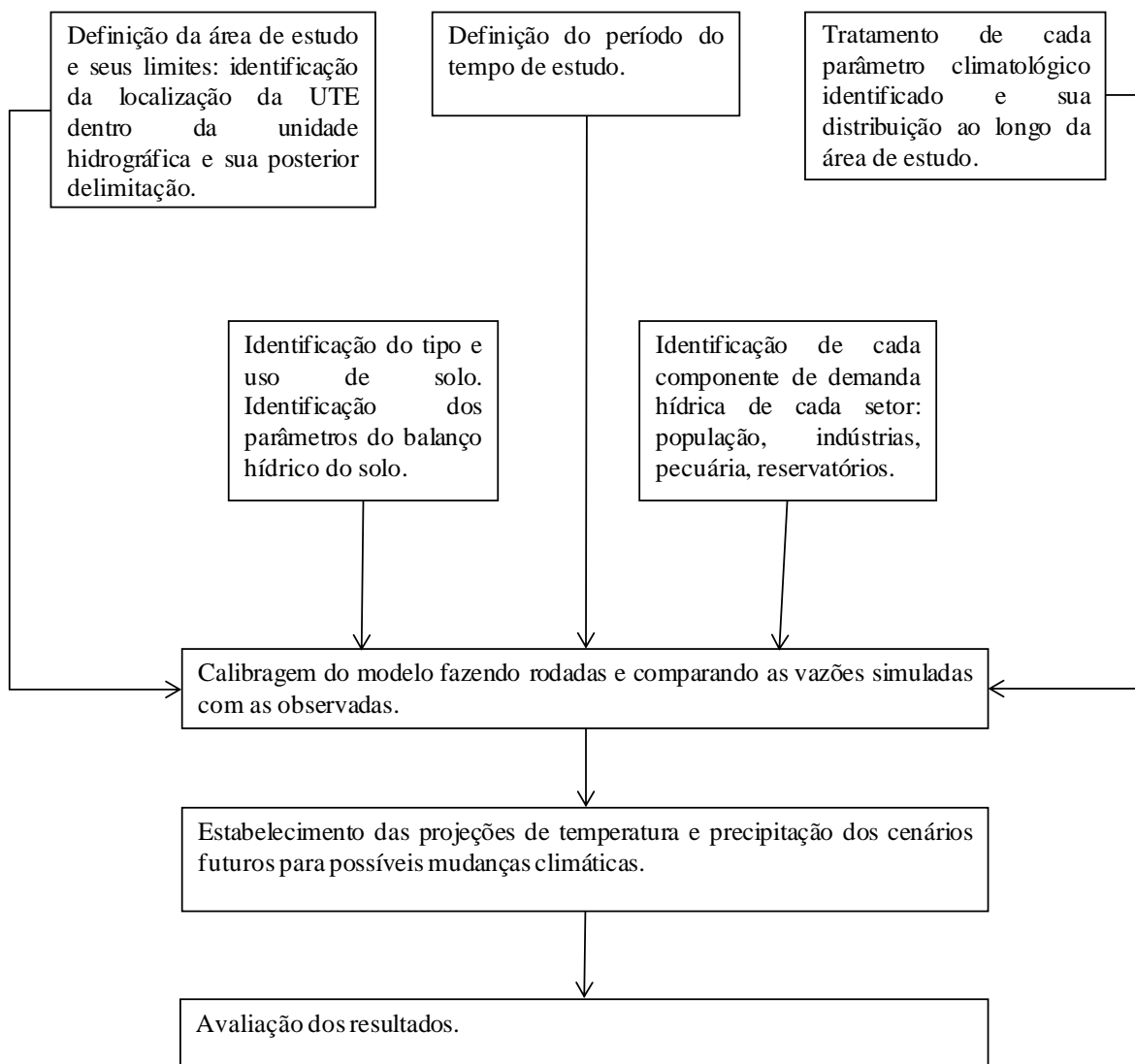


Figura III.3: Fluxograma do desenvolvimento da aplicação do WEAP para determinação da disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas para uma usina termelétrica.

Fonte: Adaptação de SEI (2001).

O WEAP possui três tipos de métodos para se desenvolver o balanço hídrico: O *FAO Crop Requirements (Irrigation Demands Only Method e Rainfall Runoff Method)*, *The Soil Moisture (Rainfall Runoff Method)* e *MABIA Method*. O método proposto é o *Soil Moisture*, que modela o balanço hídrico considerando as diferentes ofertas e demandas de água. Esse método requer informação de parâmetros do solo e de variáveis climáticas. O modelo estuda os 02 compartimentos do solo (camada superficial e camada profunda) para o cálculo de evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento sub-superficial (isto é, interfluxo), e percolação profunda para uma determinada bacia hidrográfica ou área de captação (Figura III.4). A percolação profunda dentro da área de captação pode ser transmitida para um corpo de água de superfície ou diretamente para o armazenamento de águas subterrâneas se a ligação adequada é feita entre um nó de captação e um nó de águas subterrâneas (SEI, 2001).

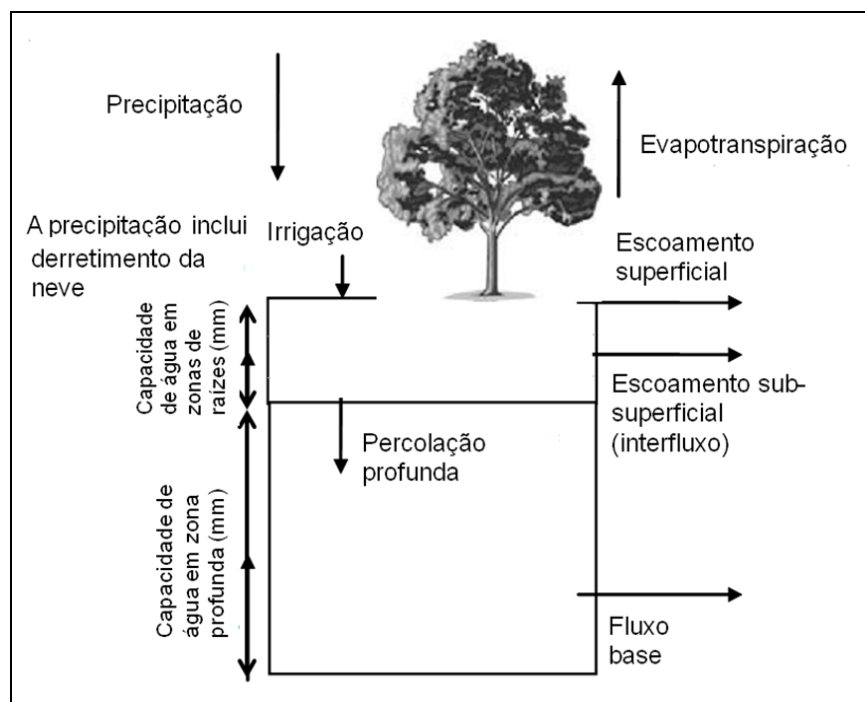


Figura III.4:Esquemática da capacidade da umidade das duas camadas do solo, mostrando as diferentes entradas e saídas hidrológicas para uma cobertura do solo ou tipo de cultura agrícola.

Fonte: Adaptação do YATES *et al.*, 2005

Cabe assinalar que, na aplicação desta metodologia, a disponibilidade hídrica superficial para uma usina termelétrica frente às mudanças climáticas, não será considerada ligação com as águas subterrâneas, além que o estudo se foque na disponibilidade quantitativa, mas não qualitativa.

O método *Soil Moisture* baseia-se na evapotranspiração potencial, que as plantas fornecem de água à atmosfera. A fonte desta água são as reservas de umidade do solo acessadas pelas raízes das plantas. A redução na umidade do solo pode limitar a evapotranspiração das plantas até o ponto em que murcham e morrem. Aqui é onde as alterações potenciais na precipitação (fonte de recarga da umidade do solo) são importantes (UNFCCC, 2011). Seguindo o ciclo da água (sem considerar a superfície oceânica), a precipitação cai e em seguida divide-se entre a percolação e o escoamento superficial, ou leva à acumulação de neve e gelo. O escoamento superficial pode, eventualmente, juntar-se à água que flui nos rios e córregos e coleta em lagos e pântanos. Água infiltrada pode tornar-se a umidade do solo que transpira ou se infiltra abaixo das zonas de raízes de plantas, ou eventualmente, tornar-se parte das águas subterrâneas armazenadas em aquíferos (NASA, 2012). É assim que alterações climáticas poderiam afetar o processo de evapotranspiração e com isto diretamente os recursos hídricos¹⁷.

3.2.3. Definição da área de estudo

Para poder rodar o modelo WEAP, é necessário definir a escala espacial e temporal do caso em estudo. Assim, para a definição espacial da área onde se encontra a UTE se realiza um pré-processamento das informações que alimentarão o modelo. Como primeira fase, é delimitada a região hidrográfica e sua respectiva bacia onde se localiza a UTE. Essa atividade tem a finalidade de identificar nelas a topografia, hidrologia, cobertura e tipo de uso do solo e os diferentes usuários que competem, junto com a termelétrica, pela demanda por água. Portanto, um SIG é de muita utilidade para poder trabalhar dados geográficos e sua representação espacial no formato digital.

¹⁷ Controles climáticos sobre evapotranspiração incluem temperatura (correlação positiva), umidade relativa (negativamente) e velocidade do vento (positivamente) (UNFCCC, 2011).

SIGs são sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também por meio de sua localização espacial. Para que isto seja possível, a geometria e os atributos dos dados num SIG devem estar georreferenciados, isso é, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica (CÂMARA *et al.*, 2001).

O programa de SIG empregado no presente trabalho é o ArcGis Desktop 9.3 junto com o auxiliar ArcHydro 1.2, ambos gerenciados pela *Enviromental Systems Research Institute* (ESRI). O componente principal do ArcGis Desktop é o ArcMap, um software que realiza mapeamentos digitais fazendo associações dos dados geográficos com modelos em diferentes escalas. O ArcHydro é uma ferramenta acoplada ao ArcMap para desenvolver diferentes aplicativos relacionados à hidrologia, entre eles a definição de uma bacia hidrográfica. O desenvolvimento e uso destas ferramentas é realizada com ajuda do Manual ArcHydro disponibilizado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (FAN e COLLISCHONN, 2009), no contexto do Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico¹⁸. Cabe indicar que o WEAP trabalha dentro de uma plataforma de sistema de coordenadas geográficas com *Datum*¹⁹ *World Geodetic System 1984* (WGS84), pelo que todo dado vetorial (shape) ou matricial (raster) trabalhado no ArcMap deverá usar este tipo de sistema de coordenadas.

Assim, a informação utilizada para a delimitação das bacias é dada pelo Modelo Digital de Elevação (MDE), o qual é uma representação artificial de 80% do relevo da Terra, obtido pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da NASA. O SRTM consiste em um sistema de radar especialmente modificado para gerar a mais completa base de dados topográficos digitais de alta-resolução da Terra até o ano de 2003, obtida a uma escala próxima à global (FAN e COLLISCHONN, 2009). Os dados obtidos têm uma resolução de arco de 3 segundos (resolução de pixel de 90 metros), sendo que a NASA os

¹⁸ http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/ClimaRH/software/MGB_principal_Ing.htm

¹⁹ DATUM: Elemento de referência em cartografia (linha, plano, etc.) que permite dimensionar o elipsoide e posicioná-lo relativamente ao Geoide (PESTANA, 2008).

disponibilizou por quadriculas de 5graus x 5graus com o sistema de coordenadas geográficas de *Datum* WGS84. Os MDEs foram previamente corrigidos por diferentes instituições, devido a certas imperfeições de vazios nas imagens. Uma das instituições que fizeram este trabalho foi o CGIAR *Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI, 2004)²⁰, instituição sugerida pelo Manual do ArcHydro. Após que os MDEs são acondicionados no SIG, são utilizadas as informações georeferenciadas referentes à limitação das bacias dentro de cada região hidrográfica e a rede hidrográfica.

Posteriormente, tendo sido delimitadas as bacias e a rede hidrográfica, se identificam os pontos de interesse hidrológicos (conhecido no WEAP como *poor points*), onde se deseja conhecer o valor da vazão num momento determinado durante o período analisado pelo modelo. Entre eles estão as estações de monitoramento fluviométricos, pontos de confluência dos rios, reservatórios existentes e em projeção, ou algum ponto de captação de interesse como é caso deste estudo (o ponto onde é captada a água para consumo da UTE). Logo que eles são definidos, são superpostos com as bandas de elevação do MDE, e assim o ArcMap cria pequenas áreas denominadas áreas de captação (conhecido no WEAP como *catchments*). Cada área de captação é considerada como a unidade hidrológica de estudo no modelo, e é representada em áreas distribuídas em porcentagens de cobertura vegetal; além disso, se considera que dentro de cada área de captação as condições climáticas são homogêneas (ESCOBAR *et al.*, 2008).

Um ponto que merece reflexão é a resolução e escala geográfica dos mapas a serem trabalhados, que está relacionada aos objetivos que se deseja alcançar e a quantidade de informações. Essas informações muitas vezes são de caráter público e podem ser acessadas eletronicamente a partir de diferentes páginas do Governo. Porém, sendo uma informação pública, as escalas são apresentadas em um contexto geral (escalas desde 1/250 000 a 1/1 000 000) e não detalhadamente (escala maior a 1/50.000). Além disso, deve-se considerar que todo dado geográfico tem erro, uma vez que ele vem de uma medição de um objeto ou

²⁰ <http://srtm.csi.cgiar.org/>

fenômeno no mundo real, e esta medição é feita com instrumentos ou métodos de precisão finita (LABGIS, 2011).

Após definida a área de captação em cada caso, realiza-se a definição temporal, mediante a determinação dos pontos de monitoramento climatológicos (precipitação, temperatura, umidade, velocidade do vento) os quais serão comparados com os dados fluviométricos.

3.2.4. Informação Climatológica e Fluviométrica

A existência, processamento e validação da informação climatológica e fluviométrica é essencial para determinar o período de estudo e calibragem do modelo. É importante que o período de precipitação, vazão e temperatura seja o mesmo para cada estudo de caso. Os dados de precipitação e temperatura devem ser suficientemente detalhados para que as séries de tempo representem a área de captação toda. (ESCOBAR *et al.*, 2008). O Método *Soil Moisture* solicita que o modelo seja alimentado com uma informação de distribuição mensal. Cabe indicar que, o Método MABIA aceita também uma introdução de informação diária, porém frente à dificuldade da disponibilidade de informação o trabalho pode ser feito em períodos mensais.

Uma vez obtida a base de dados de cada parâmetro, se realiza a definição temporal do estudo com o objetivo de calibrar o modelo em um período de tempo determinado. Consegue-se a calibragem tendo num mesmo período de tempo informações sobre a precipitação, temperatura e vazão. Para isto é necessário avaliar e tratar a disponibilidade de informação (séries contínuas) de cada estação localizada dentro do escopo do estudo. Muitas vezes a disponibilidade e qualidade da informação meteorológica é ineficiente. Já (BIRD, 2010a) indica que escassez de dados históricos encontra-se, majoritariamente, em países em desenvolvimento e por motivos diferentes, entre elas: não existência de estações meteorológicas, a informação foi perdida, os registros ainda se registram em papel mas não em formato digital, várias estações não alcançam os padrões da Organização Mundial de Meteorologia (WMO). Além disso, as políticas de acesso a dados específicos dos serviços

nacionais meteorológicos têm-se centrado tradicionalmente em fornecer previsões do tempo para o público gratuitamente, mas não dados históricos. Por outro lado, melhorias na disponibilidade de dados podem ser notadas nas redes na Colômbia e no Brasil e o México está melhorando suas redes dos serviços nacionais de meteorologia (BIRD, 2010a). Já algumas pesquisas sobre previsões de mudanças climáticas na América Latina tiveram dificuldades (LUCENA, 2010, NASCIMENTO, 2011). Assim, têm-se organizações internacionais como o *National Climatic Data Center* (NCDC) dos Estados Unidos que fornecem informações meteorológicas de diferentes estações no mundo; no caso do Brasil, Agência Nacional de Águas (ANA) fornece dados históricos, principalmente pluviométricos e fluviométricos.

A. Precipitação.

Tal como foi indicado anteriormente, os dados de precipitação podem ser obtidos mediante o site da ANA (ANA, 2011a). O que faz a diferença de uma estação para a outra é a qualidade da série histórica mensal existente. Por esse motivo, têm-se séries de dados cuja estação não registra informação ou fez um registro errado (podendo ser, por exemplo, devido à falta de calibragem do instrumento de medição). Portanto, é necessário um trabalho para preencher as lacunas de informação para que possa ser feita a análise hidrológica.

Existem múltiplos métodos para preencher os dados faltantes de uma série histórica. O adotado pelo presente trabalho é o Método das Médias Ponderadas, sugerido por vários autores como PINTO *et al.* (1973), RAJ E SINGH, (2009). O método consiste na suposição de que a precipitação da estação dos dados faltantes é proporcional às precipitações nas estações vizinhas num mesmo período, e suas médias.

Representação matemática:

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\left(P_1 \frac{N_x}{N_1} \right) + \left(P_2 \frac{N_x}{N_2} \right) + \dots \left(P_n \frac{N_x}{N_n} \right) \right]$$

Eq. 8

P_x : Precipitação (dado faltante) da estação “x” em determinado mês.

n: Número de estações pluviométricas com dados de registros contínuos perto da estação “x”. Neste caso foram consideradas 2 ou 3 estações índices (vizinhas), dependendo da disponibilidade da informação.

N: Precipitação média anual do período do tempo determinado da série histórica determinada.

$N_1... N_n$: Precipitação média anual das estações índices (1 ao n), no período de tempo da mesma série histórica.

$P_1... P_n$: Precipitação mensal das estações índices (1 ao n) no mesmo mês do dado faltante (P_x).

Para fazer a comprovação da eficácia no uso do método das médias ponderadas, utiliza-se um registro completo de dados observados, considerando um dos dados existentes como se fossem os faltantes, para logo aplicar o método e obter resultados cuja margem de erro se encontre dentro de um nível aceitável, como $\pm 10\%$. (HERRERA, 2009).

Além disso, deve-se determinar a distribuição das chuvas em toda área de estudo e com ela caracterizar um valor representativo para cada área de captação. Essa determinação é possível mediante a geração de isoietas (linhas que unem pontos de igual precipitação). Nesse caso as isoietas do presente trabalho serão desenhadas com os totais médios anuais das séries temporais consideradas em cada área de captação através da elaboração dos mapas correspondentes no ArcMap.

Obtidas as isoietas, identifica-se o valor mais representativo de cada área de captação, para logo ser comparada com o valor de precipitação da estação base escolhida, igualmente por cada área de captação. Finalmente, aplica-se um fator de correção (mediante a relação de ambos valores); o qual será utilizado para corrigir as séries históricas das estações pluviométricas base.

B. Temperatura, Umidade Relativa e Velocidade do Vento.

Para o caso da temperatura, o processamento de dados da estação de monitoramento é semelhante ao procedimento para a precipitação. Deve-se revisar a disponibilidade e qualidade dos dados históricos observados e que coincida com o período de disponibilidade de precipitação e vazão. No caso de pouca informação meteorológica e devido à distribuição espacial e temporal da temperatura, é considerado suficiente realizar uma extrapolação por altitude da informação da temperatura a partir de um grupo representativo de estações dentro da bacia. A gradiente de temperatura com a altura é estimado considerando os valores temperatura média para estações localizadas em elevações diferentes. Com um grupo de estações com dados completos localizados em diferentes altitudes se estabelece uma relação e com isso um gradiente de temperatura e, subsequentemente, pode-se usar a informação de duas estações de base dos dados completos junto com a gradiente de temperatura para calcular a temperatura representativa em cada área de captação (SEI, 2009). Para os casos da não existência de dados para desenvolver o gradiente de temperatura, pode-se considerar a relação equivalente de 6°C por cada 1000 m ($0.006^{\circ}\text{C}/\text{m}$) (SEI, 2009, INDIA e BONILLO, 2010).

Em caso de pouca disponibilidade de informação sobre a umidade relativa e velocidade do vento, essas podem ser generalizadas através de uma série de tempo anual para representar a bacia toda.

3.2.5. Cobertura vegetal e uso do solo

Para o estudo da cobertura vegetal e uso do solo é necessário obter informação digitalizada e georreferenciada dos diferentes tipos de cobertura. No caso do Brasil, os dados sobre cobertura vegetal e uso do solo podem ser obtidos em formato digital (em SIG) disponível na EMBRAPA, cujo ano do mapeamento se refere ao ano 2000 (EMBRAPA, 2005). O mapeamento foi desenvolvido no âmbito do programa *Global Land Cover 2000 - GLC 2000*, junto com a ajuda do sensor *Vegetation* do satélite *Spot IV*. A Embrapa gerou diversos mosaicos de imagens de satélite para a totalidade do território brasileiro ao longo do ano 2000, para depois de realizar diversas comparações com informação existente

(como da FAO, IBGE, Projeto RADAM Brasil, etc.), chegar à consolidação dos resultados com a compatibilização do mapeamento da cartografia da vegetação da América do Sul desenvolvido pela Comissão Europeia (EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE, 2002). Cabe indicar que o *Datum* com que a EMBRAPA trabalha é *South America Datum* 1969 (SAD69), que antes da sua utilização deve ser convertido para o *Datum* WGS84.

De acordo com a informação da cobertura e uso do solo em SIG, se determinam os diferentes tipos em cada área de captação. O guia do WEAP sugere analisar o número de categorias de cobertura original e reduzi-lo, com a finalidade de diminuir o esforço na rodada do modelo para a calibragem.

No caso que se determinam áreas de agricultura em cada área de captação, é importante identificar o tipo de cultura, a área que lhe corresponde a cada área de captação (em hectares), assim como, os diferentes parâmetros agronômicos do solo, os quais serão descritos posteriormente. Para poder determinar as áreas das diferentes culturas para cada área de captação, se identificam a área de cada cultura em uma unidade disponível, neste caso municípios. No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) disponibiliza um banco de dados (Dados Agregados SIDRA) que contém informações das áreas de cultura plantada por ano e por município, Estado e país (dependerá do ano a pesquisar). Posteriormente, se procede a trabalhar no ArcMap com uma superposição das camadas correspondentes à cobertura vegetal, divisão política dos Estados e municípios²¹, e as áreas de captação propriamente. Assim, consegue-se relacionar a área (em hectares e em porcentagem) de cada cultura que pertence a cada área de captação.

De maneira preliminar incorporam-se os parâmetros agronômicos a utilizar no balanço hidrológico do solo no WEAP, estes parâmetros foram apresentados na Figura III.4. Esses parâmetros podem ser obtidos de estudos ou modelagens que tenham sido feitos anteriormente para condições hidrológicas e/ou climatológicas similares (SEI, 2009).

²¹ No caso do Brasil, o mapa digital georreferenciado dos municípios pode ser obtido no site do IBGE, (2011); também, tem-se alguns Estados que disponibilizam esta informação.

Esses valores iniciais se modificam posteriormente no processo de calibragem do modelo. Um dos parâmetros principais do modelo hidrológico do solo é o coeficiente de cultura (K_c). O K_c é um coeficiente empírico, adimensional, que relaciona os componentes do sistema solo-planta-atmosfera, distinguindo as culturas e seus diferentes estágios de desenvolvimento (HELFER, 2006). Ele relaciona a evapotranspiração potencial da cultura com a evapotranspiração de referência. A evapotranspiração aumenta com o transcurso do desenvolvimento da cultura (HELFER, 2006). Os demais parâmetros agronomicos correspondem à capacidade hídrica do perfil superior (mm), capacidade de retenção da umidade no perfil profundo (mm), fator de resistência ao escoamento (RRF), condutividade no perfil superior (mm/mês), condutividade no perfil profundo (mm/mês), direção do fluxo, nível de umidade do perfil superficial - Z1 (%), nível de umidade em zona profunda - Z2 (%).

O WEAP tem a faculdade de considerar os cultivos ou zonas úmidas que precisam que os solos estejam inundados em um período de tempo. No caso de culturas como o arroz, esta ferramenta é necessária para a determinação dos meses em que a água ficará estacionada.

3.2.6. Outras demandas hídricas

As outras demandas hídricas referem-se às não relacionadas à cobertura vegetal e à agricultura. É assim que os outros usos consuntivos a considerar são o abastecimento humano, criação de animal (dessedentação) e industrial.

A determinação da demanda para abastecimento humano e industrial pode-se realizar identificando os pontos de captação mediante as informações sobre as outorgas pelo organismo regulador de água da bacia em estudo. Outra alternativa para a demanda para abastecimento humano, que ajuda também para determinação da demanda de dessedentação animal, é identificar a quantidade de população/cabeça de cada rebanho em cada área de captação no ano base e seu respectivo crescimento anual durante o período do cenário de referência. Assim, com ajuda do ArcMap, realiza-se a superposição das camadas

de municípios com as áreas de captação com a finalidade de determinar a porcentagem da área de cada município dentro de cada área de captação. Logo, com dados do Banco de Dados Agregados SIDRA do IBGE, analisa-se a população/produção de cabeça por animal de cada rebanho e se quantifica por município/área de captação por ano para cada caso.

Além disso, é necessário identificar a demanda hídrica por uso consuntivo no período de um ano, assim como o respectivo consumo efetivo em porcentagem. No WEAP é possível diferenciar o consumo por cada período mensal, uma vez que o consumo no verão pode ser maior do que no inverno.

3.2.7. Infraestrutura física como regulador de vazão à jusante.

Deve-se identificar a infraestrutura física, como barragens ou reservatórios, que possam regular a vazão a jusante dos rios das áreas de estudo. Entre a informação mínima requerida no WEAP está o ano em que o reservatório/barragem entrou em operação (já que pode não coincidir com o ano base do modelo), a capacidade de armazenagem e se possui algum tipo de restrição de vazão máxima e/ou mínima efluente ao rio.

3.2.8. Alocação de prioridades

WEAP permite alocar prioridades de cada demanda hídrica. As altas prioridades serão reconhecidas pelo menor número (começando pelo número 1), com o objetivo de obter água em primeiro lugar, seguidas pelas prioridades mais baixas (números mais altos). Este sistema é útil em períodos de escassez para assegurar que as mais altas prioridades sejam satisfeitas (SEI, 2001).

3.2.9. Calibragem do modelo

A calibragem procura fazer com que o conjunto de parâmetros hidrológicos introduzidos no modelo (e logo simulados) consiga recriar, tanto quanto possível, os fluxos que aconteceram no período do ano base e cenário de referência. É assim que se realizam

comparações entre as vazões históricas observadas (monitoradas) versus os dados simulados. Com base nessas comparações são medidas estatísticas para estimar a precisão do modelo e, assim, ajustar os parâmetros até a melhor resposta das medidas estatísticas.

Assim, para estabelecer o grau de correspondência entre os valores observados e modelados, o Manual do WEAP sugere usar dois índices na calibragem do modelo hidrológico: o índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (Eq.09) e o índice de *BIAS* (Eq.10).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}$$

Eq. 9

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o]$$

Eq. 10

Onde

$Q_{s,i}$ y $Q_{o,i}$ correspondem às vazões simuladas e observadas respectivamente para cada período do tempo

“i” e “n” correspondem ao número total de períodos de tempo analisados.

Para verificar a calibragem sob o índice do *Nash-Sutcliffe*, determina-se que a correspondência dos dados observados e simulados no intervalo de $[-\infty$ a $1,0]$ (GUPTA *et al.*, 2009), deve ficar o mais perto do valor 1 (SEI, 2009). Por outro lado, para o caso do índice de *Bias*, o valor da correspondência de ambos dados deve ter uma porcentagem pequena (quanto menor, melhor); quando o *Bias* é positivo, indica uma sobre-estimação e um *Bias* negativo indica uma sub-estimação das vazões (SEI, 2009).

3.2.10. Construção das projeções dos cenários climatológicos.

Depois de calibrar o modelo no WEAP, procede-se a fazer as rodadas nele com as projeções dos cenários futuros de clima eleitos. Assim, com ajuda do software *Ferret* (NOAA, 2011) consegue-se baixar a informação dos modelos climáticos globais.

O primeiro passo para o desenvolvimento das projeções dos cenários climáticos futuros, é conseguir as projeções climáticas históricas de controle (*baseline*) de cada modelo climático desde o ano base até o ano final do cenário de referência. Os dados do *baseline* correspondem ao canto da grade mais próximo (considerado pelo *Ferret*) da localização geográfica das diferentes estações base de precipitação e temperatura de cada área de captação.

Uma vez obtidas a informação do *baseline*, devem ser realizados os ajustes necessários dos valores da simulação dos modelos climáticos com os valores da observação histórica em cada estação base. Assim, consegue-se obter fatores de ajuste²² mensais de temperatura e precipitação, que servirá para corrigir as projeções climáticas futuras. Posteriormente, tendo os fatores mensais de ajuste para cada estação base, como segundo passo é necessário obter a informação das projeções de clima futuro para cada cenário corrigido.

3.3. Proposta metodológica para determinação da variação de eficiência de uma usina termelétrica com sistema de resfriamento fechado a torre úmida frente às mudanças climáticas.

Como se indicou anteriormente, num sistema de resfriamento fechado com torre úmida, a temperatura do ar não só influencia a temperatura da água que ingressa ao sistema, mas também no próprio processo do resfriamento; quer dizer, a transferência de calor é proporcional à diferença de entalpia entre a corrente de água para resfriar e o ar externo. Além disso, a entalpia do ar externo é relacionada à temperatura do ar e à umidade relativa.

Cada partícula de água na torre é rodeada por uma película de ar saturado na temperatura em que a água que ingressa à torre. O ar é aquecido e fica saturado, à medida que passa através da torre. O calor é transferido da água para o fluxo de ar parcialmente como calor sensível e calor latente, a qual é equivalente à fração de água evaporada na interface ar-água (MOHIUDDIN e KANT, 1996a).

²² Vide Seção 3.1.1

O desempenho desse sistema pode ser descrito pela equação de M.Merkel, (Eq.11). Merkel utilizou os coeficientes de calor sensível e de transferência de massa em um único coeficiente global (conhecido como *razão da característica da torre – tower characteristic ratio*) baseado no potencial de entalpia como uma força motriz.

$$\frac{KaV}{L} = C_p \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h_w - h_a} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde:

K = coeficiente de transferência de massa (kg/h*m²)

a = área de contato/volume da torre (m²/m³)

V = volume ativo do resfriamento/área de plano (m³/m²)

L = fluxo específico da água (kg/h*m²)

T₁ e T₂ = temperatura de ingresso e saída de água no resfriamento (°K)

h_w = entalpia do ar em saturação, por uma T definida (kJ/kg)

h_a = entalpia do ar no ingresso à torre (kJ/kg)

C_p = calor específico da água = 4,19 (kJ/kg*K)

A teoria proposta por Merkel exige algumas suposições simplificadoras, que foram quase universalmente adotados para o cálculo do desempenho da torre de resfriamento²³. Dessa forma, baseado na premissa que o desempenho de uma torre úmida possui uma constante de desenho que não é afetada pelas variações climáticas, mas guarda relação com a entalpia do sistema (MOHIUDDIN e KANT, 1996a, COUTURE, 2010), pode ser

$$\frac{KaV}{L} = C_p \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h_w - h_a} \quad \text{Eq. 11}$$

utilizada a equação de M.Merkel (

11 11) para determinar a diferença na eficiência do sistema de resfriamento.

Com a aplicação dessa equação de desempenho e conhecendo alguns valores

²³ Merkel deprecia que exista alguma resistência na transferência de massa na interfase ar-água, assim como o efeito da evaporação e a diferença de temperaturas entre a interfase e a quantidade de água que ingressa à torre (MOHIUDDIN e KANT, 1996a).

técnicos da geração de energia como: a capacidade de produção de vapor, a pressão e temperatura do vapor superaquecido, a pressão do vapor na saída da turbina e a temperatura da água de resfriamento, é possível determinar a perda de potência mecânica. Isto é, a diferença das áreas no diagrama da *Temperatura-Entropia* do ciclo *Rankine* de vapor de água (Figura II.12) em condições normais e com a variação do aumento de temperatura; e posteriormente sua eficiência.

Cumprindo o ciclo de vapor de água e segundo o esquema temperatura versus entropia, podem-se determinar as propriedades do vapor em diferentes pontos do ciclo. A identificação das propriedades como entalpia, entropia, temperatura e pressão faltantes são obtidos mediante o programa *TermoGraf* v.5.7 (UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA, 2011).

Assume-se que, no sistema de resfriamento fechado com torre úmida, a temperatura de saída da água da torre de resfriamento que vai para o condensador é somente dependente da temperatura do ar e da umidade relativa ambiente e não da temperatura da água de reposição (*make up*), uma vez que ela atinge o 1% - 3% do total de água utilizada para a condensação. Além disso, KOCH e VÖGELE (2009) demonstraram que sistemas a torre úmida são menos vulneráveis a alterações na temperatura da água, uma vez que um aumento na temperatura do ar ambiente não origina nenhum efeito significativo sobre ela. Além disso, assume-se uma velocidade do vento constante. Assim, com ajuda da fórmula de desempenho da torre úmida (equação de M.Merkel – Eq.11), que exprime um valor característico dependente da geometria da torre, pode-se determinar o valor de temperatura de saída da água de resfriamento para o condensador ao mudarem as variáveis climáticas antes descritas, mantendo constante o valor de desempenho da torre. Depois, a equação de Merkel pode ser exprimida numericamente pelo método de Chebyshev ²⁴:

²⁴ Os valores de T_1 , T_2 , h_1 , h_2 , h_3 , h_4 , não correspondem aos pontos do ciclo do vapor descritos nas Figuras II.11 e Figuras II.12.

T_1 , T_2 correspondem à temperatura de ingresso e saída de água no resfriamento (°K)

Range: é o diferencial de temperatura $T_2 - T_1$, a qual deve ser constante para cumprimento da eficiência de trabalho da torre resfriamento.

Para mais detalhe ver COUTURE (2010) e PARKER (1981).

$$\frac{KaV}{L} = C_p \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{h_w - h_a} = C_p \frac{T_1 - T_2}{4} \left(\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4} \right) \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$$\Delta h_1 = h_w - h_a \text{ em } T_2 + 0.1 \text{Range}$$

$$\Delta h_2 = h_w - h_a \text{ em } T_2 + 0.4 \text{Range}$$

$$\Delta h_3 = h_w - h_a \text{ em } T_2 + 0.6 \text{Range}$$

$$\Delta h_4 = h_w - h_a \text{ em } T_2 + 0.9 \text{Range}$$

Os dados de h_w e h_a são conseguidos mediante o programa *Psychrometric Calculator v4.0*; que calcula as propriedades termodinâmicas do ar úmido (MEGAWATSOFT INC., 2012).

Assume-se que o diferencial de temperatura de ingresso e saída da água de resfriamento da torre úmida (desde e para o condensador) é de 8°C, utilizando-se como base o dito por CHITALE (2008), que assinala esse valor como um referencial de diferencial de aumento de temperatura da água resfriada em uma torre úmida.

Dados os valores médios mensais e anuais do cenário de referência aplicados no WEAP, calcula-se a constante de desempenho da torre de resfriamento. Assim, com a constante de desenho da torre úmida, é possível determinar uma nova temperatura da água de resfriamento devido a uma mudança na temperatura do ar. Portanto, a cada incremento do diferencial de temperatura da água de resfriamento, devido a uma falta de eficiência na torre por aumento de temperatura do ar, o valor da temperatura do vapor expandido precisa ser aumentado. Com um aumento do valor da temperatura do vapor condensado, se reduzirá a eficiência da usina, como foi representado na figura II.12. Assim, a perda de potência mecânica é calculada mediante a diferença das áreas entre o ciclo de vapor em condições normais e um ciclo de vapor alterado devido a um aumento de temperatura originado, neste caso, pelas mudanças climáticas. Enfim, assumindo uma eficiência teórica da usina termelétrica, a redução percentual de eficiência será proporcional à porcentagem

reduzida na perda de potência mecânica.

IV. GERAÇÃO TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL E SUA VULNERABILIDADE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL: ESTUDO DE CASO UTE CTSUL

Este capítulo apresenta um estudo de caso para o Brasil utilizando as metodologias propostas no Capítulo III. Assim, inicialmente são descritas as características das usinas termelétricas à carvão mineral no Brasil (operação e projetadas), assim como estudos de disponibilidade hídrica quantitativa e de mudanças climáticas relacionadas à Regiões/Estados onde elas se encontram. Em seguida, realiza-se um estudo de caso sobre a vulnerabilidade hídrica da região onde será instalada a usina CTSUL, e o impacto na eficiência operacional devido a uma mudança na temperatura mediante cenários de mudanças climáticas. Finalmente, na última seção deste capítulo, discutem-se os resultados do estudo de caso.

Segundo o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (ANEEL, 2011c) a matriz elétrica brasileira possui uma capacidade instalada de 119 069 MW de potência, do qual 27,16% (32 415 MW) correspondem à geração termelétrica. Em 2011, as UTEs a carvão mineral tiveram uma potência fiscalizada de 1 765 MW (ANEEL, 2011c), que segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2021 (PDE 2021), será incrementada a 3 205 MW no 2013 e mantida até o 2021 (EPE, 2012b). Assim, em 2010, o carvão mineral respondeu por 1,3% da geração elétrica, que representou um aumento de 25,4% respeito ao ano anterior (EPE, 2011b).

O Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) da EPE considerava um aumento das fontes renováveis, em especial da hidroeletricidade na matriz brasileira (EPE, 2007b). Porém, no transcorrer dos últimos anos o setor hidrelétrico enfrentou dificuldades devido a problemas como a obtenção da licença prévia ambiental, que é requisito para participar dos leilões de compra de energia (BIRD, 2010b). É assim que o Relatório de Síntese Técnica sobre o Estudo de Baixo Carbono para o Brasil – Energia (BIRD, 2010b) indica a possibilidade do aumento da oferta de energia de fontes fósseis na matriz elétrica brasileira,

como termelétricas à óleo combustível e à carvão mineral na região Nordeste, o que decorre dos resultados dos leilões de energia nova realizados, nos quais não houve oferta suficiente de fontes renováveis a preços competitivos (EPE, 2011a). Todavia, o balanço energético do ano 2010, aponta que a geração de energia eólica aumentou em 75,8% em relação ao ano anterior (EPE, 2011b). Além disso, um informe da EPE (2012a) indica que um crescimento da energia eólica deve ocorrer de forma ainda mais expressiva nos próximos quatro anos, quando novos parques entrarão em operação. (BIRD, 2010a).

LUCENA *et al.* (2010) estudaram os impactos das mudanças climáticas sobre o setor energético brasileiro com base nas projeções climáticas para os cenários A2 e B2 do IPCC (2000), realizadas pelo modelo climático global HadCM3 com o *downscaling* feito pelo modelo regional PRECIS/HadRM3. Em seguida, os autores propuseram políticas de adaptação a esses impactos. Os resultados obtidos neste estudo indicam que, caso se confirmem os cenários climáticos, o sistema de geração hidrelétrico passaria a ter uma menor confiabilidade, o que levaria à necessidade de uma maior capacidade instalada de outras fontes, notadamente gás natural, e em menor escala nuclear, carvão, bagaço de cana e geração eólica. Além disso, LUCENA *et al.* (2010) projetaram a possibilidade que a vulnerabilidade nas hidroelétricas seria mais severa no Nordeste.

Apesar de no Brasil a termelétricidade a carvão mineral ter uma representatividade pequena na matriz energética, ela opera na base. Assim, é relevante avaliar sua vulnerabilidade frente às mudanças climáticas num planejamento futuro de segurança energética.

4.1. Características das usinas termelétricas a carvão mineral no Brasil.

O carvão mineral nacional utilizado para geração de vapor é destinado quase na sua totalidade à geração termelétrica, sendo o restante consumido para geração de calor no setor industrial (EPE, 2012b). Segundo o PDE 2021 (EPE, 2012b) o fator de capacidade das UTEs a carvão mineral gira em torno do 40%, uma vez que possuem baixo custo variável unitário de geração (EPE, , 2012b). A maioria das UTEs possuem um sistema de

combustão à carvão pulverizado subcrítico, com exceção da UTE São Jerônimo, que trabalha com carvão pelotizado, e a USITESC que operará com tecnologia de leito fluidizado (ANEEL, 2011b).

As reservas de carvão mineral brasileiras concentram-se na região Sul do país e caracterizam-se pelo elevado teor de inertes (cinzas), enxofre e voláteis e baixo poder calorífico (EPE, 2007b). Dessa forma, seu transporte para longas distâncias é pouco atrativo economicamente e, por isso, todas as usinas termelétricas em operação e muitas com outorga se localizam perto das minas (região Sul). Portanto, a maioria das UTEs ficam nas mesmas bacias hidrográficas e, com isso, abastecem-se das mesmas fontes hídricas (mesmos rios). Além disso, como se explicou na Seção 2.2.2, uma usina à carvão pulverizado subcrítico é o segundo maior demandante de água entre as termelétricas existentes, perdendo apenas para o uso das termonucleares (Tabela II.1). Diante disso, cabe a preocupação sobre como as possíveis mudanças na temperatura e precipitação, poderiam afetar sua disponibilidade hídrica no futuro.

Por outro lado, prevê-se a introdução de novas UTEs a carvão mineral importado da Colômbia, Venezuela, África do Sul e Moçambique (MPX MINERAÇÃO E ENERGIA LTDA, 2006 e 2008), cuja qualidade é melhor que a do carvão nacional (USINA TERMELÉTRICA PORTO DO AÇU ENERGIA S/A, 2008). Isso faz com que esse tipo de geração elétrica possa se expandir por outras regiões do país como no Sudeste e Nordeste. Estas novas UTEs se localizam estrategicamente em portos importantes do país e a maioria delas têm como fonte de abastecimento de água para resfriamento o mar. Porém, sua vulnerabilidade à mudança climática poderia ser referida ao aumento de temperatura da água e as restrições legislativas sobre a temperatura de emissão do efluente. Outra vulnerabilidade à mudança climática tem referência ao possível aumento do nível do mar e com isto problemas com respeito à infraestrutura da planta. Contudo, isto deve ser analisado cuidadosamente através de pelo menos dois fatores e sua interdependência: a expansão térmica da água do oceano e o armazenamento de calor associado; a elevação da superfície do mar como resultado dos ajustamentos isostáticos da crosta da Terra e as mudanças associadas em campos gravitacionais (forças) (BIRD, 2010a).

4.1.1. Usinas em operação

As usinas termelétricas a carvão mineral em operação encontram-se, na sua maioria, na região Sul do país, majoritariamente no Estado do Rio Grande do Sul (RS). A UTE São Jerônimo é a mais antiga entre as usinas a carvão do país (inaugurada em 1953) e encontra-se tecnologicamente obsoleta, apresentando 14,3% de eficiência líquida (ANEEL, 2011a).

A vida útil aproximada de uma usina termelétrica em operação encontra-se na faixa de 25 a 30 anos. No entanto, a operação das usinas pode ser prolongada por mais tempo, após uma completa avaliação de sua integridade no final de sua vida útil (EPE, 2007b). A maioria das usinas em operação no Brasil estão no final de sua vida útil, embora deva ser considerado que as horas de operação anuais delas são menores que a média o que é refletido em uma menor fator de capacidade médio (EPE, 2007b).

Tabela IV.1: Relação das UTEs a carvão mineral em operação no Brasil

Usina	Município	Coordenadas Geográficas WGS84		Proprietário	Potência Outorgada (MW)	Potência Fiscalizada (MW)	Destino da Energia	Tipo de processo de resfriamento
		Latitude	Longitude					
Charqueadas	Charqueadas - RS	-29.954	-51.623	Tractebel Energia S/A	72	72	PIE	Circulação aberta
Figueira	Figueira - PR	-23.852	-50.390	Copel Geração e Transmissão S.A.	20	20	SP	Circulação aberta
Jorge Lacerda I e II	Capivari de Baixo - SC	-28.445	-48.958	Tractebel Energia S/A	232	232	PIE	Circulação aberta
Presidente Médici A, B	Candiota - RS	-31.552	-53.683	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica	446	446	SP	Circulação fechada a torre úmida
São Jerônimo	São Jerônimo - RS	-29.968	-51.735	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica	20	20	SP	n.d ¹
Jorge Lacerda III	Capivari de Baixo - SC	-28.445	-48.958	Tractebel Energia S/A	262	262	PIE	Circulação aberta
Jorge Lacerda IV	Capivari de Baixo - SC	-28.445	-48.958	Tractebel Energia S/A	363	363	PIE	Circulação fechada a torre úmida

Candiota III	Candiota - RS	-31.552	-53.683	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica	350	350	PIE	Circulação fechada a torre úmida
--------------	---------------	---------	---------	--	-----	-----	-----	----------------------------------

RS: Rio Grande do Sul; SC: Santa Catarina; PR: Paraná; PIE: Produção de Energia Independente; SP: Serviço Público.

1: Não disponível

Fonte: ELECTROBRAS CGTEE (2010), ANEEL (2011), ANNEL, (2011a) TRACTEBEL ENERGIA (2011a), COPEL (2011), TRACTEBEL ENERGIA (2011b), (ELECTROBRAS CGTEE, 2011a).

4.1.2. Expansões previstas

As usinas a carvão mineral previstas na expansão da geração de energia elétrica no país totalizam uma potência instalada de 4,800 MW (ANEEL, 2011c). Porém, a execução do projeto da UTE Sepetiba (1,377 MW), localizada no Estado do Rio de Janeiro (RJ), não seguirá seu curso devido a um plebiscito que decidiu pelo impedimento de sua construção (VIÉGAS, 2007 e VAMERLATI, 2008). Além disso, o PDE 2020 indica que a maior expansão de energia termelétrica (sem considerar a geração termelétrica nuclear) acontecerá na região Nordeste (EPE, 2011a). Dessa forma, tem-se três novas usinas a carvão mineral nessa região, Pecém I, Pecém II e Itaqui que abrirão um novo mercado de importação do carvão. Para as termelétricas a carvão importado, a qualidade do carvão a ser utilizado poderá permitir a introdução de tecnologias mais eficiente (EPE, 2007b). Cabe indicar que a usina USISTEC será operada com sistema de queima em leito fluidizado (CARBONÍFERA CRICIÚMA S.A; COMPANHIA CARBONÍFERA METROPOLITANA S.A, 2006).

Tabela IV.2: Relação das UTEs a carvão mineral em construção e outorgadas no Brasil

Usina	Município	Coordenadas Geográficas WGS84		Proprietário	Potência Outorgada (MW)	Destino da Energia	Tipo de processo de resfriamento
		Latitude	Longitude				
Porto do Açu I	São João da Barra- RJ	-41.0116	-21.824	UTE Porto do Açu Energia S.A	2100	---	Circulação aberta
USINAS EM CONSTRUÇÃO							
Porto do Itaqui (Ex- Termomaranhão)	São Luís - MA	-2.529	-44.306	UTE Porto do Itaqui Geração de Energia S.A.	360	PIE	Circulação fechada a torre úmida
Porto do Pecém I (Ex. MPX)	São Gonçalo do Amarante - CE	-3.596	-38.876	Porto do Pecém Geração de Energia S.A.	720	PIE	Circulação fechada a torre úmida
Porto do Pecém II	São Gonçalo do Amarante - CE	-3.596	-38.876	MPX Pecém II Geração de Energia S.A	360	PIE	Circulação fechada a torre úmida
USINAS OUTORGADAS							
Seival	Candiota - RS	-31.503	-53.679	Usina Termelétrica Seival Ltda	542	PIE	Circulação fechada a torre úmida
Sepetiba	Itaguaí - RJ	-22.900	-43.800	Itaguaí Energia S/A	1377	PIE	-----
Sul Catarinense - USITESC	Treviso - SC	-28.516	-49.458	Usina Termelétrica Sul Catarinense S/A	440	PIE	Circulação fechada a torre úmida
Jacuí	Charqueadas - RS	-29.955	-51.625	Elétrica Jacuí S/A	350	PIE	Circulação aberta
CTSUL	Cachoeira do Sul - RS	-30.285	-52.975	Central Termoelétrica Sul S/A	650	PIE	Circulação fechada a torre úmida

RS: Rio Grande do Sul; SC: Santa Catarina; RJ: Rio de Janeiro; CE: Ceará; MA: Maranhão; PIE: Produção de Energia Independente.

Fonte: STAMM (2003); CTSUL (2005); CARBONÍFERA CRICIÚMA S.A e COMPANHIA CARBONÍFERA METROPOLITANA S.A, (2006); MPX MINERAÇÃO E ENERGIA LTDA (2006, 2008); USINA TERMELÉTRICA PORTO DO AÇU ENERGIA S/A (2008); (IBAMA, 2009b); e ANEEL (2011a).

Cabe indicar que a UTE Porto do Açu I não se encontra na relação das usinas consideradas pela ANNEEL no seu Banco de Informações de Geração. A UTE Porto do Açu Energia S.A indica que, no leilão A-5 de venda de energia, realizado em 30 de setembro de

2008, o projeto não foi ofertado devido à súbita desvalorização do real frente ao dólar americano. Depois, a empresa se inscreveu em um módulo do projeto da UTE Porto do Açu Energia S.A. no leilão A-5 de 2009, mas o leilão foi cancelado e, portanto, o projeto não foi ofertado. Em 31 de dezembro de 2011, a UTE Porto do Açu encontrou-se em fase pré-operacional e com Licença de Instalação IN 000882 concedida pelo Instituto Estadual do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro, de 14 de outubro de 2009, a qual tem uma vigência de 4 anos (MPX GRUPO EBX, 2012). Na Figura IV.1 apresenta-se a localização das UTEs a carvão mineral em operação, construção e outorga no Brasil.

4.1.3. Projetos em estudo

Segundo o PNE 2030 da EPE (2007b), há disponibilidade de carvão nacional para instalação de pelo menos 64 usinas, que operariam com um fator de capacidade médio de 60% por cerca de 35 anos, sem considerar os novos empreendimentos de UTEs com carvão importado. Além disso, o plano indica que a partir de 2015 é provável a incursão de tecnologia de combustão pressurizada, possibilitando uma eficiência de até 45% e, por política conservacionista, não considera dentro desse horizonte a incursão da tecnologia de gaseificação integrada, mesmo que essa tecnologia sugere eficiência de até 60%. Porém, o PDE 2021 indica que não tem previsto ampliação de novas usinas termelétricas a carvão mineral planejadas (EPE, 2012b).

Tabela IV.3: Relação de novos projetos de UTEs carvão mineral em estudo no Brasil segundo o Plano Nacional de Energia 2030

Usina	Município	Proprietário
Figueira II	Candiota - RS	COPELMI
Barcarena	Barcarena - PA	CVRD
MC2 Gravataí	Candiota - RS	ELLOBRAS
IPOJUCA I	Ipojuca - PE	AURIZONA
IPOJUCA II	Ipojuca - PE	AURIZONA
GOYTACAZES	São João da Barra - RJ	OIL & POWER
Porto Pecém III	São Gonçalo do Amarante - CE	MPX
MC2 Pecem 3	Pecem - CE	GENPOWER

Fonte: EPE (2007b)



Figura IV.1: Localização das Usinas Termelétricas a Carvão Mineral em Operação, Construção e Outorga no Brasil.

Fonte: ANEEL (2011); e MPX GRUPO EBX (2012).

O PNE 2030 (EPE, 2007b) no capítulo *Avaliações dos Impactos Ambientais*, identifica os impactos da geração termelétrica a carvão mineral baseados no estudo “*Referencial para Orçamento dos Programas Socioambientais*” do Comitê

Coordenador das Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico (COMASE)²⁵. Nesta avaliação, o impacto ao recurso hídrico está relacionado à emissão de efluentes, mas não à necessidade de disponibilidade hídrica para sua geração, assim como a identificação de possíveis impactos a jusante (rios) no caso de sistemas de resfriamento fechados a torre úmida (EPE, 2007b). Além disso, o PDE 2021 (EPE, 2012b) apresenta indicadores de sustentabilidade para projetos em expansão e não para os já leiloados e com energia contratada. No setor termelétrico, no PDE (EPE, 2012b) não há usinas planejadas, exceto a usina termonuclear de Angra 3. Dessa forma, não foram feitas análises socioambientais específicas, tais como cálculo de índice de sustentabilidade para os projetos termelétricos (EPE, 2012b).

4.2. Disponibilidade hídrica atual das bacias hidrográficas correspondentes às UTEs a carvão mineral no Brasil.

Em um contexto geral, a disponibilidade hídrica pode ser entendida como a vazão ainda disponível para outorga²⁶ em um curso de água, sendo que o balanço entre a demanda e a disponibilidade indica a sua situação hídrica em termos de escassez ou de abundância (HORA, 2011). Por outro lado, tem-se o crescimento populacional, baixa qualidade das águas (principalmente dos rios), a diminuição da cobertura vegetal que, entre outros fatores, em conjunto conduzem à escassez hídrica (NUNES *et al.*, 2011).

Na atualidade a ANA (2011b) identifica a utilização da água como usos consuntivos²⁷ (irrigação, abastecimento urbano, abastecimento rural, industrial e criação de animal) e como uso não consuntivo (transporte e energia). Sendo que o setor energético foca-se na geração hidrelétrica. Têm-se diversos relatórios que mostram a situação atual dos recursos hídricos do país, seja como marco geral, que é o caso da ANA no seu relatório

²⁵ O estudo aborda a avaliação de usinas hidroelétricas, usinas térmicas convencionais e sistemas de transmissão, publicado em 1994 (COMASE, 1994).

²⁶ Outorga é o instrumento administrativo e legal do poder público de facultar o uso da água em uma determinada quantidade por um determinado intervalo de tempo, durante um prazo fixo. Este instrumento assegura o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água (BRASIL, 1997)

²⁷ Parte da água captada é consumida no processo produtivo, não retornando ao curso de água.

Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2011 (ANA, 2011b), como por cada Região Hidrográfica, como é o caso de estudos do Ministério de Meio Ambiente – MMA (2006a, 2006b, 2006d), ou inclusive por Estado como o Rio Grande do Sul (SEMA, 2007), Paraná (SEMA PARANÁ, 2010), Ceará (SRH/CE, 2008). Dessa forma, realiza-se uma descrição dos principais estudos relacionados à disponibilidade nas áreas hidrográficas onde se localizam as UTEs.

Segundo o último relatório de *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2011* (ANA, 2011b), o país apresenta uma situação confortável quanto aos recursos hídricos. Porém, existe uma distribuição espacial desigual desses recursos, uma vez que cerca de 80% da disponibilidade hídrica está concentrada na Região Hidrográfica Amazônica, onde se encontra a menor densidade populacional, além de poucas demandas consultivas.

Para poder entender as considerações para determinar a disponibilidade hídrica pela ANA é necessária a definição dos conceitos de vazão natural, vazão média de longo período, vazão com permanência de 95%, vazão de estiagem e vazão regulada. Eles foram tomados do *Caderno da Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil* (ANA, 2005):

- Vazão natural: A vazão natural é aquela que seria originada na bacia hidrográfica se não houvesse qualquer interferência humana como usos consuntivos, derivações, regularizações, importações e exportações de água.
- Vazão média de longo período - Q_m ou Q_{lp} (m^3/s): definida pela média aritmética das vazões diárias de todo o período da série disponível;
- Vazão com permanência de 95%²⁸ - Q_{95} (m^3/s): Vazão que é igualada ou excedida em 95% do tempo (obtida com base na série disponível de vazões diárias).
- Vazões de estiagem: Vazão com permanência de 95% como sendo representativa da disponibilidade hídrica em condição de estiagem. Podem ser analisadas

²⁸ Entendendo-se como um período de permanência da vazão em 95% dos dias do ano, que implica em uma média de 347 dias.

através da frequência de ocorrência de vazões em uma seção do rio da bacia hidrográfica.

- Vazão regularizada: A vazão regularizada é a quantidade de água que pode ser fornecida por um reservatório com uma determinada segurança, considerado o período de dados da série histórica de vazões afluentes. Os reservatórios são capazes de armazenar água nos períodos úmidos e liberar parte do volume armazenado nos períodos de estiagem, tornando disponível uma maior quantidade de água quando esta seria naturalmente menor. Do ponto de vista teórico, a maior vazão que pode ser regularizada é a vazão natural média. Entretanto, a vazão regularizada também é função das condições de operação dos reservatórios, que depende diretamente dos seus usos múltiplos, que pode incluir a geração de energia, abastecimento humano, irrigação e o amortecimento de cheias, entre outros.

As UTEs a carvão mineral que utilizam água de fontes superficiais como os rios, encontram-se localizadas entre as regiões hidrográficas do Atlântico Sul, Atlântico Nordeste Oriental e Paraná. Na tabela seguinte apresentam-se as vazões médias e a disponibilidade hídrica identificadas no relatório da ANA (2011b) das regiões hidrográficas mencionadas.

A disponibilidade hídrica de águas superficiais considerada pela ANA (2005) e aplicada no relatório é entendida como a vazão regularizada pelo sistema de reservatórios a montante da seção de interesse, com 100% de garantia, somada à vazão incremental de estiagem (vazão com permanência de 95% - Q_{95} , no trecho não regularizado). Em rios sem regularização, portanto, a disponibilidade é considerada como apenas a vazão de estiagem (com permanência de 95% - Q_{95}).

Tabela IV.4: Vazão média e disponibilidade hídrica das regiões hidrográficas onde ficam localizadas as UTEs a carvão mineral no Brasil segundo a ANA

UTE¹	REGIÃO HIDROGRÁFICA	VAZÃO MÉDIA (m³/s)	DISPONIB. HÍDRICA (m³/s)
Charqueadas, São Jerônimo, Jacuí, CTSUL, Presidente Médici A, B, Candiota III, Seival, Jorge Lacerda I e II, Jorge Lacerda III, Jorge Lacerda IV e USITESC.	Atlântico Sul	4055	647
Porto do Pecém I (Ex. MPX) e Porto do Pecém II.	Atlântico Nordeste Oriental	774	91
Figuereira	Paraná	11 414	5 792

¹ As UTEs de Porto do Açu e Porto do Itaqui retiram a água para seu resfriamento do mar.

Fonte: Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2011 (ANA, 2011b).

Como se indica na Tabela IV.4, a situação da Região do Atlântico Nordeste Oriental é a mais crítica de todas. Isso ocorre devido às baixas e irregulares precipitações e dentro do contexto hidrogeológico do semiárido brasileiro. Todavia, em rios onde há elevada densidade populacional, em especial nas regiões metropolitanas, o problema está mais relacionado à elevada carga orgânica lançada do que à disponibilidade hídrica quantitativa. (ANA, 2011b).

Do mesmo modo, o relatório avaliou a situação hídrica em termos de criticidade dos rios mediante a relação da demanda total dos diferentes usos consuntivos versus a disponibilidade quantitativa, mostrando os resultados graficamente. O desenho original do mapa foi feito em uma escala de 1:1.000.000, a qual não permite a visualização de todos os rios comprometidos quantitativamente. Porém, consegue-se apreciar alguns dos corpos hídricos relacionados ao fornecimento de água para a geração das seguintes UTEs: o rio Jacuí (UTEs Jacuí, São Jerônimo, Charqueadas e CTSUL), o Arroio Candiota (UTEs Presidente Médici A e B, Candiota III e Seival) ambos no Estado do Rio Grande do Sul, e do rio Jaguaribe (UTEs Porto de Pecém I e Porto de Pecém II) no Estado do Ceará. Nesta

análise, as bacias são estudadas independentemente, sem considerar a vazões das bacias na montante delas (o que acontece no caso do Rio Jacuí).

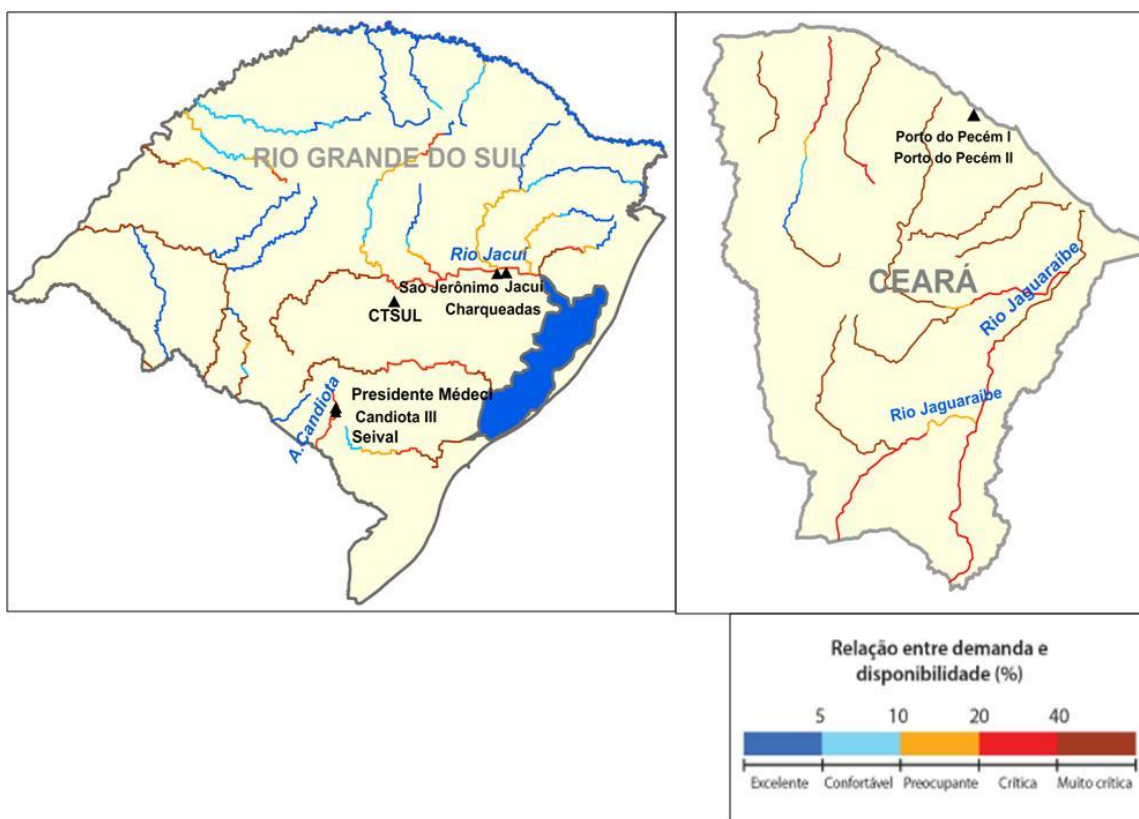


Figura IV.2: Relação da Disponibilidade por Demanda nos Estados do Rio Grande do Sul e Ceará.

Fonte: Adaptação do Relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2011 (ANA, 2011b)

Como se pode observar no RS, o Rio Jacuí, que fornece de água para as UTEs de São Jerônimo e de Charqueadas, apresenta uma situação crítica, sendo que esse corpo hídrico já concedeu a outorga para próximos empreendimentos como as UTEs Jacuí e CTSUL. Além disso, no mesmo Estado, o Arroio Candiota, que apresenta o mesmo nível de criticidade, fornece água às UTEs de Presidente Médici A e B, e Candiota III e conta com a outorga pendente para o futuro empreendimento de Seival. Igualmente o rio Jaguaribe apresenta uma situação desde preocupante até muito crítica dependendo do trecho do rio.

Por outro lado, a Secretaria de Recursos Hídricos do MMA desenvolveu diversos estudos como parte do processo de elaboração do Plano Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH). Entre os estudos, encontram-se documentos de caracterização denominados Cadernos Regionais para cada uma das doze Regiões Hidrográficas do Brasil, definidas pela Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 32/2003. Essas regiões configuram a base físico-territorial para elaboração e implementação do Plano (MMA, 2006b).

Assim, foram identificados três Cadernos Regionais referentes às regiões hidrográficas do Atlântico Sul, Atlântico Nordeste Oriental e Paraná. Os Cadernos de cada Região Hidrográfica apresentam um estudo mais detalhado para cada Bacia (Sub-bacia Nível 1) e Sub-bacia (Sub-bacia Nível 2), delimitada de forma diferente da divisão feita pela ANA (2011b). Deste modo, apresenta-se na Tabela IV.5 a relação dos copos hídricos fornecedores das UTEs e sua identificação dentro de cada região hidrográfica, Bacia (nível 1) e Sub-bacia (nível 2) de acordo ao estudo do MMA (2006a, 2006b, 2006c, 2006d).

Tabela IV.5: Identificação dos recursos hídricos que atendem às UTEs a carvão mineral

UTE	Região Hidrográfica	Bacia ¹	Subbacia ¹	Fonte de Abastecimento
Charqueadas	Atlântico Sul	Guaíba	Baixo Jacuí	Rio Jacuí
São Jerônimo				Rio Jacuí
Jacuí				Rio Jacuí
CTSUL				Rio Jacuí
Presidente Médici A, B	Atlântico Sul	Litoral RS	Litoral RS 03	Arroio Candiota
Candiota III				Arroio Candiota
Seival				Arroio Candiota
Jorge Lacerda I e II	Atlântico Sul	Litoral SP PR SC	Litoral RS SC 02	Rio Tubarão
Jorge Lacerda III				Rio Tubarão
Jorge Lacerda IV				Rio Tubarão
Sul Catarinense – USITESC				Rio Mãe Luzia
Figueira	Paraná	Paranapanema	Cinzas	Rio Laranjinha
Porto do Pecém I (Ex. MPX) e Porto do Pecém II	Atlântico Nordeste Oriental	Jaguaribe	Médio Jaguaribe ²	Rio Jaguaribe
		Norte CE	Metropolitana ³	Rio São Gonçalo
				Rio Ceará
				Rio Cocó
				Rio Cauhipe
				Riacho Anil
Porto do Itaqui (Ex-Termomaranhão)	-----	-----	-----	Canindé
				Curu ⁴
Porto do Açu I	-----	-----	-----	Mar
				Mar (sistema de resfriamento e lavagem de gases emitidos pela caldeira) e poços subterrâneos (água de serviços)

¹ Classificação de “Bacia” e “Subbacia” feita pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA).

² Açude Castanhão

³ Açudes de Sítios Novos, Anil, Cauípe, Ceará, e Gavião.

⁴ Açude Pereira de Miranda

Fonte: Governo do Estado do Rio Grande do Sul (2001); CTSUL (2005); MMA (2006a, 2006b, 2006c, 2006d); CARBONÍFERA CRICIÚMA S.A e COMPANHIA CARBONÍFERA METROPOLITANA S.A, (2006); MPX MINERAÇÃO E ENERGIA LTDA, (2006, 2008); USINA TERMELETRICA PORTO DO AÇU ENERGIA S/A (2008); (IBAMA, 2009a); ELECTROBRAS CGTEE (2011b); COPEL (2009); SIRH/CE (2012).

O estudo do MMA determinou a disponibilidade hídrica em termos de vazão média (Q_m), vazão média acumulada ($Q_{m_{acum.}}$), vazão Q_{95} e vazão Q_{95} acumulada (Q_{95acum}) por cada Sub-bacia que compreende cada UTE. O termo acumulada refere-se ao somatório das vazões das bacias que ficam na montante e ingressa à bacia em estudo. No estudo foram definidos indicadores para representar a situação do balanço hídrico entre a retirada ou demanda total de água com a disponibilidade hídrica:

- Indicador 1:

Razão entre a vazão de retirada para os usos consuntivos (demanda) e a vazão média de longo período acumulada ($Q_{m_{acum.}}$), representada em percentagem. O MMA indica que a Agência Ambiental Europeia (*European Environment Agency*) e as Nações Unidas utilizam este indicador como o Índice de Retirada de Água (*water exploitation index*).

O indicador é classificado para representar a situação da criticidade da disponibilidade hídrica segundo a tabela abaixo:

Tabela IV.6: Índice da situação da criticidade dos corpos hídricos superficiais com respeito à sua disponibilidade hídrica

Valor	Situação
< 5%	Excelente
5% a 10%	Confortável
10% a 20%	Preocupante
20% a 40%	Crítica
>40%:	Muito crítica

Fonte: MMA (2006a, 2006b, 2006d)

- Indicador 2:

A razão entre a vazão de retirada para os usos consuntivos e a disponibilidade hídrica, considerando-se a vazão Q_{95acum} como sendo representativa da disponibilidade em condições em que não há regularização na Região do Atlântico Sul e em todos os casos de regularização para a Região do Atlântico Nordeste Oriental. Resultados superiores a 100%

para este indicador significam que as demandas atuais já são atendidas mediante intervenções estruturais destinadas a regularizar vazões. Percentuais menores que 100% sugerem que parte da demanda é atendida mediante regularização, sendo tanto maiores quanto mais elevados forem os percentuais resultantes. Para a definição de faixas de classificação deste indicador, foram adotadas as mesmas faixas da situação do indicador 1.

- Indicador 3

A razão entre a vazão média e a população expressa pelo quociente entre a vazão média e o tamanho da população ($\text{m}^3/\text{hab}/\text{ano}$). Este indicador não será avaliado uma vez que não é o objetivo desta pesquisa.

Cabe indicar que a vazão média não poderia ser utilizada como um indicador de disponibilidade efetiva, mas apenas teórica, pois representa o volume total escoado ao longo do tempo. O aproveitamento efetivo de percentuais elevados desta disponibilidade teórica só pode ser alcançado mediante a implantação de obras de regularização e, mesmo assim, em termos práticos, não é viável regularizar mais do que 60% ou 70% da vazão média de longo prazo (MMA, 2006a). Assim, o $Q_{95\text{acum}}$ pode ser considerada como representativa da disponibilidade a ser aproveitada sem que seja necessário implantar obras de regularização (reservatórios). Porém, deve ser especificado que o uso para abastecimento público requer garantias superiores a 95%, igualmente para criação de animais ou a indústria (MMA, 2006c).

Na tabela seguinte apresenta-se os valores de vazões, demanda, resultados da relação da demanda/disponibilidade e a situação de criticidade dos recursos hídricos fornecedores de água para as UTEs segundo os relatórios do MMA.

Tabela IV.7: Vazões médias, vazões Q_{95} , balanço hídrico da demanda x disponibilidade e a situação da disponibilidade hídrica detalhadas por Sub-bacia, segundo MMA

UTE	Sub-bacia (Sub-bacia Nível 2)	Q_m	Q_m acum.	Q_{95}	Q_{95} acum	Demanda Total	Demanda / Disponibilidade		Situação da Disponib.
		m^3/s	m^3/s	m^3/s	m^3/s		Indicador 1 % Q_m acum	Indicador 2 % Q_{95} acum.	
Charqueadas	Baixo Jacuí								Situação confortável
São Jerônimo		309,9	1546,6	44,2	220,7	18,8	1,2	8,5	
Jacuí									
CTSUL									
Presidente Médici A, B	Litoral RS 03								Situação muito critica
Candiota III		298,5	298,5	15,6	15,6	22,8	7,6	146,4	
Seival									
Jorge Lacerda I e II	Litoral RS SC 02								Situação preocupante
Jorge Lacerda III		174,2	174,2	46,6	46,6	5,7	3,3	12,3	
Jorge Lacerda IV									
Sul Catarinense – USITESC									
Figueira	Cinzas	132,8	-----	15,3	-----		1	8,8	Situação confortável
Porto do Pecém I (Ex. MPX) e Porto do Pecém II	Médio Jaguaribe	28,94	130,64	-----	-----		2,79	-----	Situação confortável
	Metropolitana	53,50	53,60	-----	-----		30,28	-----	Situação Critica
	Curu	22,53	22,53	-----	-----		14,54	-----	Situação Preocupante

As UTEs sombreadas de cor cinza referem-se às usinas em operação.

Fonte: MMA (2006a, 2006b, 2006d)

Como pode-se apreciar, Litoral RS SC 02 indica uma situação preocupante. O RIMA da UTE USITESC (CARBONÍFERA CRICIÚMA S.A; COMPANHIA

CARBONÍFERA METROPOLITANA S.A, 2006), cuja fonte de fornecimento hídrico será o rio Mãe Luiza, indica que seu principal concorrente da água é a rizicultura (principalmente nos meses compreendidos entre outubro e fevereiro) atingindo até 79,6% de captação de água na microbacia de Mãe Luiza. Além disso, indica que no processo de resfriamento da UTE utilizará uma maior quantidade de água do que precisaria devido à sua baixa qualidade (baixos valores de pH e elevados índices de acidez e concentração de metais associados à exploração do carvão na montante), e tendo uma perda por evaporação no resfriamento de 71%. É assim que, com o início da operação da usina, a demanda aumentaria em um 6,1%. Portanto, a usina considera avaliar possibilidade de uso da água dos reservatórios nas cabeceiras do rio Mãe Luiza a serem possivelmente construídos. Ela estuda, também, a adoção de um sistema de resfriamento híbrido, onde ambos processos, úmido e seco, seriam combinados reduzindo a demanda de água em cerca de 50%, ou a instalação de torres secas, o que definitivamente evitaria um conflito pelo uso das águas (CARBONÍFERA CRICIÚMA S.A; COMPANHIA CARBONÍFERA METROPOLITANA S.A, 2006).

Por outro lado, o Estado de Santa Catarina possui um plano integrado de recursos hídricos da bacia do rio Tubarão e Complexo Lagunar (localizada dentro da bacia Litoral RS SC 02) (CERH/SC, 2008). Nele considera-se que as termelétricas pertencem ao uso consuntivo do setor industrial, as UTE Lacerda I e II, III, IV possuem o maior consumo, com uma demanda total de 730 l/s o que representa 84.96% da demanda cadastrada para setor industrial. A maioria das outras indústrias posicionadas nessa área hidrográfica é de pequeno porte e muitas utilizam sistemas públicos para abastecimento ou tem poços de captação profunda. Das três usinas na bacia Litoral RS SC 02, duas possuem sistema de resfriamento a circulação aberta, enquanto uma UTE possui um sistema fechado com torre úmida. Isto significa que a análise de viabilidade técnica dessa bacia deve ser feita tanto pela garantia da disponibilidade hídrica para o sistema aberto, como para a satisfação das outras demandas a jusante da usina com torre úmida, que podem ter uma prioridade maior do que a geração térmica (abastecimento humano, irrigação, etc.).

As UTEs do Porto de Pecém I e Porto de Pecém II estão sendo construídas dentro de um complexo industrial, no qual, segundo o Estudo de Impacto Ambiental do Complexo Industrial do Estado do Ceará (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2009), a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) é quem fornece água para o complexo industrial, cuja principal fonte é o reservatório de Sítios Novos (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2009). Devido à inclusão de novos empreendimentos neste complexo, como as termelétricas de Porto de Pecém I e Porto de Pecém II, novos açudes e conexões estão planejados para suprir a demanda futura de água do complexo. Assim, planeja-se construir os açudes Anil e Ceará e conectá-los com os reservatórios Sítios Novos, Cauhípe e Pereira de Miranda (MPX MINERAÇÃO E ENERGIA LTDA, 2006 e 2008). Por outro lado, planeja-se também construir o sistema de conexão entre o reservatório Gavião e o complexo industrial Pecém. O reservatório Gavião será suprido pelo reservatório Castanhão, criando um sistema interconectado (SIRH/CE, 2008, GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2009, MERSCHMANN *et al.*, 2012).

Dessa forma, os açudes Sítios Novos, Anil, Cauhípe, Ceará e Gavião estão localizados na sub-bacia Metropolitana; o açude Pereira de Miranda na sub-bacia Curu; e o açude Castanhão localiza-se na sub-bacia Médio Jaguaribe (SIRH/CE, 2012). A bacia Metropolitana apresenta uma situação crítica, uma vez que ela fica localizada na região metropolitana de Fortaleza, cuja demanda hídrica é intensa e também possui altos índices de poluição de carga orgânica (DBO) (MMA, 2006b). O RIMA do Porto de Pecém I prevê que a principal concorrência para o fornecimento de água é o abastecimento humano, principalmente durante o período de seca, quando a população poderá reivindicar o uso das reservas superficiais (MPX MINERAÇÃO E ENERGIA LTDA, 2006). Contudo, cabe indicar que o estudo do MMA considerou unicamente a disponibilidade hídrica destas bacias com Q_m e não com Q_{95} .

No Litoral RS 03, sub-bacia na qual encontram-se localizada as UTEs de Presidente Médici A e B, Candiota III e, futuramente, Seival, já apresenta uma situação na disponibilidade do corpo hídrico (Arroio Candiota) de muito crítica (sendo que todas estas UTEs possuem sistema de resfriamento fechado a torre úmida, que origina perda de água

por evaporação). A principal causa refere-se a que a demanda hídrica é direcionada principalmente para a irrigação de arroz, que já supera as disponibilidades mínimas anuais e de verão (SEMA, 2007). Por outro lado, cabe indicar que a bacia do Baixo Jacuí apresenta uma situação Confortável, o que difere do indicado apresentado graficamente pelo relatório da ANA (ANA, 2011b). Isto acontece porque o estudo feito pelo MMA refere-se à “Q₉₅ acumulada”, o que significa que a vazão é o somatório considerando desde a montante até jusante. As bacias que ficam na montante da sub-bacia Baixo Jacuí são as sub-bacias de Taquari, Pardo, Alto Jacuí e Vacacaí-Vacacaí Mirim. Além disso, cabe indicar, que o Rio Jacuí é um rio navegável (uso não consuntivo) que dá a importância a sua disponibilidade, sendo que em Cachoeira do Sul e Charqueadas (municípios localizados dentro do Baixo Jacuí) localiza-se um porto.

No nível estadual tem-se também estudos sobre recursos hídricos. É assim que a Secretaria de Meio Ambiente do RS (RH-RS) realizou o Relatório Síntese de Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do RS (SEMA, 2007) como parte da elaboração do plano estadual de recursos hídricos do RS. O relatório avaliou a disponibilidade hídrica baseado na demanda e o consumo real de cada uso consuntivo por bacia, o qual faz diferença com a metodologia aplicada nos estudos apresentados da ANA e o MMA. Ele também criou três indicadores relacionados especificamente ao consumo, para retratar a quantidade de água disponível que está sendo efetivamente utilizada:

- Indicador 1:

Razão entre o consumo total anual e a disponibilidade hídrica média anual (Q_m).

- Indicador 2:

Razão entre consumo total anual e a disponibilidade mínima anual (Q₉₅) . Em rios com regularização, a Q_m e Q₉₅ é acrescentada a vazão regularizada. Além disso, estas disponibilidades hídricas consideram vazões acumuladas, quanto à parcela armazenada em reservatórios artificiais (barragens) ou naturais (lagos e lagoas) que efetivamente são utilizadas para atender aos usos consuntivos.

- Indicador 3:

Razão entre o consumo durante o verão e a disponibilidade média verão. O estado do RS caracteriza-se por grandes áreas plantadas de arroz, a qual retira e consome altas quantidades de água²⁹. A necessidade de água para cultura do arroz é utilizada durante o verão. É por isso, que o relatório considerou um indicador a mais, referente à disponibilidade durante o mês de janeiro, como referencia do verão.

Assim, utilizando os indicadores propostos pela RH-RS, a classificação da situação da criticidade hídrica e os resultados são indicados nas Tabela IV.8 e Tabela IV.9 respectivamente.

Tabela IV.8: Índice da situação da criticidade dos corpos hídricos superficiais com respeito à sua disponibilidade hídrica no Estado do Rio Grande do Sul

Tipo de Balanço Hídrico	Relação (Consumo) / (Disponibilidade) - %	Enquadramento
Disponibilidade Média Anual X Consumo Total Anual	0,00 – 2,50 2,51 – 5,00 > 5,01	Confortável Alerta Crítico
Disponibilidade Mínima Anual (Q95%) X Consumo Total Anual	0,00 – 7,00 7,01 – 14,00 > 14,01	Confortável Alerta Crítico
Disponibilidade Média de Verão (janeiro) X Consumo de Verão (janeiro)	0,00 – 15,00 15,01 – 30,00 > 30,01	Confortável Alerta Crítico

Fonte: SEMA, 2007.

No RS localizam-se duas termelétricas operando com sistema de resfriamento aberto: Charqueadas e São Jerônimo na Bacia Baixo Jacuí, assim como a UTE Jacuí que conta com licença de outorga. Igualmente, com sistema de resfriamento fechado a torre úmida encontram-se duas termelétricas operando: UTE Presidente Médici A e B, e

²⁹ Na cultura do arroz o 63% da água retirada é consumida.

Candiota III na Bacia Mirim – São Gonçalo, além das UTEs em outorga Seival localizada, na mesma bacia, e UTE CTSUL localizada na Bacia Baixo Jacuí.

Tabela IV.9: Balanços Hídricos Considerados na Análise de Criticidade das Bacias Hidrográficas em Termos de Disponibilidade e Uso das Águas Superficiais no Rio Grande do Sul.

UTE	Bacia	Consumo Total Anual / Disponib. Média Anual (%)	Indicador 1	Consumo Total Anual / Disponib. Mínima Anual (Q ₉₅) (%)	Indicador 2	Consumo de Verão / Disponib. Média Verão (%)	Indicador 3
Jacuí	Baixo Jacuí	0.9	Confortável	10	Alerta	7	Confortável
CTSUL							
Presidente Médici A, B	Mirim – São Gonçalo	4.6	Alerta	78.8	Crítico	33.6	Crítico
Candiota III							
Seival							

Fonte: SEMA, 2007

O balanço hídrico mostra que a disponibilidade média anual e de verão da bacia do Baixo Jacuí está em situação confortável; porém, a disponibilidade mínima anual possui uma situação de alerta. Já com respeito à bacia de Mirim - São Gonçalo encontra-se em situação de alerta para a disponibilidade média anual, e para a disponibilidade mínima anual e média de verão mostra-se uma situação crítica, indicando a possibilidade de falta de água durante pelo menos 5% do período considerado. A SEMA (2007) indica que quando isso acontecer, a bacia é fornecida de água do volume armazenado na Lagoa Mirim, a mesma que se localiza dentro desta área hidrográfica. Além disso, segundo SEMA (2007) a irrigação corresponde o 91,63% e 96% da demanda hídrica da Bacia Baixo Jacuí e Mirim São Gonzalo respectivamente, sendo que o consumo deste uso consuntivo atinge ao 95,12% e 97,70% da total nas mesmas bacias.

Do mesmo modo, o relatório faz uma análise das demandas futuras para 2026 e indica um aumento para irrigação nas partes altas na bacia a montante do Baixo Jacuí

(Bacia Alto Jacuí), assim como no caso das bacias do Vacacai Vacacai-Mirim (bacia afluente do Baixo Jacuí) e Baixo Jacuí uma ampliação das terras para rizicultura em torno a um 10%. Além disso, para bacia Mirim são Gonçalo se encontra projetado um aumento na demanda de 10% devido à ampliação da cultura de arroz, devendo-se lembrar que aproximadamente 70% da água demandada para rizicultura é consumida.

4.3. Legislação ambiental aplicável para os sistemas de resfriamento das termelétricas a carvão mineral no Brasil

Como indicou-se na Seção 2.3, para o caso do sistema de resfriamento tipo aberto (principalmente) apresenta-se a dificuldade referida aos limites de temperatura estabelecidos por lei para a emissão nos corpos receptores. Assim, as usinas terão que reduzir a geração elétrica até poder se adequar aos requerimentos legais, adicionar um sistema de resfriamento a mais, ou alternativamente, aumentar o fluxo de corrente de água de ingresso ao condensador. Porém, deve-se considerar a penalidade energética originada pela adição de novos equipamentos ao processo geral e o aumento de custos. É assim, que apresenta-se um resumo da legislação ambiental relacionada à temperatura de emissão de efluentes líquidos das UTEs a carvão mineral com sistema de resfriamento de circulação aberta no Brasil.

Tabela IV.10: Legislação ambiental nacional do parâmetro físico Temperatura, aplicável para as usinas com sistema de resfriamento a circulação aberta.

UTE	Corpo receptor de descarga	Estado	Legislação aplicável	Padrão	Observações
Porto do Açu I	Mar	Rio de Janeiro	CONAMA ³⁰ nº 397/08	<40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura, desde que não comprometa os usos previstos para o corpo d'água.	Área relacionada ao raio de 5 km a partir do ponto de descarga do emissário marinho da UTE (RIMA) Art. 30. No controle das condições de lançamento, é vedada, para fins de diluição antes do seu lançamento, a mistura de efluentes com águas de melhor qualidade, tais como as águas de abastecimento, do mar e de sistemas abertos de refrigeração sem recirculação (CONAMA, 2005)
Jacuí	Rio Jacuí	Rio Grande do Sul	PORTARIA N.º 05/89 - SSMA	< 40°C	6.2.4 - Os efluentes, além de obedecerem aos padrões de emissão da presente Norma Técnica, não deverão conferir ao corpo receptor, características em desacordo com os critérios e padrões de qualidade da água, adequadas aos diversos usos benéficos previstos para o corpo d'água.
Charqueadas			CONAMA nº 397/08	<40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura, desde que não comprometa os usos previstos para o corpo d'água.	Art. 30. No controle das condições de lançamento, é vedada, para fins de diluição antes do seu lançamento, a mistura de efluentes com águas de melhor qualidade, tais como as águas de abastecimento, do mar e de sistemas abertos de refrigeração sem recirculação (CONAMA, 2005).
Figueira	Rio Laranjinha	Paraná	CONAMA nº 397/08	<40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá	Art. 30. No controle das condições de lançamento, é vedada, para fins de diluição antes do seu lançamento, a

³⁰ Conselho Nacional de Meio Ambiente.

				exceder a 3°C no limite da zona de mistura, desde que não comprometa os usos previstos para o corpo d'água.	mistura de efluentes com águas de melhor qualidade, tais como as águas de abastecimento, do mar e de sistemas abertos de refrigeração sem recirculação (CONAMA, 2005).
Jorge Lacerda I e II	Rio Tubarão	Santa Catarina	Portaria nº 024/79	<40°C	Subseção IV: Dos padrões de emissão de efluentes líquidos
Jorge Lacerda III	Rio Tubarão				

Fonte: ESTADO DE SANTA CATARINA, (1979), SSMA/RS (1989), USINA TERMELETRICA PORTO DO AÇU ENERGIA S/A (2008), CONAMA, (2005 e 2008).

4.4. Cenários climáticos nas áreas de localização das UTEs a carvão no Brasil.

O Brasil realizou um estudo sobre mudanças climáticas, vulnerabilidade e adaptação para América do Sul como parte de um projeto sobre a caracterização do clima e sua variabilidade do Século XX e projeções climáticas para o Século XXI, utilizando os modelos climáticos globais do IPCC referentes ao TAR (MARENGO, 2007). Esse relatório apresenta uma avaliação de projeções de clima futuro para a América do Sul usando as saídas geradas por cinco AOGCMs do IPCC. As simulações são para os cenários SRES A2 e B2, para variáveis de precipitação e temperatura do ar. Os resultados correspondem a uma avaliação das médias anuais como a variabilidade sazonal (verão, outono, inverno e primavera) apresentados em fatias de tempo de 30 anos cada um (2010-2040, 2041-2070, 2071-2100), centrados em 2020, 2050, e 2080, cada um com referência à média climática de 1961-90. Além disso, apresenta uma avaliação das projeções de mudanças nos extremos climáticos de temperatura e precipitação a nível regional: Amazônia, Nordeste, Pantanal e Bacia do Paraná-Prata e uma avaliação das projeções de fluxo (vazões) dos rios Amazonas, Paraná-Prata e São Francisco em cenários futuros de clima.

É assim que se apresenta um resumo da descrição que fazem os autores sobre o clima do Século XX nas regiões do Nordeste, Sudeste e Sul, as quais tem relação com a localização das UTEs a carvão mineral:

Tabela IV.11: Resumo do clima do Século XX nas regiões do Nordeste, Sudeste e Sul

Região	Acontecimentos do Clima Século XX
Nordeste	Variações em chuvas e vazões dos rios apresentam uma variabilidade interanual e em escalas de tempo interdecadal, que são mais importantes que as tendências de aumento ou redução. A variabilidade está associada a padrões de variação da mesma escala de tempo nos Oceanos Pacífico e Atlântico, como a variabilidade interanual associada à ENOS ³¹ , ou a variabilidade decadal do Pacífico ³² do Atlântico ³³ e a variabilidade do Atlântico tropical e do Atlântico Sul.
	Tem sido observado um ligeiro aumento de chuvas no longo prazo, mas a tendência não é estatisticamente significativa.
	O fenômeno El Niño têm impactado com secas em 1998; e secas extremas em 1932 e 1983.
Sudeste	Não apresenta um sinal claro de impactos na chuva durante o El Niño. Mas tem referência sobre temperaturas mais elevadas que o normal durante o inverno. Porém, no mês de maio de 1997 El Nino impactou com chuva de grande intensidade, época em que normalmente inicia-se o período seco.
Sul	Tendências para aumento das chuvas e vazões de rios foram observadas desde meados do Século. Têm-se registros hidrológicos da vazão do Rio Jacuí com tendência positiva. A bacia Taquari (afluente do rio Jacuí), apresenta modificações no uso do solo (floresta para culturas anuais). Assim, a mudança do uso do solo na região pode explicar em parte as tendências das vazões.
	Ocorrência de seca no verão de 2004-2005. O total de chuva anual em 2005 nesta região superou a média no Estado de Santa Catarina, porém setores leste e noroeste do Rio Grande do Sul e litoral e sul do Paraná experimentaram quedas nos índices pluviométricos. O Rio

³¹ El Niño Oscilação Sul. O ENOS representa um fenômeno de interação atmosfera-oceano, associado a alterações dos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e no Pacífico oeste próximo à Austrália (OLIVEIRA, 2012). O fenômeno El Niño pode ser caracterizado como cíclico, mas não possui um período estritamente regular, reaparecendo no intervalo de 2 a 7 anos (MARENGO, 2007).

³² PDO-Pacific Decadal Oscillation,

³³ NAO-North Atlantic Oscillation

	Grande do Sul, que apresentou quadro de seca com prejuízos para a produção agrícola e pecuária, além de problemas de abastecimento para a população.
	O índice de dias frios apresenta uma tendência negativa sugerindo que o aquecimento é mais devido ao aumento das temperaturas máximas e a uma redução na frequência de dias frios.
	O fenômeno de La Nina ³⁴ tem impactado com secas (no inverno e primavera), assim como El Niño com excesso de chuva e enchentes (desde o inverno e primavera do ano anterior ao pico do fenômeno que acontece no verão). Vazões de rios apresentam valores mais baixos durante anos de La Niña, enquanto que durante El Niño as vazões são maiores. Nos anos 1997/98 El Niño provocou fortes chuvas, ocasionando enchentes. As chuvas foram até 300% acima do normal no noroeste do Rio Grande do Sul no mês de outubro. Por outro lado, La Niña tem produzido secas na região durante 1989.

Fonte: MARENGO (2007)

O estudo MARENGO (2007), fez a avaliação dos impactos das mudanças climáticas no Brasil baseado em 05 modelos climáticos:

1. Hadley Centre for Climate Prediction and Research, da Inglaterra (HadCM3);
2. Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, da Austrália (CSIRO-Mk2);
3. Canadian Center for Climate Modeling and Analysis, do Canadá (CCCMA);
4. National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA-Geophysical Fluids Dynamic Laboratory, dos Estados Unidos (GFDL-CM2);
5. Center for Climate Studies and Research CCSR/National Institute for Environmental Studies NIES, do Japão (CCSR/NIES).

Como foi dito na Seção 3.1 os modelos globais do clima, apresentam dificuldades em representar os diferentes processos físicos, o que é visível nas simulações para o clima

³⁴ Fenômeno contrário ao El Niño, isto é, o aquecimento anormal do Pacífico Oeste e resfriamento das águas superficiais na parte central do Pacífico, eventualmente atingindo a costa do Peru. Ocorre com menor frequência que o El Niño (MARENGO, 2007).

para o tempo presente, especialmente na previsão sazonal de clima (MARENGO, 2007). Além disso, o autor indica que o grau de previsibilidade de clima e o índice de acerto do modelo mostra alta previsibilidade no Nordeste enquanto que no Sul do Brasil a previsibilidade é caracterizada como média. Na região do Sudeste a previsibilidade é baixa. Porém resulta na dificuldade em assumir que a previsibilidade e índice de acerto dos modelos rodados para o clima do presente podem ou não se manter nas projeções de clima do futuro. Em escala anual, todos os modelos apresentam um viés relativamente seco na região sul do Brasil (período de clima presente 1961-1990), sendo o maior viés negativo de 3 mm dia^{-1} dos modelos CSIRO e CCSR/NIES e o menor viés para o HadCM3 (menor a 2 mm dia^{-1}). Em escala sazonal, os cinco modelos apresentam um viés mais seco no sul do Brasil. Durante a primavera, o CCSR/NIES apresenta um viés mais seco no sudeste do Brasil, que pode chegar até -3 mm dia^{-1} . No verão, segundo as anomalias de chuva na região sudeste os modelos CCCMA, GFDL e CCSR/NIES tendem a simular uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) mais fraca, enquanto que o modelo HadCM3 apresenta uma ZCAS mais intensa. No verão, os modelos CSIRO e GFDL apresentam viés seco no sul do Brasil. No outono e inverno, os cinco modelos simulam menos chuvas na região sul. Similarmente, os cinco modelos apresentam vieses negativos pequenos na região Nordeste. Com respeito à temperatura, o modelo CCCMA e em menor grau o modelo do CSIRO apresentam vieses frios na maior parte do Brasil, com valores de até 4°C menor que a climatologia observada durante todas as estações do ano. No verão o HadCM3 aparece como o mais próximo à climatologia observada enquanto que o GFDL tende a ser mais quente no sul do Brasil.

Assim, as projeções dos cenários climáticos A2 e B2 para os cinco modelos climáticos, indicam diferentes resultados futuros de precipitação e temperatura. Os resultados apresentam diferenças nos cenários de chuva para América do Sul, mostrando às vezes anomalias de sinais opostos, especialmente para chuva dos modelos GFDL e HadCM3. O modelo GFDL possui anomalias positivas intensas de chuva no Nordeste brasileiro, enquanto que o modelo de HadCM3 apresenta secas. As anomalias parecem ser ligeiramente mais intensas no cenário A2, e no período de 2080 em relação a 2050. Os outros modelos (CCCMA, NIES/CCSR, e CSIRO) apresentam comportamento similar em

anomalias de chuva em escalas anual e sazonal. No sul do Brasil, modelos CCSR/NIES, HadCM3 e GFDL apresentam anomalias de chuva positivas, especialmente em 2050 e 2080 no cenário A2. O MCT (2010) indica a preocupação existente em caso de aumento de chuva, uma vez que a erosão nessa área aumentaria. A erosão causa a sedimentação nos reservatórios e, por este motivo, diminui a capacidade de armazenamento e oferta de água destes (MCT, 2010).

Em relação à temperatura, os diferentes modelos mostram aquecimento na América do Sul, o que tende a ser sempre maior no cenário A2 se comparado com o cenário B2. No sul e sudeste do Brasil o aquecimento chega a 2 - 3°C em 2050 e 3 - 5°C em 2080, comparado com 1 - 2°C em 2020.

Com respeito ao clima extremo, também se apresentam tendências de aumentos de temperatura em todo o Brasil, enquanto que mudanças nos extremos de precipitação podem variar para as diferentes regiões. O estudo indica que, no Nordeste os modelos apresentam sistematicamente menos chuvas e temperaturas mais altas. Já, MARENGO (2007) indica que acontecimentos de extremos climáticos recentes como as secas do Sudeste do Brasil em 2001, no sul do Brasil em 2005 e 2006 e a seca na Amazônia, em 2005, o furacão Catarina no sul do Brasil em 2004 (foi o primeiro furacão de que se tem notícia no país), poderiam ter relação com o aquecimento global; porém se carece de evidências que permitam estabelecer relações entre eles com grande certeza. O relatório também indica que alguns estudos sugerem que o aumento da temperatura das águas oceânicas estaria tornando mais intensos esses fenômenos, mas ainda há incertezas quanto à real influência do aquecimento global em mudanças na frequência de furacões e tufões e em sua ocorrência em locais onde não eram observados. Informação do estudo *PENO-9501 Estudo de Vulnerabilidades no Litoral do Estado do Rio de Janeiro devido às Mudanças Climáticas* (NEVES *et al.*, 2007) indica que alguns modelos numéricos de simulação climática sinalizam que a faixa desde o litoral Sul do Brasil até Cabo Frio (no Rio de Janeiro) passaria a ser uma região afetada por ciclones com força de furacão. A passagem de um ciclone (sistema atmosférico de baixa pressão) provoca uma elevação do nível médio do mar denominada maré meteorológica, que, no caso de furacões, pode atingir até 3m com duração de 5 a 7 dias (NEVES *et al.*,

2007). Dessa forma, acontecimentos de eventos extremos poderia impactar a vulnerabilidade das infraestruturas das UTEs.

Assim, segundo o relatório *Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos No Âmbito Regional e Urbano - Coleção Mudanças Globais* (NUNES *et al.*, 2011), indica que a região hidrográfica Baixo Paraíba do Sul – RJ, região a se localizar a UTE Porto do Açu I, possui impactos negativos como a erosão dos solos e rápido escoamento superficial o que leva ao agravamento das inundações nesta bacia. Já no início de 1997, aconteceu nessa região uma cheia, cujo período de retorno é avaliado em 50 anos. Além disso, NEVES *et al.* (2007) indica que segundo os efeitos considerados de mudanças climáticas, a área do Porto Açu seria vulnerável a uma maré meteorológica, que provocaria inundações das lagoas e canais entre cordões, e a possíveis mudanças de orientação do regime de ondas dos ventos (NEVES *et al.*, 2007).

4.5. Aplicação da metodologia proposta para determinação da disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas. Estudo de caso: UTE CTSUL

Para fins da determinação da vulnerabilidade da disponibilidade hídrica superficial para a operação das usinas termelétricas a carvão mineral no Brasil, a aplicação faz uso da metodologia proposta, qual seja o programa WEAP. O estudo de caso foi aplicado à usina térmica CTSUL, que conta com licença de outorga pela ANEEL (ANEEL, 2011c). O motivo da escolha desta UTE foi a disponibilidade de informação obtida de diferentes instituições assim como do próprio Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) apresentado pela empresa durante a obtenção da licença ambiental. A UTE CTSUL possui um sistema de resfriamento fechado à torre úmida, cuja tecnologia é a tendência das novas usinas a serem implementadas no Brasil (como foi apresentado na Seção 4.1.2). Além disso, países como os EUA e a China estão desenvolvendo pesquisas respeito à escolha e possível transição de usinas existentes com sistemas de resfriamento aberto para uma tecnologia menos dependente da água como resfriamentos fechados à torre úmida e ar seco (USEPA, 2011b, PAN *et al.* 2012). Por outro lado, uma usina a torre úmida está sujeita a um impacto

direto da temperatura do ar além do impacto indireto da temperatura da água de resfriamento, a ser desenvolvido na Seção 4.6.

Para o presente estudo o modelo do balanço hídrico construído no WEAP utilizou o método *Soil Moisture (Rainfall Runoff Method)*. Nele não se considerou a ligação com águas subterrâneas, nem a disponibilidade hídrica do ponto de vista qualitativo.

A CTSUL encontra-se localizada na sub-bacia do Baixo Jacuí, a qual pertence à Região Hidrográfica do Guaíba³⁵ no RS. Segundo a Resolução Autorizativa N° 2.097 – 2009 (ANEEL, 2009), a CTSUL entrará em operação comercial com suas duas unidades em janeiro de 2014. A usina gerará o vapor em uma caldeira a carvão pulverizado superaquecido com reaquecimento, que circulará na quantidade de 1025 t/h de vapor que alimentará duas turbinas de 325 MW de potência mecânica, totalizando uma potência instalada bruta de 650 MW dos quais 56 MW são absorvidos internamente. Portanto, a potência líquida disponível nos terminais é de 594 MW. Como parte do tratamento dos gases e partículas poluentes resultantes da queima de carvão é utilizado um sistema FGD e um precipitador eletrostático com eficiência de 99,5%. O sistema de resfriamento corresponde a um circuito fechado com torre úmida, cuja vazão de circulação da água é de 34.980 m³/h.

Entre as justificativas da empresa para a localização da UTE se encontram a proximidade com as minas de carvão de exploração viável e a disponibilidade hídrica com grande vazão (rio Jacuí). A captação de água terá um sistema adutor de 33,3 km desde o rio Jacuí. Além disso, o ponto de retirada localiza-se a 4,38 km a jusante da captação do sistema de abastecimento de água do município e a 2,46 km a jusante do balneário municipal (CTSUL, 2005). O volume aproximado de captação é de 2400 m³/h, segundo o seguinte balanço de água:

³⁵ Esta região hidrográfica responde por mais de 70% do PIB do Rio Grande do Sul. A intensa atividade econômica - industrial e agrícola - resulta numa acentuada pressão sobre os recursos naturais (CTSUL, 2005).

Tabela IV.12: Uso de água na usina de termelétrica CTSUL

		Fluxo	Unidade	Observações
Perdas (Consumo de água)				
a)	Torre de resfriamento			Representa o 3.5% da vazão de água de resfriamento na torre e o 51.25% do total retirado.
	Vaporização	1000	m ³ /h	
	Respingo	230	m ³ /h	
b)	Auxiliares e turbina	80	m ³ /h	
c)	FGD, cinza, caldeira e limpeza	245	m ³ /h	
d)	Perdas após decantação	155	m ³ /h	
Total perdas (consumo)		1710	m³/h	Representa o 71.25% do uso total.
Efluentes				
a)	Purga das caldeiras	60	m ³ /h	
b)	Purgas da torre de refrigeração	440	m ³ /h	
c)	Outros	190	m ³ /h	
Total efluentes		690	m³/h	Quantidade devolvida ao Rio Jacuí
Uso total (perdas + efluentes)		2400	m³/h	

Fonte: CTSUL, (2005)

Para a emissão dos efluentes, a legislação estadual e a CONAMA 397/08 indica que a temperatura nos corpos receptores não pode passar os 40°C. Além disso, a CONAMA acrescenta que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura para que não comprometa os usos previstos para o corpo d'água. (SSMA/RS, 1989 e CONAMA, 2008).

4.5.1. Definição espacial da área de estudo

Como se assinalou, a UTE CTSUL esta localizada na sub-bacia de Baixo Jacuí, a qual pertence à Região Hidrográfica do Guaíba. A delimitação da região hidrográfica e suas respectivas bacias e a identificação da topografia e hidrologia foram feitas com o MDE *SRTM 90m DEM version 4* do CGIAR-CSI (2004) a partir das informações georeferenciadas geradas pela SEMA referentes à limitação das bacias dentro de cada

região hidrográfica (em escala 1/250 000) e da rede hidrográfica da ANA (em escala 1/1000000). Cabe indicar que o *Datum* com que a ANA trabalha é *South America Datum* 1969 (SAD69), que antes da sua utilização foi convertido para o *Datum* WGS84, uma vez que o WEAP trabalha neste sistema geográfico.

O rio Jacuí (rio principal da bacia Baixo Jacuí) fornece água para a usina. Assim, as áreas de captação serão definidas nessa bacia. Cabe indicar que Baixo Jacuí fica à jusante das bacias Alto Jacuí e Vacacaí-Vacacaí Mirim, que também foram consideradas no estudo. Do mesmo modo, o Baixo Jacuí recebe água de outras bacias localizadas a montante dela, como Taquari e Pardo; porém, elas alimentam o Baixo Jacuí logo depois do ponto de captação de água da CTSUL, portanto não foram consideradas no estudo. No mapa a seguir (Figura IV.3) apresenta-se a região do Guaíba e as bacias de Alto Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim e Baixo Jacuí delimitadas. Além disso, apreciam-se as diferentes bandas de elevação (em metros) e a localização da UTE CTSUL.

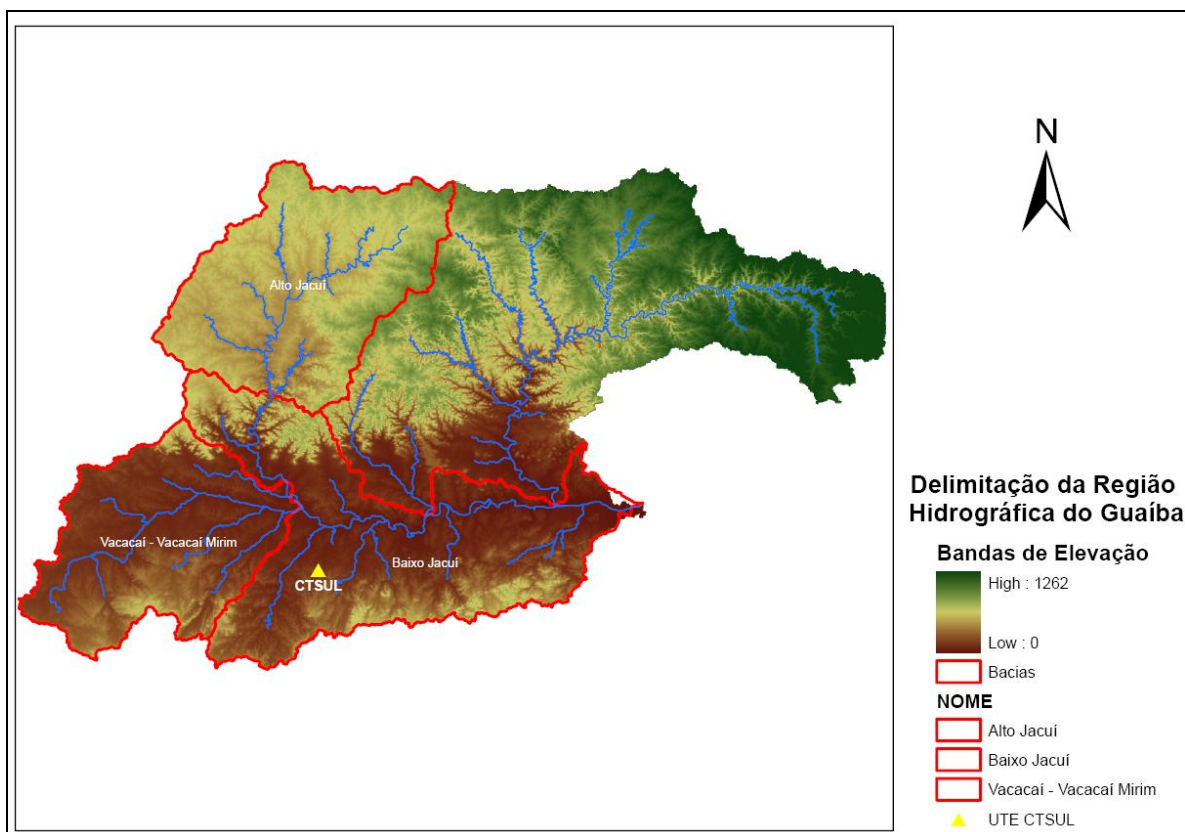


Figura IV.3: Delimitação da Região Hidrográfica do Guaíba e localização da UTE CTSUL.

Fonte: Elaboração própria

Posteriormente, tendo sido delimitadas as bacias, se identificaram no rio e seus tributários os pontos de interesse para o propósito do projeto. Entre eles estão estações de monitoramento de vazões e o ponto onde será captada a água para consumo da UTE. Logo que elas são definidas, são superpostas com as bandas de elevação do MDE para a criação das áreas de captação (unidade hidrológica de estudo).

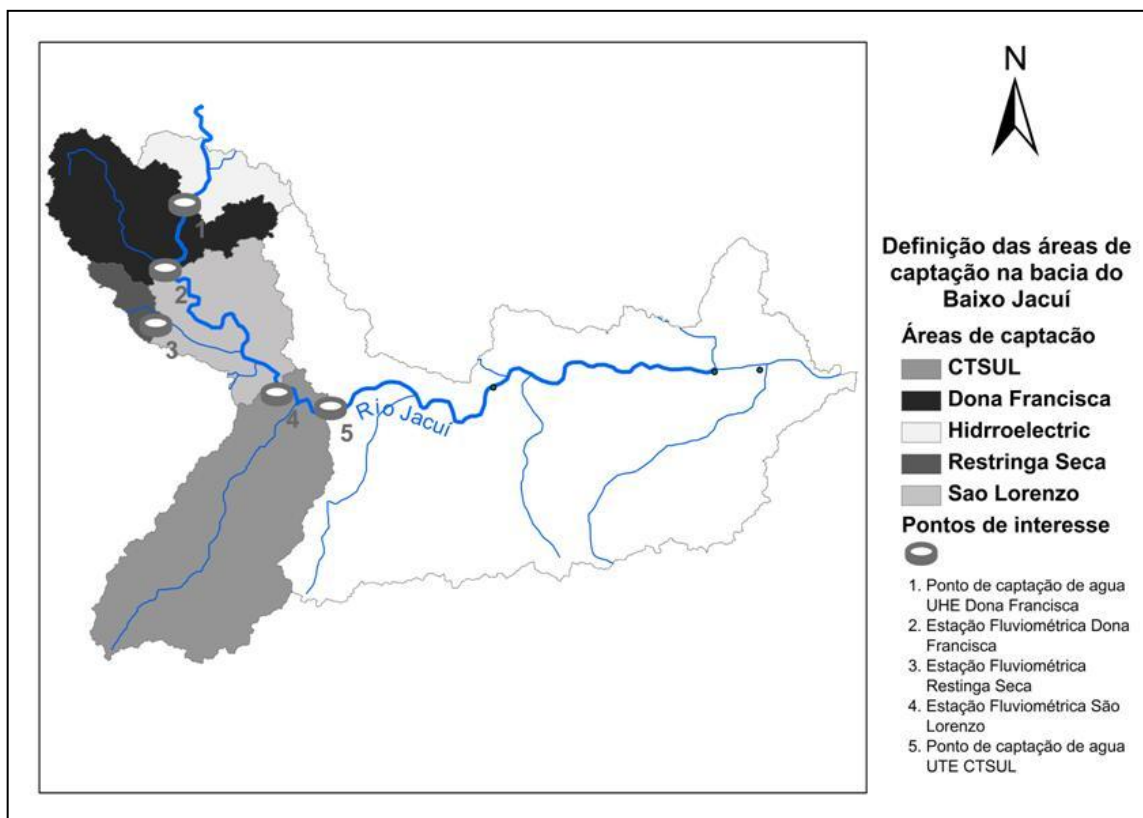


Figura IV.4: Definição das áreas de captação na bacia do Baixo Jacuí

Fonte: Elaboração própria

Na Figura IV.4 pode-se apreciar os pontos de interesse e as áreas de captação delimitadas na bacia do Baixo Jacuí. Os pontos de interesse selecionados 2, 3 e 4 são estações fluviométricas que ajudarão na calibragem do modelo. O ponto 1 corresponde à localização da hidrelétrica Dona Francisca, cujo reservatório fará com que a vazão seja regularizada a jusante. Finalmente, o ponto 5 corresponde ao ponto futuro de captação de água da UTE CTSUL. Com respeito às áreas de captação, além das áreas de CTSUL, Dona Francisca, Hidrelétrica, Restringa Seca e São Lorenzo, foram consideradas, de maneira mais geral, as áreas conformadas pelas bacias do Alto Jacuí e Vacacaí-Vacacaí Mirim, já que seus fluxos são afluentes do Baixo Jacuí. Assim, uma futura mudança da vazão devido às condições climáticas fará que o sistema mude desde a origem até o ponto de interesse do estudo, ponto de retirada da UTE CTSUL.

Após a definição das áreas de captação, realizaram-se a definição temporal, mediante a determinação dos pontos de monitoramento climatológicos (precipitação, temperatura, umidade, velocidade do vento) os quais serão comparados com os dados fluviométricos, conforme é descrito a seguir.

4.5.2. Definição temporal do estudo: Informação Climatológica e Fluviométrica

A informação com que se alimentou o modelo tem uma distribuição mensal. Cabe indicar que o modelo aceita também a introdução de informação diária, porém devido à dificuldade da disponibilidade de informação o trabalho foi feito em períodos mensais. Os dados foram obtidos de várias fontes e com unidades diferentes às solicitadas pelo WEAP, tal como se pode apreciar na tabela seguinte. Assim, teve que ser realizadas as correspondentes transformações de unidades antes que estas fossem ingressadas no modelo (Tabela IV.13).

Tabela IV.13: Fontes das variáveis climatológicas e fluviométricas para a construção do modelo em WEAP

Variável	Fonte	Unidade da fonte	Unidade lida pelo WEAP
Fluviométrica	Agência Nacional de Águas	m ³ /s	m ³ /s
Precipitação	Agência Nacional de Águas	mm/dia – mm/mês	mm/mês
Temperatura	National Climatic Data Center dos Estados Unidos	°F	°C
Umidade Relativa	National Climatic Data Center dos Estados Unidos	Ponto de orvalho em °F.	%
Velocidade do Vento	National Climatic Data Center dos Estados Unidos	Nodos	m/s

Fonte: ANA, (2011a) e NNDC, (2011)

Uma vez obtida a base de dados de cada parâmetro, se realizou a definição temporal baseada na disponibilidade de dados com o mesmo período de tempo para precipitação, temperatura e vazão. É assim, que se definiu o período compreendido entre o ano de 1987 e 2005, sendo 1987 o ano base do estudo e de 1988 a 2005 o cenário de referência. Dos três parâmetros, a temperatura conta com a menor disponibilidade de informação, sendo que foi possível identificar somente uma estação que caracterizaria toda área estudada. A seguir (Tabela IV.14 e Tabela IV.15), apresenta-se a qualidade de dados históricos mensais existentes tanto para a precipitação como para vazão, uma vez que algumas estações não possuem informação mensal requerida, pelo que o período de tempo a estudar é reduzida.

Tabela IV.14: Qualidade da disponibilidade de dados históricos mensais das estações pluviométricas na região do Guaíba.

Nº	Código ANA	Nome	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
0	3052012	SERRA DOS PEDROSAS	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	9	12	8	8	
1	3053022	CAÇAPAVA DO SUL							9	12	12	12	12	11	12	12	12	12	11	12	11	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
2	3053018	IRAPUAZINHO				11	12	12	12	12	8	11	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	11	11	7	12	12	12	9	9	12	12	12	
3	3054020	RS-473																									6	12	10	9	12	10	8	
4	3053017	PASSO DOS FREIRES		6	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	11	12	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	9	8	
5	3052011	QUITERIA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	11	12	12	10	12	12	12	12	8	8	12	10	8	
6	3054018	SAO GABRIEL						6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	10	11	12	9	12	12	12	12	10	8	12	9	8	
7	3053024	VILA NOVA																									5	12	12	9	12	10	8	
8	3053004	PASSO DO ROCHA																				1	12	11	12	12	12	12	12	9	12	10	10	
9	3052016	PANTANO GRANDE							9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	8	12	9	9	
10	3053020	SAO SEPE- MONTANTE					3	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	10	8	
11	3052017	BARRAGEM CAPAN																							1	12	12	12	10	9	12	9	8	
12	3051031	BUTIA				11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	8	
13	3053021	BARRO VERMELHO							8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	8	12	10	8	
14	3051005	GUAIBA COUNTRY CLUB	12	12	12	12	12	12	12	10	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	9	12	12	10	8	12	6	6	
15	2953037	PASSO SAO LOURENÃO							12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	8	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	11	7	
16	2951067	CHARQUEADAS						4	12	12	12	11	12	12	10	10	10	9	11	10	5	9	7	5	8	12	12	12	10	9	12	10	8	
17	2954019	QUEVEDOS	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	11	10	12	12	11	12	12	12	12	9	12	9	8	
18	2952003	BOTUCARAI	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	11	12	12	12	12	8	10	
19	2952034	CANDELARIA						5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	8	
20	2953008	DONA FRANCISCA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	10	
21	2952037	DEODORO																									5	12	11	5	12	7	8	
22	2952035	HERVEIRAS																									6	12	10	12	12	9	8	
23	2952036	BOQUEIRO DO LEAO																									5	12	12	9	12	10	8	
24	2950063	VILA TAINHAS																					8	12	12	12	12	12	10	9	12	10	9	
25	2951010	ENCANTADO	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	9	11	9	7	
26	2951070	MUÃUM								10	11	7	12	12	12	12	12	11	10	9	12	8	12	12	12	12	12	12	10	7	12	11	9	
27	2952001	BARROS CASSAL						9	12	12	12	12	12	12	12	10	10	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	9	8	
28	2952038	SAO JOSÉ DO HERVAL																									4	10	12	9	12	10	8	
29	2850016	CAZUZA FERREIRA																								12	12	12	12	12	9	12		
30	2851021	PASSO DO PRATA	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	10	8	11	11	12	
31	2850009	PASSO TAINHAS	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	8	12	12	12	12	12	12	12	9	12	
32	2851003	ANTÊNIO PRADO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	9	12	10	12	
33	2851044	GUAPOR						8	12	12	12	12	12	4	10	12	9		5	7	12	12	12	12	12	12	12	10	8	7	11	2	9	
34	2852050	NAO-ME-TOQUE						8	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	12	12	12	12	12	6	9	12	9	12	
35	2851024	PRATA	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	11	10	9	7	11	12	12	
36	2853014	SANTA CLARA DO INGAÍ	12	12	12	12	12	12	9	12	12	12	10	12	108	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	11	12	9	12	10	12
37	2850020	MONTE ALEGRE DOS CAMPOS																								1	12	12	12	8	12	11	12	
38	2853028	ANDERSON CLAYTON	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	11	10	12	12	12	12	10	10	12	11	12	12	
39	2852054	SELBACH																									3	12	6	12	12	11	12	
40	2851022	PASSO MIGLIAVACA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	9	12	9	12	

Tabela IV.15: Qualidade da disponibilidade de dados históricos mensais das estações fluviométricas na região do Guaíba.

Nº	Codigo ANA	Nome	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
0	85610000	PASSO DOS FREIRES					12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
1	85470000	PONTE SAO GABRIEL	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	1	4	12	12	11	12	
2	85480000	PASSO DO ROCHA	12	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	4		12	12	10	12	12	
3	85623000	SAO SEPÉ - MONTANTE					2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
4	85642000	PASSO SAO LOURENÃO		7	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
5	85900000	RIO PARDO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	4	12	12	8	11
8	85600000	PASSO DAS TUNAS	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	5	7			3	3	8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
11	85438000	RESTINGA SECA	12	12	9	8	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	8	11	12	12	11	12	12	11	12	11	9	7	12	11	11	12	
12	85830000	SANTA CRUZ - MONTANTE	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4	4	12	12	12	6	12	12	12	12	12	12	9	11	12	12	12	12	10	8	
14	85735000	CANDELARIA MONTANTE																							7	11	6	12	12	12	12	12	12	8
15	85400000	DONA FRANCISCA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	
16	86720000	ENCANTADO				12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	8					7	8	7	7	8	7				8
17	86745000	PASSO DO COIMBRA	12	12	12	8	12	11	12	12	9	12	12	12	8	12	12	11	11	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12
18	86700000	PONTE JACARÉ	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	8
19	86510000	MUÃUM	11	12	12	12	12	9	9	12	11	8	12	12	12	12	12	12	7	8	12	12	12	12	12	12	12	9	12	12	10	5	10	
20	86580000	SANTA LUCIA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	8	2		3	12	12	12	12	8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	9	5
21	86560000	LINHA COLOMBO	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	4		4	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	11	11	
22	86160000	PASSO TAINHAS	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	5	12	12	12	12	
23	86500000	PASSO CARREIRO	12	11	12	12	12	12	12	6	7	12	12	10	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	
24	86100000	PASSO DO GABRIEL	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	
25	86410000	PASSO BARRA DO GUAIÁV	12	12	12	12	12	12	12	10	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
26	86420000	PONTE DO PRATA	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
27	86480000	PASSO MIGLIAVACA	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	12	12	7	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11

A. Precipitação.

Na região hidrográfica do Guaíba foram identificadas 46 estações pluviométricas. Porém, somente foram consideradas 31 estações devido à qualidade da série histórica mensal. Assim, após o preenchimento das lacunas de dados faltantes em algumas estações, determinou-se a distribuição das chuvas em toda área de estudo com isoietas, conforme colocado na Seção 3.2.4. Nesse caso as isoietas foram desenhadas com os totais médios anuais das séries temporais consideradas em cada área de captação. A seguir, mostra-se a relação das estações pluviométricas que foram escolhidas para realizar a distribuição na região do Guaíba (Tabela IV.16) e o esquema das isoietas nas áreas de captação (Figura IV.5).

Tabela IV.16: Estações pluviométricas utilizadas para o desenho das isoietas na região do Guaíba

Nº	Codigo ANA	Nome	Latitude	Longitude	Altitude	mm_anual
0	3052012	SERRA DOS PEDROSAS	-30.6253	-52.8400	400	1661.705
1	3053022	CAAPAVA DO SUL	-30.5194	-53.4917	420	1714.758
2	3053018	IRAPUAZINHO	-30.4872	-53.1183	120	1465.674
3	3053017	PASSO DOS FREIRES	-30.4353	-53.7125	200	1591.802
4	3052011	QUITERIA	-30.4189	-52.0736	300	1568.224
5	3054018	SAO GABRIEL	-30.3575	-54.3181	120	1520.393
6	3052016	PANTANO GRANDE	-30.1983	-52.3725	40	1427.403
7	3053020	SAO SEPÉ - MONTANTE	-30.1936	-53.5644	60	1607.489
8	3051031	BUTIA	-30.1589	-51.9311	60	1607.977
9	3053021	BARRO VERMELHO	-30.1406	-53.1589	100	1581.011
10	3051005	GUAIBA COUNTRY CLUB	-30.0889	-51.6236	40	1362.150
11	2953037	PASSO SAO LOURENCO	-30.0089	-53.0150	20	1605.862
12	2954019	QUEVEDOS	-29.8514	-54.0669	408	1717.795
13	2952003	BOTUCARAI	-29.7128	-52.8900	80	1783.599
14	2952034	CANDELÁRIA	-29.6694	-52.7903	40	1819.122
15	2953008	DONA FRANCISCA	-29.6244	-53.3519	25	1857.632
16	2951010	ENCANTADO	-29.2378	-51.8594	60	1511.684
17	2952001	BARROS CASSAL	-29.0853	-52.5847	620	1877.343
18	2851003	ANTÔNIO PRADO	-28.8533	-51.2844	630	1885.711

19	2851024	PRATA	-28.7561	-51.6283	680	1805.469
20	3153006	PASSO DA CAPELA	-31.1342	-53.0539	120	1447.300
21	3051004	CERRO GRANDE	-30.5939	-51.7567	120	1568.600
22	3153017	TORRINHAS	-31.3142	-53.4994	420	1544.782
23	2853028	ANDERSON CLAYTON	-28.6586	-53.6047	440	1787.490
24	2951070	MUÇUM	-29.1664	-51.8681	240	1681.879
25	2852050	NAO-ME-TOQUE	-28.4553	-52.8158	491	1871.6342
26	2853014	SANTA CLARA DO INGAI	-28.7286	-53.1858	390	1610.142
27	3054002	DOM PEDRITO	-30.9781	-54.6758	120	1456.763
28	2852007	COLÊNIA XADREZ	-28.1883	-52.7453	593	1869.989
29	2851022	PASSO MIGLIAVACA	-28.6200	-51.8661	380	1962.600
30	2953030	TUPANCIRETA	-29.0856	-53.8219	469	1925.944
31	2853026	CHAPADA	-28.0586	-53.0661	450	1873.250

Fonte: ANA, (2011a)

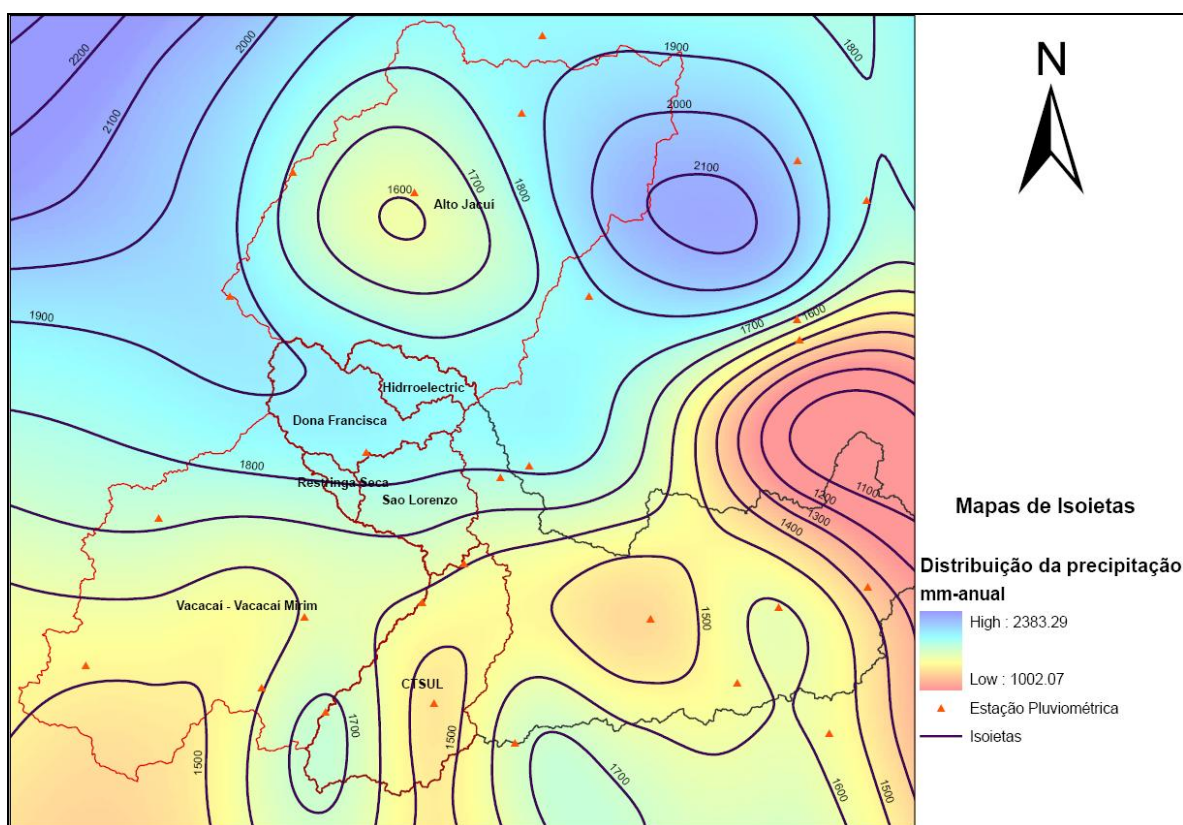


Figura IV.5: Criação de isoietas nas áreas de captação.

Fonte: Elaboração própria

Obtidas as isoietas, identificou-se o valor mais representativo de cada área de captação (Tabela IV.17), para então ser comparado com o valor de precipitação da estação base escolhida para cada área de captação. Finalmente, aplicou-se um fator de correção (mediante a relação de ambos os valores) para corrigir as séries históricas das estações pluviométricas base.

Tabela IV.17: Valores da estação pluviométrica base, isoietas e valor de correção por cada área de captação.

Áreas de captação.	Estação pluviométrica base representativa da área de captação	Valor de precipitação média anual da estação base (mm)	Valor da Isoieta representativa da área de captação (mm)	Valor de correção
Hidroelétrica	Dona Francisca	1857.632	1950	1.05
Dona Francisca	Dona Francisca	1511.684	1900	1.26
Restinga Seca	Dona Francisca	1877.343	1800	0.96
São Lorenzo	Botucarai	1783.599	1750	0.98
CTSUL	Barro Vermelho	1581.011	1600	1.01
Vacacaí – Vacacaí Mirim	São Sepé - Montante	1607.489	1600	1.00
Alto Jacuí	Santa Clara do Ingai	1610.142	1800	1.12

Fonte: Elaboração própria

B. Temperatura, Umidade Relativa e Velocidade do Vento.

Somente se conseguiu obter informação de uma estação meteorológica, estação Santa Maria (-29,70N e -53,70S), devido à pouca disponibilidade de informação. Esta estação fornece informação da temperatura, umidade e velocidade do vento. Assim, os valores foram considerados como homogêneos em todas as áreas de captação. Cabe indicar que, para o caso da área do Alto Jacuí, aos dados de temperatura foi aplicado a equivalência $0.006^{\circ}\text{C} / \text{m}$ pela diferença de altitude. Isto foi igualmente feito para a umidade relativa, uma vez que para poder converter do ponto de orvalho (temperatura a bulbo úmido) à umidade relativa é necessário saber o valor da temperatura do ar (temperatura a bulbo seco). Finalmente, a velocidade do vento no Alto Jacuí foi considerada uma constante de 2 m/s, uma vez que esse é o valor padrão dado pelo WEAP.

4.5.3. Uso do solo e cobertura vegetal

Os dados sobre a cobertura vegetal e uso do solo da área de estudo foram obtidas pela informação digital (em SIG) disponível na EMBRAPA (2005), cujo ano do mapeamento se refere ao ano 2000. Cabe indicar que o *Datum* com que a EMBRAPA trabalha é *South America Datum* 1969 (SAD69), que antes da sua utilização foi convertido para o *Datum* WGS84. De acordo com a informação da cobertura do solo na área de estudo, a classificação foi reduzida para a seguinte classificação: agricultura, pastagem e mata nativa (Tabela IV.18).

Tabela IV.18: Classificação da cobertura do uso do solo original e agrupação utilizada no modelo

Classificação EMBRAPA		Classificação WEAP
Agriculture/Intensive	Agriculturas e pastagens permanentes dominantes	Agricultura
Agriculture/Mosaic of degraded forest vegetation	Mosaicos de agricultura, pastagens e vegetação arbórea alterada	Pastagem
Grass and shrub lands/Steppe vegetation-Closed grassland	Campos limpos	
Grass and shrub lands/Tropical savannahs-Flooded savannah	Campos inundáveis	
Dry tropical forests/Deciduous forests - Closed	Florestas estacionais decíduais densa	Mata Nativa
Grass and shrub lands/Shrublands-Closed	Florestas arbustivas-arbóreas densa	
Grass and shrub lands/Shrublands-Open	Florestas arbustivas-arbóreas aberta	
Grass and shrub lands/Tropical savannahs-Shrub savannah	Savanas arbustivas	
Humid forests/Evergreen broadleaf - Closed	Florestas ombrófilas densa	
Humid forests/Evergreen broadleaf - Open	Florestas ombrófilas aberta	

Fonte: Adaptação de EMBRAPA, 2005

Na classificação da EMBRAPA (2005) para a área de estudo, não se distinguiu as áreas urbanas ou industriais devido à escala com que foi apresentada e disponibilizada pela internet. Com respeito às áreas com agricultura, foram consideradas como representativas as culturas de arroz, soja, milho, fumo e trigo. Uma das considerações para a eleição dessas

culturas foi a disponibilidade de informação dos parâmetros do balanço hídrico do solo, como o K_c , necessários para a modelagem no WEAP. Além disso, o Censo Agropecuário 2006 feito pelo IBGE (2009) assinala estas culturas como representativas no RS, sendo a soja que possui maior representatividade. Por outro lado, SEMA (2007) indica que o setor de irrigação retira 91,63% da demanda total de água na bacia Baixo Jacuí, cujo consumo consuntivo atinge 95,12% da mesma bacia, sendo o arroz o maior usuário de todos.

Para poder determinar as áreas das diferentes culturas para cada área de captação, foi feita uma superposição das camadas de cobertura vegetal dos municípios do RS e as áreas de captação no ArcMap. Assim, conseguiu-se relacionar a área de cada cultura pertencente a cada área de captação. Cabe indicar que, assumiu-se que em uma mesma área se realiza a plantação de soja e trigo, assim como de fumo e milho, já que são lavouras temporárias e se acostuma trabalhar a terra para esses plantios de forma alternada (HELPER, 2006) (ver Tabela IV.19).

Tabela IV.19: Uso do solo da área de estudo durante as estações do ano.

Verão	Outono	Inverno	Primavera
Soja	Trigo	Trigo	Soja
Arroz	Reserva	Campo	Arroz
Milho	Milho	Fumo	Fumo
Mata Nativa	Mata Nativa	Mata Nativa	Mata Nativa
Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem

Fonte: HELPER (2006)

Tomando como referência o ano do mapeamento da cobertura do uso do solo (ano 2000), se utilizou a informação do SIDRA do IBGE (2012), com a finalidade de obter as áreas plantadas de cada cultura por município no mesmo ano que o estudo da EMBRAPA para, então, determinar a porcentagem correspondente em cada área de captação (ver Tabela IV.20). Assim, conseguiu-se criar o seguinte mapa (Figura IV.6) com a classificação de cobertura do uso do solo por área de captação.

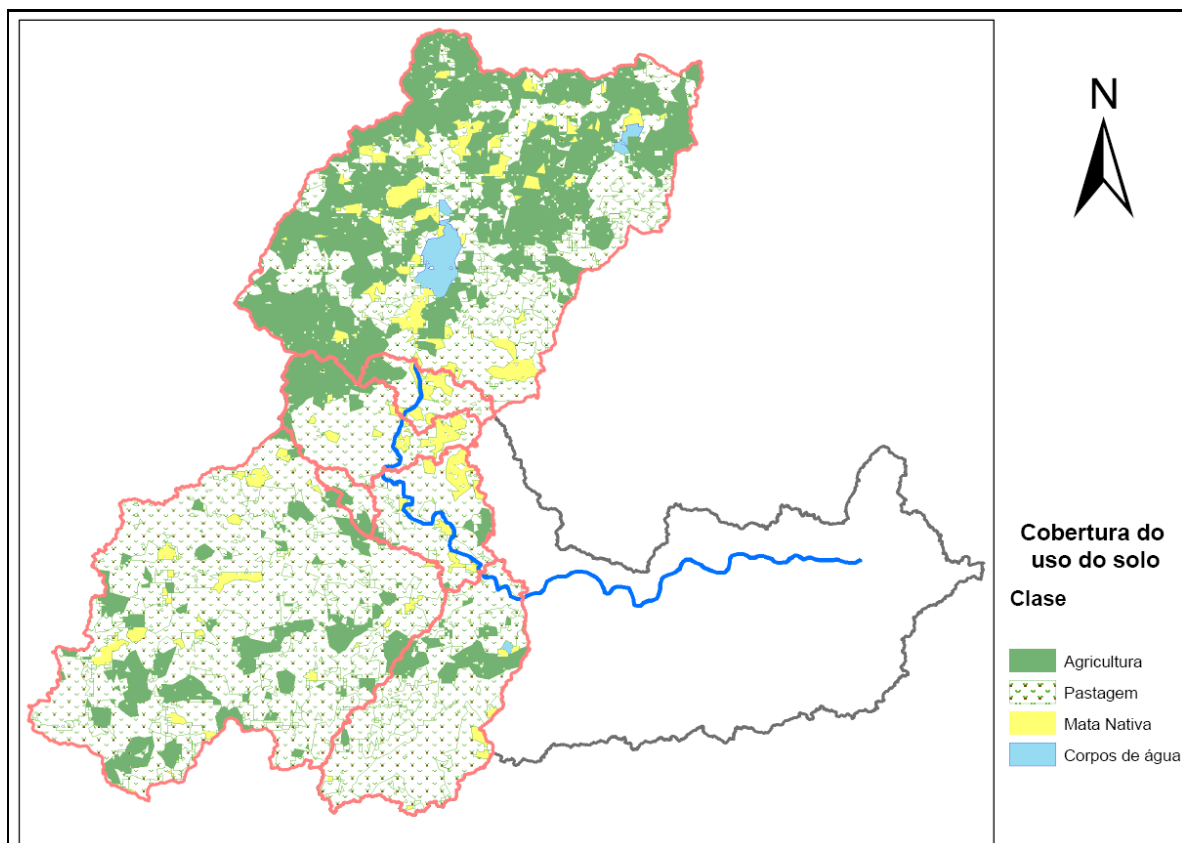


Figura IV.6: Mapa da cobertura do uso do solo para WEAP

Fonte: Elaboração própria em base a EMBRAPA (2005)

Tabela IV.20: Distribuição da cobertura do uso do solo

Nome	Área Total (Ha)	Agricultura (Ha)			Pastagem (Ha)	Mata Nativa (Ha)
		Arroz	Soja - Trigo	Fumo - Milho		
Hidroelétrica	63817,4486	561,593548	7581,5129	5896,73225	35099,5967	14678,0132
Dona Francisca	172679,811	10827,0242	17716,9486	4265,19134	122602,666	17267,9811
Sao Lorenzo	144066,14	19160,7966	3284,70798	4927,06197	97964,9749	18728,5981
Restringa Seca	23299,7265	368135,679	83879,0156	13979,8359	18639,7812	0
CTSUL	344811,848	21412,8158	9309,91991	310,330664	234472,057	79306,7251
Alto Jacuí	1265957,45	4937,23405	478911,703	9874,46809	405106,383	367127,66
Vacacaí-Vacacaí Mirim	1064681,87	71152,6894	4338,57862	11280,3044	810968,18	166942,117

Fonte: Elaboração própria

De maneira preliminar incorporam-se os parâmetros agronômicos a utilizar no balanço hidrológico do solo no WEAP. Os parâmetros foram obtidos de um estudo sobre disponibilidade hídrica da bacia do rio Pardo (HELFER, 2006), bacia localizada a montante do Baixo Jacuí e contígua à bacia do Alto Jacuí. Para os valores dos parâmetros que não foram identificados nesse estudo, foram considerados os valores default do WEAP. Assim, a seguir apresenta-se os valores considerados no modelo.

Tabela IV.21: Coeficiente de Cultura por Variação Temporal

Kc		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Sep	Out	Nov	Dez
Agricultura	Arroz	1,3	1	0,3	0,3	0,3	1	1	1	1	0,4	1,1	1,2
	Soja	1,1	0,9	0,5	0,3	0,3	0,5	0,95	1,1	0,25	0,3	0,4	0,8
	Fumo	1	1,2	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,75	1,1	0,8	0,4
Pastagem		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mata Nativa		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Fonte: HELFER (2006)

Tabela IV.22: Parâmetros agronômicos utilizados no modelo

Parâmetros	Agricultura			Pastagem	Mata Nativa
	Arroz	Soja	Fumo		
Capacidade hídrica do perfil superior (mm)	53,3	100	100	1000*	1000*
Capacidade de retenção da umidade no perfil profundo (mm)	1400	1400	1400	1400	1400
Fator de Resistência ao escoamento (RRF)	8	2*	2*	2*	2*
Condutividade no perfil superior (mm/mês)	20*	20*	20*	20*	20*
Condutividade no perfil profundo (mm/mês)	40	40	40	40	40
Direção do fluxo	0,9	0,15*	0,15*	0,15*	0,15*
Nível de umidade do perfil superficial - Z1 (%)	34,5	34,5	34,5	38,6	45
Nível de umidade em zona profunda - Z2 (%)	47	47	47	47	47

* Dados sugeridos pelo WEAP (default)

Fonte: HELFER (2006)

Finalmente, foi considerado que para os meses novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, o solo onde se localiza a cultura de arroz deve ter uma camada de água mínima de 50 mm e máxima de 170 mm (HELPER, 2006). Nesse caso, foi considerado que a irrigação é feita mediante o uso direto da água. Porém, segundo SEMA (2007), existem algumas áreas de cultura de arroz que possuem barragens e lagoas, que não puderam ser identificadas no estudo de caso.

4.5.4. Outras demandas hídricas

As outras demandas hídricas foram consideradas para as áreas de captação da Bacia do Baixo Jacuí, conforme apresentado a seguir.

A. Criação de animal (Dessendentação)

Foi selecionado o rebanho suíno como representativo desse uso consuntivo no Baixo Jacuí. Essa demanda hídrica se justifica por ser o maior usuário com respeito à quantidade, atingindo 85 L/cab/dia, sendo que seu consumo chega até 70% do uso por cabeça de suíno SEMA (2007). Além disso, o relatório do SEMA (2007) indica que, em relação à pecuária, a produção de suínos apresenta a maior relevância em termos de impactos sobre o ambiente natural e sobre os recursos hídricos, sendo que uma das regiões hidrográficas no RS que concentra a maior produção de suíno é a Guaíba. O RS representa cerca de 14% do rebanho suíno nacional (IBGE, 2010). Além disso, o rebanho suíno caracteriza-se por ficar próximos à produção de grãos (soja e milho), cultura que é característica da área de estudo.

Para poder determinar a distribuição por área de captação foi necessário a superposição das camadas de municípios do RS e as áreas de captação no ArcMap para calcular a porcentagem da área de cada município dentro de cada área de captação. Logo em seguida, com dados do SIDRA do IBGE, analisou-se a produção. Considerando um crescimento anual geométrico do rebanho suíno no RS (em cabeças) desde o ano base 1987

a 2005 determinou-se um crescimento de 0,5% anual³⁶. Posteriormente, se quantificou o número de cabeças por município/área de captação do ano base aplicando o crescimento de 0,5% anual até o ano 2005 para cada caso. Assim, na tabela Tabela IV.23 se mostra a quantidade de cabeças de suíno por área de captação considerada para o modelo no ano base de 1987.

Tabela IV.23: Quantidade de cabeças de suíno para o ano base de 1987 por área de captação.

Áreas de captação	Cabeça de suíno no ano base de 1987
Hidroelétrica	34216
Dona Francisca	42839
Restinga Seca	2589
São Lorenzo	19036
CTSUL	24744

Fonte: Elaboração própria

B. Abastecimento humano

A Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) abastece dois terços da população do Estado distribuídos em mais de 321 localidades com água potável (CORSAN, 2012). A Secretaria do Meio Ambiente do RS publica informação para algumas outorgas cedidas sob sua jurisdição (SEMA, 2012). Foi assim que identificou-se uma retira água com uma vazão autorizada de $0,29\text{m}^3/\text{s}$ pela CORSAN a montante do ponto de captação da UTE CTSUL. Por outro lado, o SEMA (2007) assinala que a demanda urbana de água per capita varia entre 125 e 250 L/dia/hab e, para abastecimento rural, a demanda atinge o 125 L/dia/hab. Assumiu-se, então, que o abastecimento rural realiza-se mediante poços subterrâneos e considerou-se para o presente trabalho somente o abastecimento urbano, tomando a média da demanda per capita de 190 L/dia/hab. Assim, o total de população beneficiada pela retirada nesse ponto do rio é de 130000, o qual será considerada como

³⁶ Em um crescimento exponencial ou geométrico assume-se que a população cresce a uma taxa constante, que significa que aumenta proporcionalmente em cada período de tempo, mas em valores absolutos. (INEI, 2012)

permanente desde o ano base até o final do cenário de referencia (2005) para a respectiva calibragem.

C. Outras demandas hídricas não consideradas

Não foram consideradas a demanda hídrica para uso industrial, nem as demandas dos outros tipos de criação de animal (bovinos de corte, bovinos de leite, equinos, ovinos, galinhas, galos e frangos).

4.5.5. Infraestrutura física de reservatórios com regulador de vazão.

A identificação de reservatórios foi priorizada para as área de captação na bacia do Baixo Jacuí. Assim, identificou-se a usina hidroelétrica Dona Francisca, a qual possui um reservatório de 335 milhões de m³ de capacidade (RODRIGUEZ, 2002).

A usina começou a operar em 2001. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (2007), a usina deverá respeitar uma vazão mínima de 212 m³/s, uma vez que o rio Jacuí é navegável (uso não consuntivo), além de garantir o atendimento nas solicitações referentes à captação de água para a irrigação da produção de arroz, e do abastecimento dos municípios ali localizados (ONS, 2007). Além disso, o reservatório tem uma restrição a mais, referente à vazão do efluente máxima, 1450 m³/s nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, novembro e dezembro. Essa restrição da vazão máxima tem como objetivo manter o rio em sua calha e evitar que se alaguem áreas de cultura (ONS, 2007).

4.5.6. Alocação de prioridades

WEAP permite alocar prioridades de cada demanda hídrica. Assim, se colocou prioridade 1 para todas as atuais demandas hídricas descritas anteriormente, sendo que o ingresso futuro da demanda da UTE CTSUL, será considerado como uma prioridade de demanda de 2.

4.5.7. Calibragem do modelo

Realizaram-se comparações entre as vazões históricas observadas (monitoradas) e os dados simulados no WEAP no rio principal Jacuí para as estações de Dona Francisca e São Lorenzo. A Tabela IV.24, apresenta os resultados do grau de correspondência do índice de eficiência de *Nash-Sutcliffe* e do índice de *BIAS*. Igualmente, na Figura IV.7 e Figura IV.8 podem-se apreciar a vazão média mensal simulada e observada para cada estação fluviométrica.

Tabela IV.24: Índice de eficiência de Nash-Sutcliffe e Índice de BIAS para a construção do modelo para disponibilidade hídrica para UTE CTSUL.

Estação fluviométrica	Nash-Sutcliffe	BIAS
Estação Dona Francisca	0,31	-4,45%
Estação São Lorenzo	0,56	-11,44%

Fonte: Elaboração própria

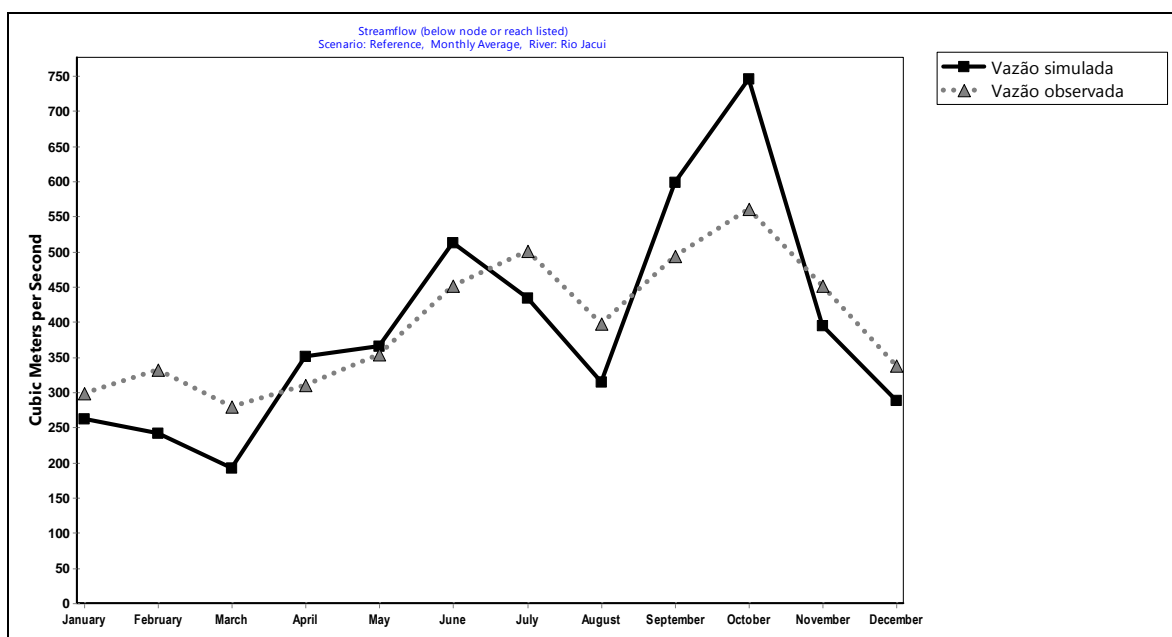


Figura IV.7: Vazão observada e simulada no ponto localizado na estação fluviométrica Dona Francisca.

Fonte: Elaboração própria

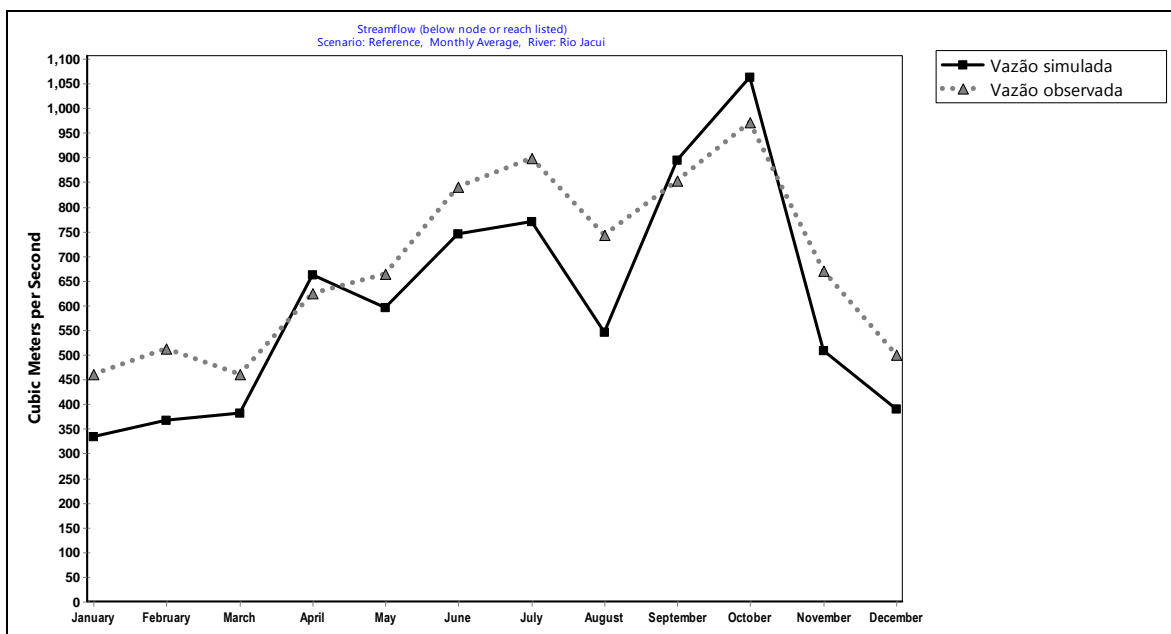


Figura IV.8: Vazão observada e simulada no ponto localizado na estação fluviométrica São Lorenzo.

Fonte: Elaboração própria

As estações Dona Francisca e São Lorenzo ficam a montante do ponto de captação da UTE CTSUL no rio Jacuí. Como foi assinalado anteriormente, valores próximos a 1,0 para o índice do *Nash-Sutcliffe* indicam que o modelo hidrológico construído é parecido com o observado. Igualmente para o caso do indicador *Bias*, valores com porcentagem pequena indicam uma boa construção do modelo. Além disso, o valor negativo do índice de *Bias* indica uma subestimação na modelagem das vazões. No indicador *Bias* os resultados da calibragem para estação Dona Francisca são menores do que estação São Lorenzo, uma vez essa estação fica mais próxima à cabeceira do Rio Jacuí no modelo hidrológico construído. Isto é evidenciado uma vez que no curso do rio apresentam-se rios tributários e usuários não identificados o que fazem que o indicador aumente o erro conforme se afasta da cabeceira da bacia no modelo hidrológico.

4.5.8. Construção das projeções dos cenários climatológicos e outros usos consuntivos para 2050

Após calibrar o modelo hidrológico no WEAP procedeu-se a fazer as rodadas com as projeções futuras de clima. Para o desenvolvimento das projeções climáticas foram considerados quatro modelos climáticos dos cinco apresentados por MARENGO (2007). Assim, os modelos climáticos globais considerados foram: GFDL_CM2, CGCM3.1, MIROC3.2 e UKMO-HadCM3 e para os cenários A2 e B1. O uso de vários modelos climáticos para uma mesma área de estudo permite avaliar a variabilidade entre eles, levando em conta a dispersão entre as saídas dos modelos. Desta maneira, poder-se-ia tentar uma redução de incertezas das previsões considerando não só um, mas vários cenários de vários modelos (MARENGO, 2007).

Cabe indicar que, a análise realizada por MARENGO (2007) foi feita com base TAR do IPCC (2001), mas a informação utilizada neste estudo é baseada nas rodadas de AOGCMs para o AR4 do IPCC (2007), sendo que, as resoluções horizontais e verticais dos modelos aumentaram do TAR para o AR4. Esses aumentos fazem com que as características climáticas em escala regionais e globais sejam melhores representadas (IPCC, 2007). Na tabela seguinte apresenta-se a diferença dos modelos climáticos entre o TAR e o AR4.

Tabela IV.25: Diferenças na resolução dos modelos climáticos globais entre o TAR e o AR4 do IPCC.

TAR			AR4		
Nome do Modelo	Resolução Atmosférica	Resolução nos Oceanos	Nome do Modelo	Resolução Atmosférica	Resolução nos Oceanos
CCSR/NIES	T21 (5.6 5.6) L20	2.8 2.8 L17	MIROC3.2 (hires), 2004	T106 (~1.1° x 1.1°) L56	0.2° x 0.3° L47
			MIROC3.2 (medres)	T42 (~2.8° x 2.8°) L20	0.5°–1.4° x 1.4° L43
CGCM1	T32 (3.8 3.8) L10	1.81.8 L29	CGCM3.1(T47), 2005	T47 (~2.8° x 2.8°) L31	1.9° x 1.9° L29

CGCM2	T32 (3.8 3.8) L10	1.81.8 L29	CGCM3.1(T63), 2005	T63 (~1.9° x 1.9°) L31	0.9° x 1.4° L29
GFDL			GFDL-CM2.0, 2005	2.0° x 2.5° L24	0.3°–1.0° x 1.0°
HadCM3	2.5 3.75 L19	1.25 1.25 L20	UKMO- HadCM3, 1997	2.5° x 3.75° L19	1.25° x 1.25° L20
			UKMO- HadGEM1	~1.3° x 1.9° L38	0.3°–1.0° x 1.0° L40

Fonte: IPCC (2001 e 2007)

O software *FERRET* (NOAA, 2011) serviu como ferramenta para trabalhar a informação dos modelos climáticos globais tanto no *baseline* como nas projeções futuras. Foram utilizadas as projeções dos AOGCMs baseadas nos cenários de emissão de GEE A2 e B1 segundo IPCC (2000).

Como foi colocado na Seção 3.1 é necessário realizar correções dos dados dos AOGCMs, e assim para se evitar a transferência das distorções do modelo com relação ao clima presente para as projeções de clima futuro. O método utilizado para realizar os respectivos fatores de ajuste (*downscaling* estatístico) foi o *bias correction*, uma vez que o período de correção conta com somente 14 anos (1987-2000)³⁷, além disso, a utilização do método do *change factor* originaria uma descontinuidade na geração da série temporal dos valores climáticos projetados. Ademais, como foi dito, o *bias correction* possui maior consistência na variabilidade das projeções dos modelos climáticos. Assim, conseguiu-se obter fatores de ajuste mensais de temperatura e precipitação. Para a temperatura, este fator de ajuste é a diferença entre a temperatura média mensal observada e *baseline* (HAWKINS *et al.*, 2012). No caso da precipitação, este fator de ajuste considera a divisão entre as médias mensais de precipitação observada e do *baseline* (BERG *et al.*, 2012). Tendo os fatores de ajuste mensais para cada estação base, se obtiveram as projeções corrigidas de clima futuro para os cenários A2 e B1 para cada AOGCM. Para o caso da temperatura, o fator de ajuste de cada mês é adicionado ao valor original da projeção futura. Além disso, para o caso da precipitação, o valor da projeção climática futura é multiplicado pelo fator de ajuste mensal (BERG *et al.*, 2012).

³⁷ No caso do UKMO-HadCM3, esse período é reduzido para 13 anos, uma vez que esse AOGCM não tem projeções para o ano 2000.

O período de aplicação de clima futuro para cada cenário é compreendido entre 2006 e 2050, uma vez que o tempo de vida de uma termelétrica a carvão mineral é considerada de 30 anos (EPE, 2007b), o que não justifica um período de análise de prazo mais longo (por exemplo, até 2100). Dessa forma, a análise de resultados será no período de 30 anos compreendido do 2021 e 2050. Devido às incertezas com respeito aos AOGCM, considera-se que cada projeção climática tem a mesma probabilidade de ocorrência.

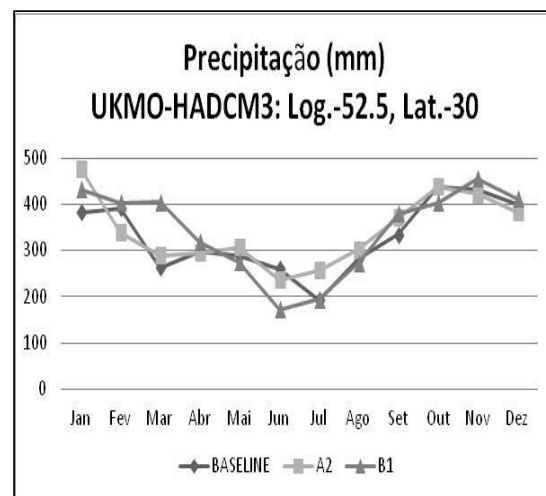
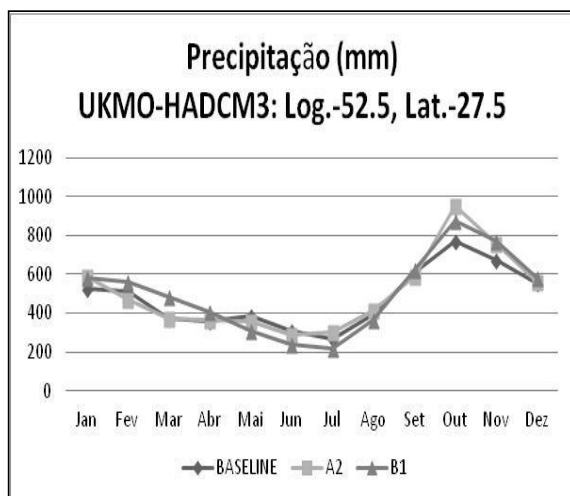
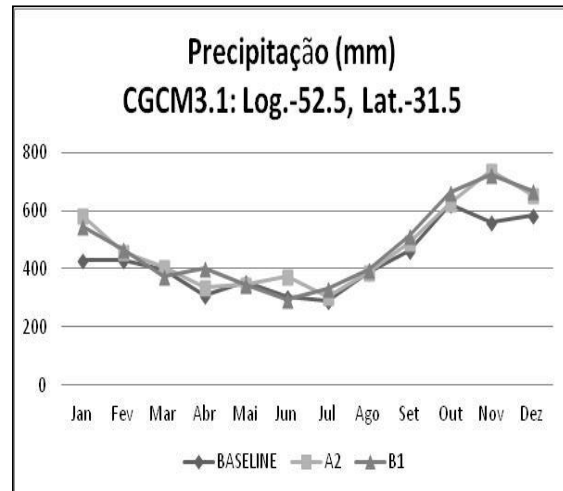
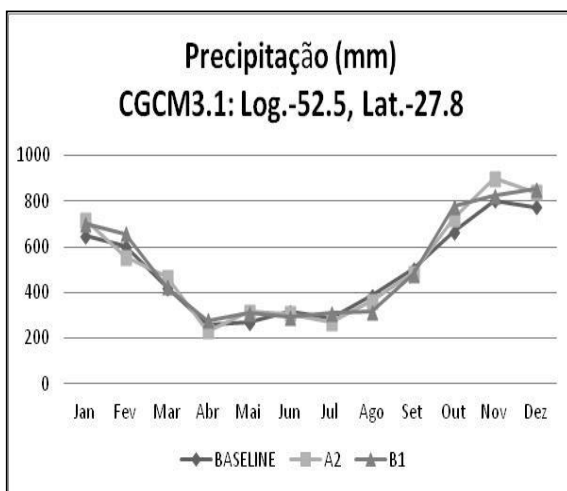
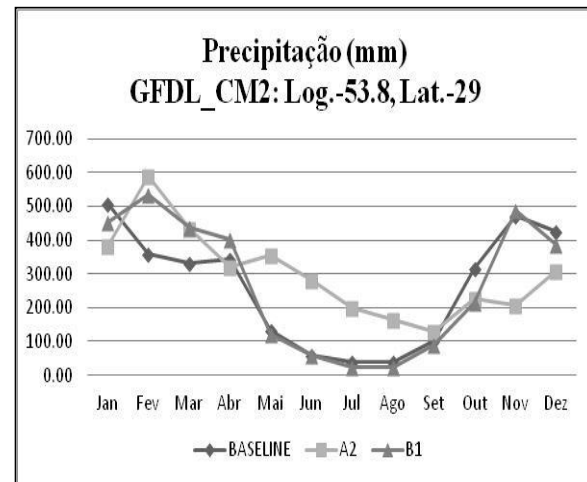
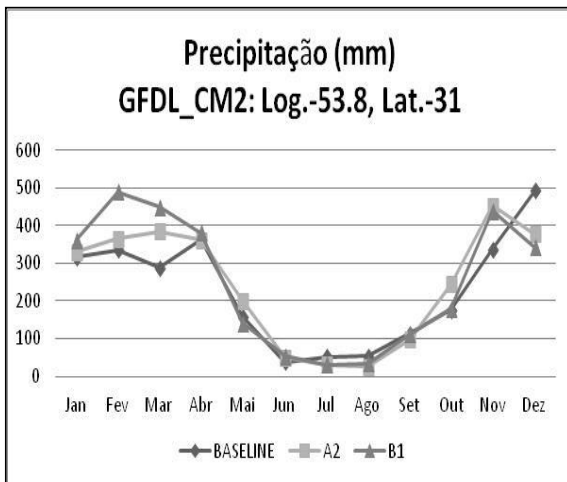
Identificou-se que para cada AOGCM foi necessária a utilização de um ou dois pontos das grades para realizar o *downscaling* para as estações de precipitação e um ponto de grade para a estação de temperatura, como se pode apreciar na tabela a seguir:

Tabela IV.26: Localização dos pontos de informação de cada AOGCM para o *downscaling* ao modelo hidrológico no WEAP

Estação		GFDL_CM2		CGCM3.1		MIROC3.2		UKMO-HADCM3	
		Long.	Lat.	Long.	Lat.	Long.	Lat.	Long.	Lat.
Precipitação	Santa Clara	-53,8	-29	-52,5	-27,8	-53,4	-29,3	-52,5	-27,5
	Dona Francisca	-53,8	-29	-52,5	-31,5	-53,4	-29,3	-52,5	-30
	Botucaraí	-53,8	-29	-52,5	-31,5	-53,4	-29,3	-52,5	-30
	Barro Vermelho	-53,8	-31	-52,5	-31,5	-53,4	-29,3	-52,5	-30
	São Sepe	-53,8	-31	-52,5	-31,5	-53,4	-29,3	-52,5	-30
Tempe	Santa Maria	-53,8	-29	-52,5	-31,5	-53,4	-29,3	-52,5	-30

É assim que se realizou uma análise sobre a tendência do *baseline* e a projeção futura (2021-2050) para cada ponto dos AOGCMs. Identificou-se que todos os modelos possuem uma consistência na relação do *baseline* com a projeção futura para cada estação

de precipitação e temperatura, a exceção do modelo GFDL_CM2 para o cenário A2 para o ponto que influencia às estações pluviométricas de Santa Clara, Dona Francisca e Botucaraí (Figura IV.9). Uma vez que os valores dos meses de junho, julho e agosto possuem valores muito mais baixos do que os outros meses no *baseline*, e na projeção futura os valores não seguem a mesma característica. Portanto, para análises da aplicação da metodologia proposta não foi considerado o modelo GFDL_CM2 no presente trabalho.



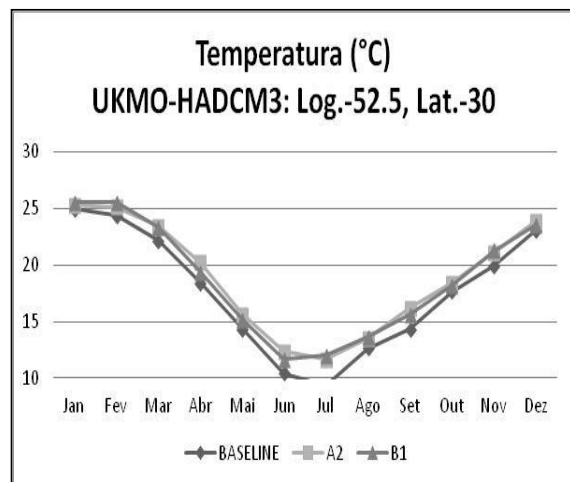
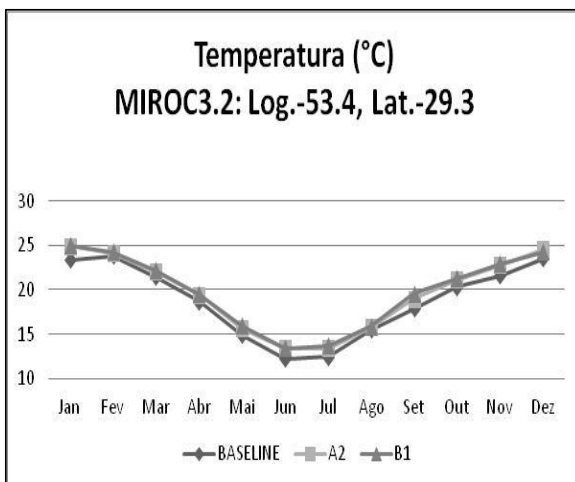
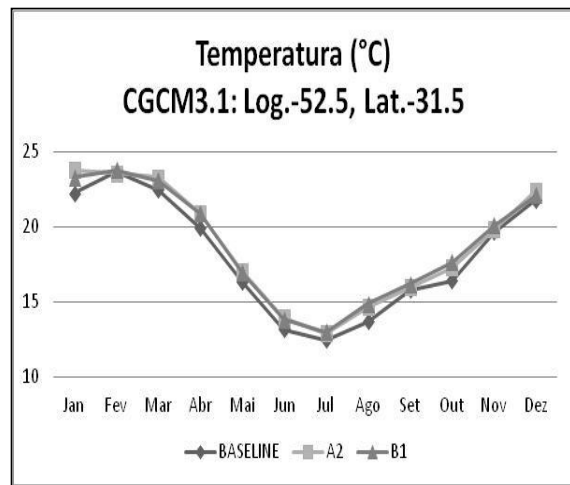
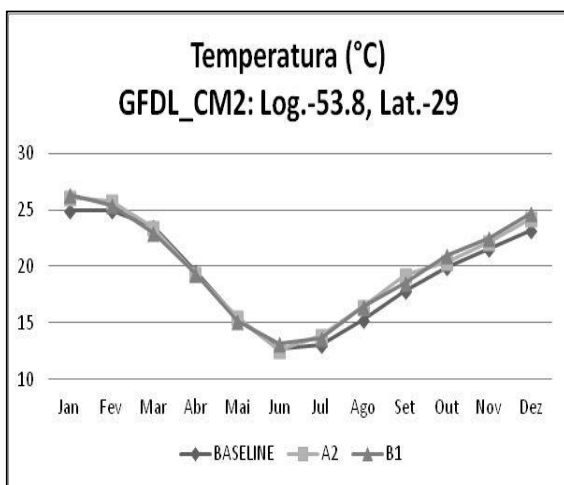
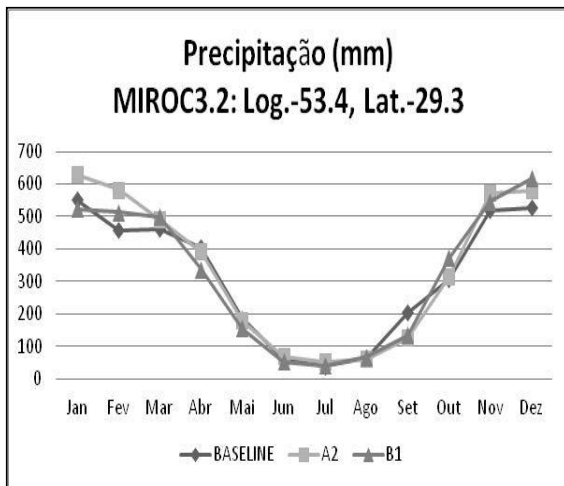


Figura IV.9: Análise da tendência do *baseline* com a projeção futura (2021-2050) para os modelos CGCM3.1, GFDL_CM2, MIROC3.2, UKMO-HADCM3

Além disso, as considerações feitas para projeção da demanda dos usos consuntivos localizados a montante do ponto de captação da UTE CTSUL até o ano 2050 são apresentadas na tabela a seguir

Tabela IV.27: Projeção dos usos consuntivos na montante da UTE CTSUL para o ano 2050

Usos consuntivos	Projeção	Fonte	Observações
Uso do solo			
• Arroz	0,64% anual	Cenário de referência do relatório: “Modelagem do Uso da Terra no Brasil”. Documento preparado para o Estudo de Baixo Carbono para o Brasil coordenado pelo Banco Mundial. (NASSAR <i>et al.</i> , 2010).	<ul style="list-style-type: none"> • As projeções foram feitas para a Região Sul e até o ano 2030. • Essa informação foi aplicada para cada área de captação e se continuou com a projeção até o ano 2050. • Assumiu que o aumento de área agrícola significou a redução da área de pastagem. Com exceção da área de captação Alto Jacuí que considerou-se redução de área de pastagem e mata nativa.
• Soja-Trigo	1,65% anual		
• Milho-Fumo	-0,14% anual		
Abastecimento Humano	Variável	Projeção da População do Brasil por Sexo e Idade para o Período 1980-2050 - Revisão 2008 (IBGE, 2008).	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do aumento de população de 1,19% (2006) a 0,01% (2039). Crescimento negativo de -0,02% (2040) para -0,29% (2050). • Projeção feita para o Brasil, que foi considerada para a quantidade de beneficiados pela empresa de abastecimento de água potável CORSAN • Assumiu-se que a planta da CORSAN mantém a quantidade de fornecimento de água até 2014 e aumenta sua capacidade de abastecimento a partir do 2015.
Criação de animal	0,5% anual	Efetivo dos rebanhos por cabeças de suíno 1974 – 2010 da Região Sul. IBGE (IBGE, 2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Projeção feita a partir do crescimento anual de rebanho suíno segundo dados históricos do IBGE na Região Sul. • Essa informação foi aplicada para cada área de captação, com exceção das áreas de alto Jacuí e Vacacaí-Vacacaí Mirim.

4.6. Aplicação da metodologia para determinação da variação da eficiência frente às mudanças climáticas. Estudo de caso: UTE CTSUL.

Sendo que a UTE CTSUL se baseia no ciclo de vapor de Rankine com reaquecimento foram achados os valores do ciclo de vapor para determinar a perda de potência mecânica e a eficiência na geração de eletricidade para a UTE CTSUL frente às mudanças de temperatura segundo os AOGCMs (CGCM3.1, MIROC3.2 e UKMO-HadCM3) para o período 2021-2050.

Os dados técnicos necessários da UTE CTSUL foram obtidos do próprio RIMA (CTSUL, 2005) e são apresentado na tabela seguinte:

Tabela IV.28: : Dados técnicos de operação da UTE CTSUL

Capacidade de produção de vapor (por unidade)	1025 T/h
Pressão do vapor superaquecido	16,67 MP
Temperatura do vapor superaquecido	537 °C
Capacidade de reaquecimento (a capacidade que limita o fluxo de massa de vapor utilizado na simulação)	851,4 T/h
Pressão do Vapor reaquecido	3,346 MPa(a)
Temperatura de saída do vapor de reaq	540 °C
Pressão do Vapor na saída da turbina	5,4 kPa
Temperatura da água de refrigeração	22,5 °C

Fonte: CTSUL (2005)

Fazendo uso do software *TermoGraf* conseguiu-se determinar os valores de temperatura (°C), pressão (bar), entalpia (kJ/kg) e entropia (kJ/kg-°C) do ciclo termodinâmico da UTE CTSUL, que é mostrada na tabela (IV.29) e figura (IV.10) a seguir:

Tabela IV.29: Resultados dos estados do ciclo termodinâmico da UTE CTSUL

Estado	T (°C)	P (Bar)	H (kJ/kg)	S (kJ/kg·°C)
1	540	166,7	3401,4	6,41886
2	314,257	33,46	3018,5	6,53652
3	540	33,46	3542,34	7,29318
4	34,25	0,054	2405,25	7,85357
5	34,25	0,054	143,046	1,10908
6	85,3703	166,7	369,471	0,49348

Fonte: Elaboração própria em base a dados obtidos do CTSUL, 2005.

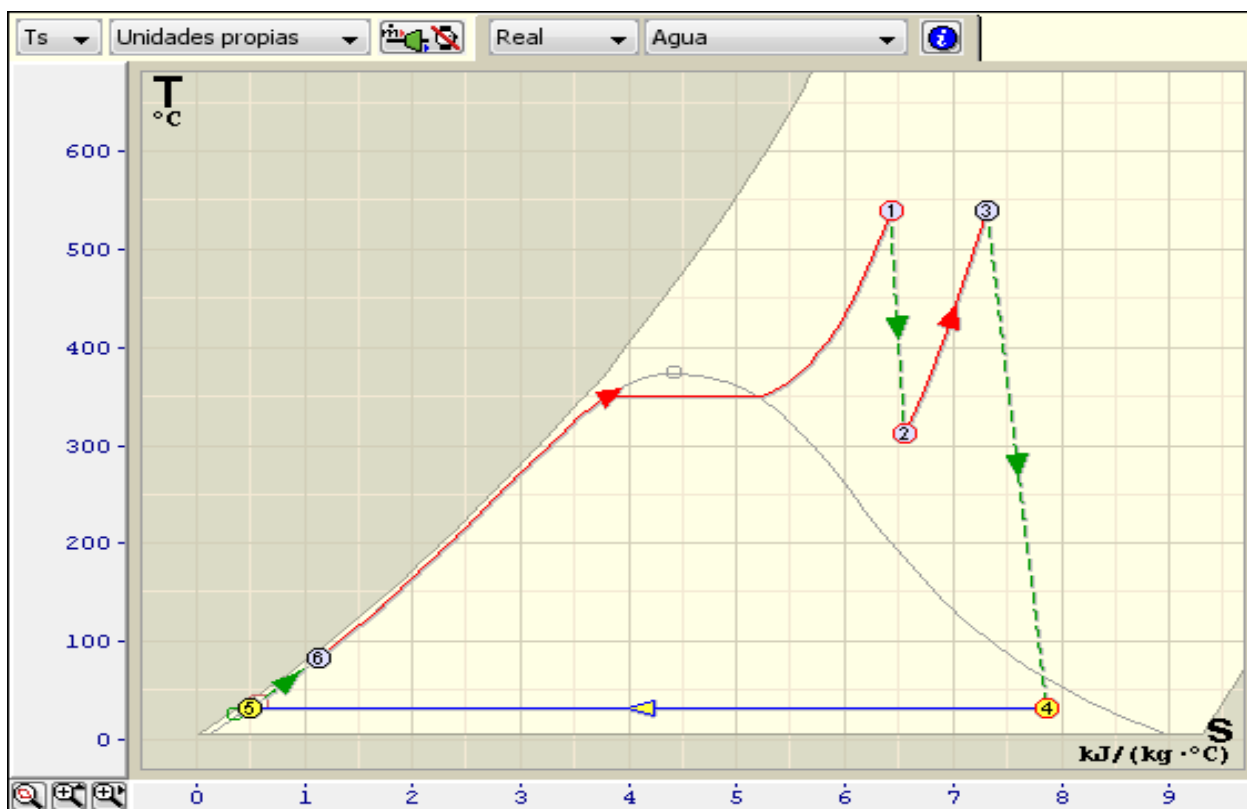


Figura IV.10: Esquema T-S para o ciclo de *Rankine* com reaquecimento da UTE CTSUL, simulado no software *Termograf*.

Fonte: Elaboração própria em base a dados obtidos do CTSUL, 2005.

Cabe indicar que o modelo indicou uma potência líquida do funcionamento de uma turbina de 300,2 MW, sendo que segundo informação do RIMA (CTSUL, 2005)

corresponderia uma potencia liquida de 297 MW.

Assume-se que, no sistema de resfriamento fechado com torre úmida da UTE CTSUL, a temperatura de saída da água da torre de resfriamento que vai para o condensador depende somente da temperatura do ar e a umidade relativa ambiente. Não é considerada a temperatura da água de reposição, uma vez que atinge apenas 3,5% do total de água utilizada para condensação (34980 m³/h). Assim, com ajuda da equação de desempenho da torre úmida (equação de M.Merkel – Eq.4) pode-se determinar o valor de temperatura de saída da água de resfriamento para o condensador com os resultados dos diferentes AOGCMs, mantendo constante o valor de desempenho da torre. Além disso, assumiu-se que o diferencial de temperatura de ingresso e saída da água de resfriamento da torre úmida (de e para o condensador) é de 8°C.

A estação meteorológica Santa Maria (também utilizada no WEAP) foi usada para o fornecimento de dados de temperatura e umidade relativa média mensal e anual. Assim, para o período 1987 – 2000³⁸, a temperatura média anual do ar obtida foi de 20,45°C³⁹ e a umidade relativa de 76,71%. Esses valores foram tomados em conta para calcular a constante de desempenho da torre de resfriamento da UTE CTSUL, cujo valor foi de: $\frac{KaV}{L} = 1.11$. Assim, com a constante de desenho da torre úmida da CTSUL, é possível determinar uma nova temperatura da água de resfriamento devido a uma mudança na temperatura do ar.

Em condições normais de funcionamento, a água do sistema de resfriamento ingressa ao condensador a uma temperatura de 22,5°C (indicado no RIMA) e sai com 30,5°C (devido à consideração, $dT = 8^\circ$). Além disso, sendo a temperatura do vapor de expansão (T4) 34,25°C se obtém que a diferença de temperatura de trabalho do condensador é de 3,75°. Portanto, a cada incremento do diferencial de temperatura da água de resfriamento, devido a uma redução de eficiência na torre por aumento de temperatura

³⁸ Período utilizado para determinar os fatores de ajustes dos modelos climáticos no WEAP.

³⁹ Cabe indicar que o RIMA da UTE CTSUL, indicou no estudo que a temperatura média de referência era de 20°C.

do ar, o valor da temperatura do vapor expandido precisa ser aumentado uma vez que o diferencial no condensador deve-se manter (figura IV.11).

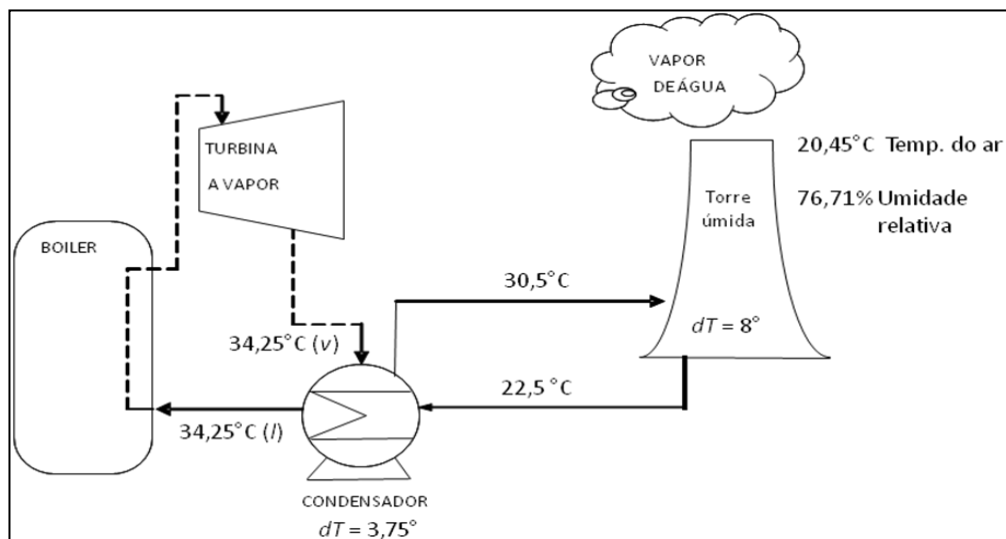


Figura IV.11: Ciclo de temperaturas das etapas de condensação de vapor e resfriamento de água da UTE CTSUL.

Fonte: Elaboração própria

Com um aumento do valor da temperatura do vapor condensado se reduzirá a potência da usina (representada na Figura IV.10). Essa perda de potência mecânica é calculada mediante a diferença da potência líquida em condições normais (300,2 MW para uma turbina) e a nova potência líquida de um ciclo de vapor alterado, devido a um aumento de temperatura da água de resfriamento originado pelas mudanças climáticas. Enfim, a redução percentual da eficiência será relacionada às variações da eficiência da primeira lei dos diferentes ciclos termodinâmicos.

Assim, foram calculados os valores de temperatura em uma média de 30 anos (2021 – 2050) das projeções climáticas dos quatro AOGCMs para os cenários A2 e B1. Consideraram-se tanto a média anual como as médias de verão e inverno. Deve-se indicar que foi considerada a umidade relativa do cenário de referência (76,71%) como constante para todas as projeções climáticas.

4.7. Resultados

4.7.1. Resultados sobre a disponibilidade hídrica para UTE CTSUL

Após fazer as rodadas no WEAP, o modelo indicou que a UTE CTSUL precisa de uma quantidade de água mensal de entre 1.616.160 m³ e 1.789.320 m³, com uma vazão de 0,67 m³/s.

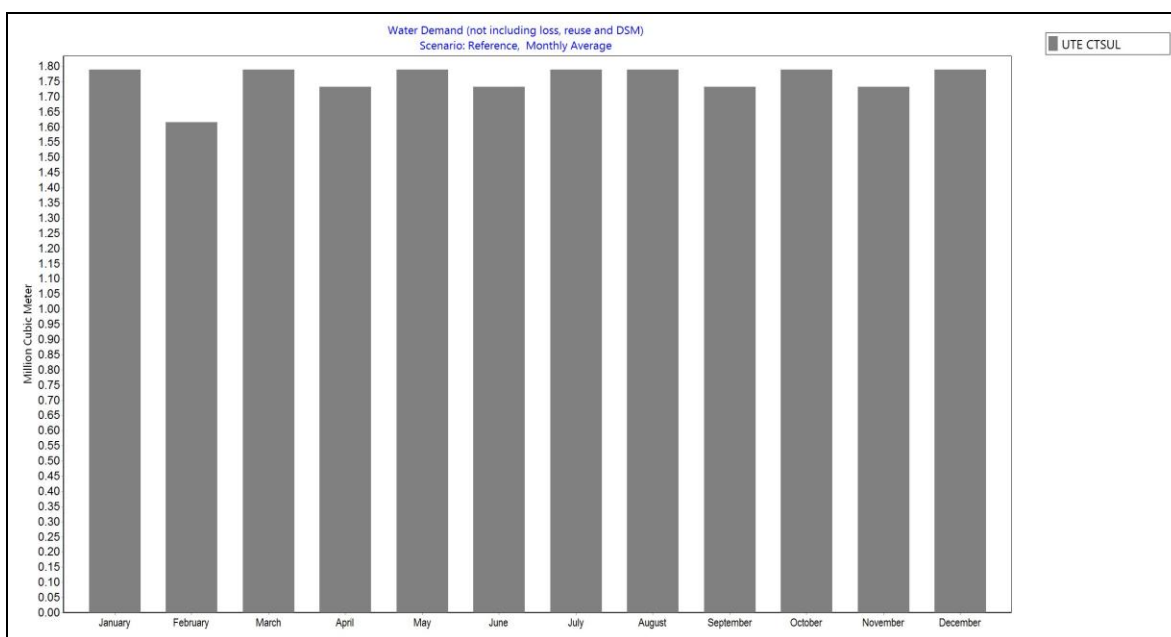


Figura IV.12: Necessidades de água para a operação da Usina Termelétrica CTSUL segundo a modelagem no WEAP

Com respeito às variáveis de precipitação e temperatura, realizou-se uma avaliação para cada área de captação com os cenários climáticos A2 e B1, para os quatro modelos climáticos no período 2021-2050 (a exceção do modelo GFDL_CM2). Para o cenário A2 (Apêndice A) pode-se apreciar que a área de captação CTSUL o modelo UKMO-HADCM3 apresenta uma precipitação menor do que o cenário de referência. Para todos os demais modelos climáticos e áreas de captação a precipitação seria maior durante a estação de verão. No caso do inverno e cenário A2, a área de captação Alto Jacuí no modelo CGCM3.1 e as áreas de captação CTSUL e Vacacaí no modelo MIROC3.2, a precipitação seria menor do que o cenário de referência. Para todas as demais áreas de captação e

modelos climáticos a precipitação ficaria maior. Para o cenário B1 (Apêndice A), durante o verão a precipitação se tornaria maior do que o cenário de referência para todas as áreas de captação e modelos climáticos. Já no inverno, as áreas de captação Hidrelétrica, Dona Francisca, Restinga Seca, CTSUL, Vacacaí o modelo climático UKMO-HADCM3 apresentaria menores vazões do que o cenário de referência. Outros casos de precipitação menor que a do cenário de referência são: a área de captação Alto Jacuí (modelo CGCM3.1 e UKMO-HADCM3), área de captação CTSUL e Vacacaí (modelo MIROC3.2).

Com respeito ao parâmetro de temperatura, tanto no cenário A2 como B1 seria maior que no cenário de referência, para todas as áreas de captação nas estações de verão e inverno. Além disso, no cenário B1, o MIROC3.2 é o modelo climático que apresenta maior temperatura no verão, e o modelo UKMO-HADCM3 no inverno (Apêndice A).

Da mesma forma, a vazão do rio Jacuí (m^3/s) no ponto de captação da UTE CTSUL (período 2021-2050) projetada para o cenário A2, o modelo climático CGCM3.1 é superior ao cenário de referência em todos os meses. Para o modelo UKMO-HADCM3, a vazão simulada é menor nos meses de fevereiro e outubro. Finalmente, para o modelo MIROC3.2 a vazão simulada é menor que a referência no mês de outubro (Figura IV.13). Porém, a UTE CTSUL ao precisar somente de $0,67 \text{ m}^3/\text{s}$ de água, não havendo escassez para seu fornecimento, inclusive para vazões de permanência de até 97% do tempo ($31,60 \text{ m}^3/\text{s}$ para modelo UKMO-HADCM3), para os meses de janeiro, fevereiro e dezembro (meses com maior uso de água devido principalmente à cultura do arroz), tal como pode ser apreciado na Figura IV.14.

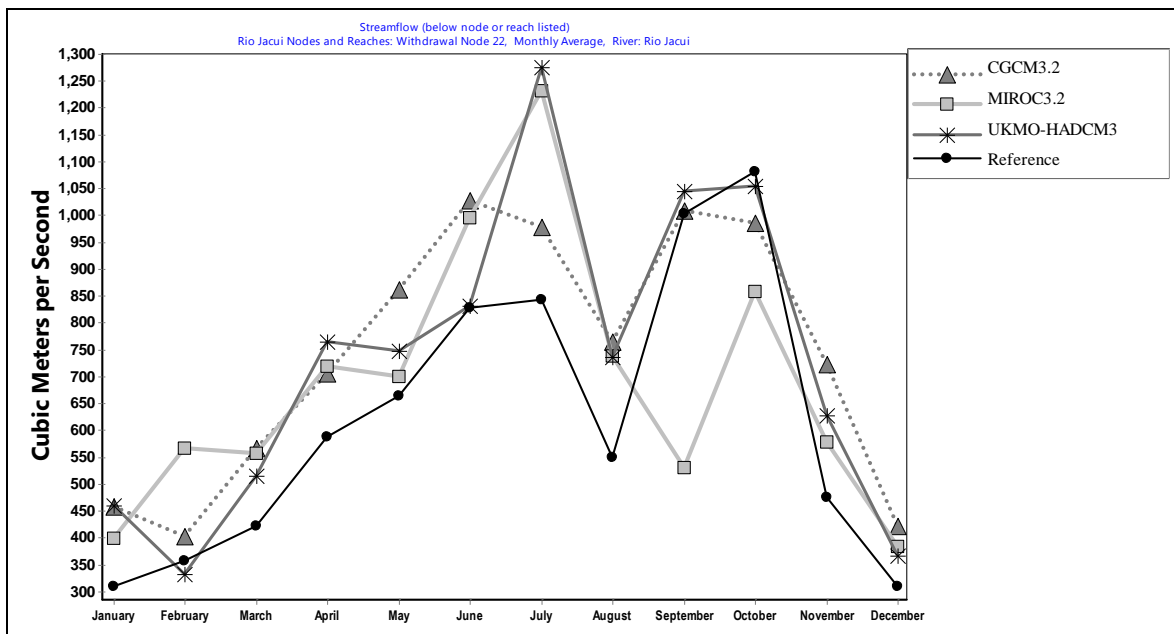


Figura IV.13: Vazão do Rio Jacuí no ponto de captação para UTE CTSUL no cenário A2 para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3. Período de 2021 – 2050.

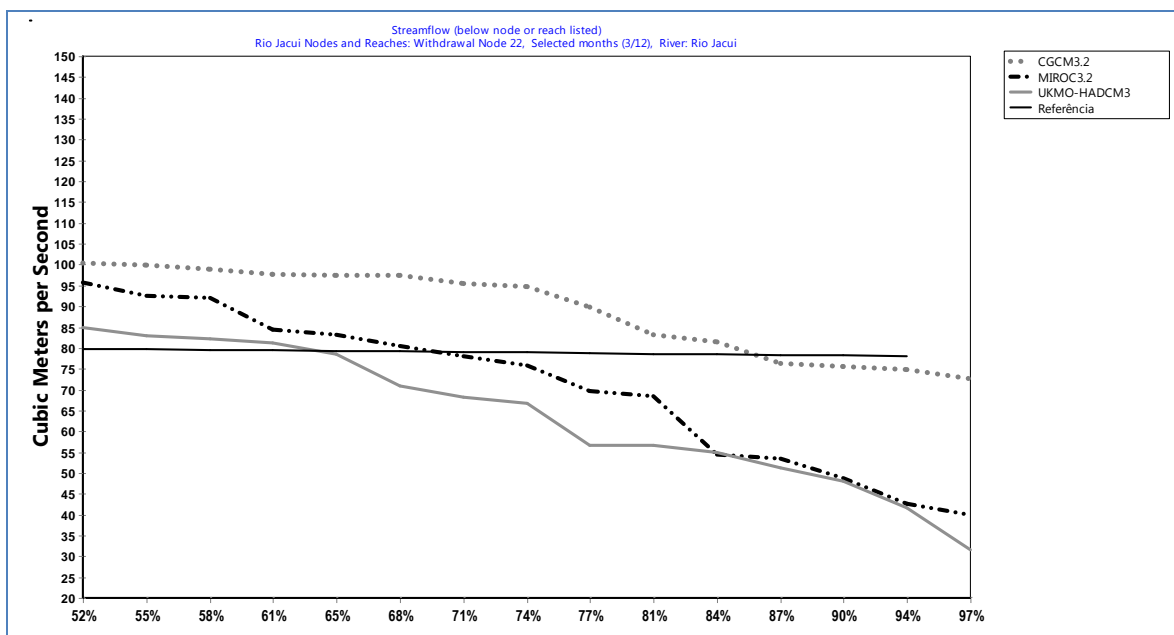


Figura IV.14: Porcentagem de permanência da vazão do Rio Jacuí no ponto de captação para UTE CTSUL no cenário A2 para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3. Período de meses de Janeiro-Fevereiro-Dezembro, 2021 – 2050.

Para o cenário B1, o modelo climático CGCM3 seria superior em todos os meses que o cenário de referência. Com respeito ao modelo climático UKMO-HADCM3 nos meses de junho e outubro a vazão é menor do que o cenário de referência. Finalmente, para o modelo MIROC a vazão é menor nos meses de janeiro, abril, maio, junho, setembro, e outubro (Figura IV.15).

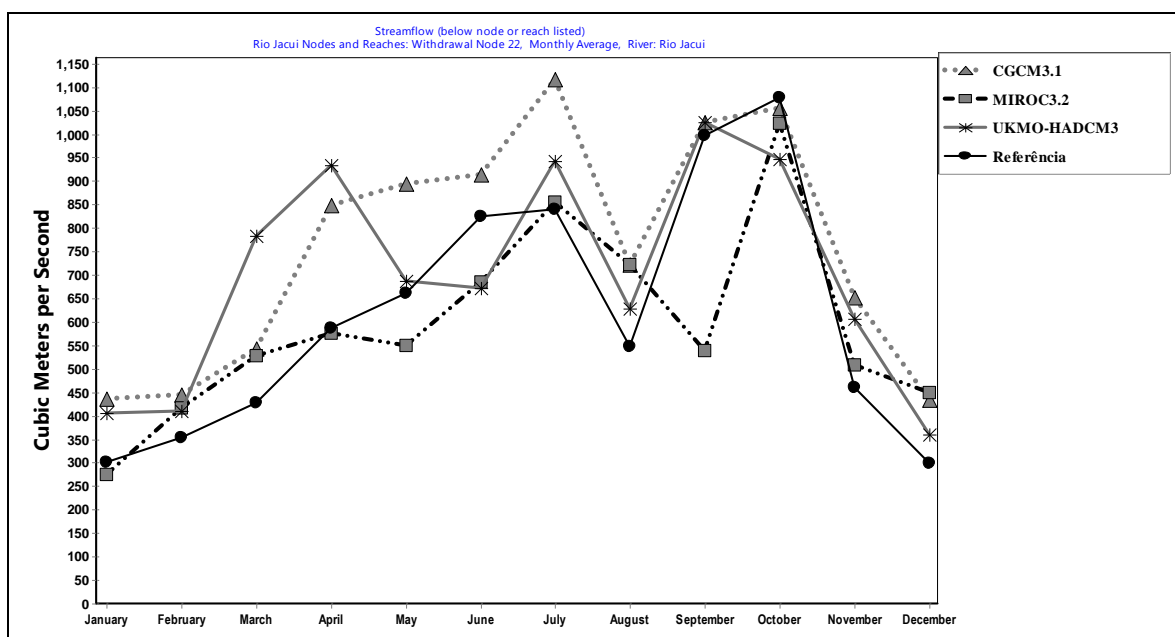


Figura IV.15: Vazão do Rio Jacuí no ponto de captação para UTE CTSUL no cenário B1 para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3, para o período de 2021 – 2050.

Segundo os resultados apresentados anteriormente, a UTE CTSUL poderá se abastecer de água do rio Jacuí durante todos os meses para o período de 2021 – 2050 no cenário B1, pelo que a cobertura é de 100%. Além disso, para vazões de permanência de até 97% do tempo, o modelo MIROC3.2 apresenta a vazão menor ($31,63 \text{ m}^3/\text{s}$) durante os meses de janeiro, fevereiro e dezembro, tal como pode ser apreciado na Figura IV.16.

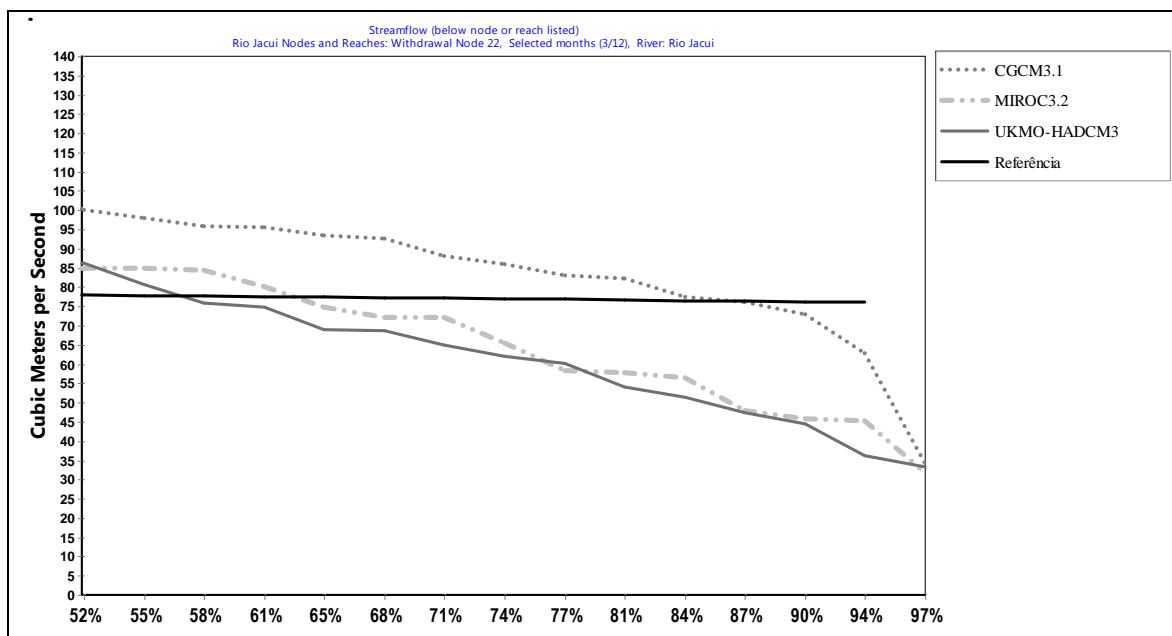


Figura IV.16: Porcentagem de permanência da vazão do Rio Jacuí no ponto de captação para UTE CTSUL no cenário B1 para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2 e UKMO-HADCM3. Período de meses de Janeiro-Fevereiro-Dezembro, 2021 – 2050.

4.7.2. Resultados da queda de eficiência da UTE CTSUL.

Considerando que a torre úmida foi desenhada com base nas condições da média de temperatura e umidade relativa (20,45°C e a 76,71% respectivamente) e com ventilação natural, valores maiores de temperatura afetarão de maneira negativa a geração de energia. Porém, a média de verão do cenário de referencia é de 25,41°C, que fará que a planta já tenha uma eficiência menor sem considerar as projeções dos modelos climáticos. Por outro lado, durante o inverno a média de temperatura de 15,5°C beneficiaria o aumento da eficiência de geração fazendo com que o consumo do carvão mineral diminua.

Os valores para os cenários A2 e B1 dos três AOGCMs no período do 2021-2050 mostram temperatura maiores do que as médias de verão e anual do cenário de referência (1987 – 2005). Da mesma forma, os valores de inverno também são superiores à média dessa estação do cenário de referência, porém, eles ainda são menores que a média anual considerada para o desenho da torre de resfriamento (20,45 °C). Portanto, poder-se-ia

concluir que durante o inverno a planta poderia gerar a energia contratada, mas com menor quantidade de combustível. Nas tabelas a seguir apresenta-se os valores de temperatura do cenário A2 e B1 para a média anual, média do verão e média do inverno, segundo as projeções climáticas até 2050, assim como o diferencial de potência e de eficiência na geração de energia, (Tabela IV.30, Tabela IV.31, Tabela IV.32 e Tabela IV.33).

Tabela IV.30: Valores de Temperatura e Umidade Relativa: Média anual, Média de Verão, Média de Inverno. Cenário de referência (1987 – 2000) e Cenários A2 e B1 por modelo climático (2021 – 2050).

1987 - 2000			MODELOS	2021 - 2050					
BASE (°C)				CENÁRIO A2 (°C)			CENÁRIO B1 (°C)		
VERÃO	INVERNO	MÉDIA ANUAL		VERÃO	INVERNO	MÉDIA ANUAL	VERÃO	INVERNO	MÉDIA ANUAL
25,4	15,5	20,5							
BASE UMIDADE RELATIVA (%)				CGCM3,1	26,1	16,2	21,1	25,9	16,2
VERÃO	INVERNO	MÉDIA ANUAL	MIROC3,2	26,3	16,3	21,3	26,4	16,4	21,5
71,5	79,7	76,7	UKMO-HadCM3	26,1	17,2	21,8	26,2	17,1	21,6

Tabela IV.31: Redução de potência (MW) e perda de eficiência (%) para cenário de referência, e cenários A2 e B1 (2021-2050).

Temperatura média anual- Cenário Base (°C)		Perdas de potência (MW)	Diferencial de potência (%)	Diferencial de eficiência (%)
20,5		0	0	0
Modelos Climáticos	Temperatura média anual Cenário A2 (°C)	Perdas de potência (MW)	Diferencial de potência (%)	Diferencial de eficiência (%)
CGCM3.1	21,1	0,1	-0,03%	-0,02%
MIROC3.2	21,3	0,2	-0,07%	-0,02%

HadCM3	21,8	0,4	-0,13%	-0,05%
Modelos Climáticos	Temperatura média anual Cenário B1 (°C)	Perdas de potência (MW)	Diferencial de potência (%)	Diferencial de eficiência (%)
CGCM3.1	21,1	0,1	-0,03%	-0,02%
MIROC3.2	21,5	0,3	-0,10%	-0,03%
UKMO-HadCM3	21,6	0,3	-0,10%	-0,05%

Para as médias anuais, no cenário A2 a eficiência poderia ser reduzida desde 0,02% (CGCM3.1 e MIROC3.2) até em 0,05% (HADCM3). Já no cenário B1 a eficiência se reduziria desde 0,02% (CGCM3.1), ate 0,05% (UKMO-HADCM3).

Tabela IV.32: Redução de potência (MW) e perda de eficiência (%) para cenário de referencia, e cenários A2 e B1 (2021-2050) para a estação do verão.

Temperatura média do verão - Cenário Base (°C)		Perdas de potência (MW)	Diferencial de potência (%)	Diferencial de eficiência (%)
25,40		1,3	-0,43%	-0,17%
Modelos Climáticos	Temperatura média do verão - Cenário A2 (°C)	Perdas de potência (MW)	Perda de potência (%)	Perda de eficiência (%)
CGCM3,1	26,1	1,4	-0,47%	-0,19%
MIROC3,2	26,3	1,5	-0,50%	-0,21%
UKMO-HadCM3	26,1	1,4	-0,47%	-0,19%
Modelos Climáticos	Temperatura média do verão - Cenário B1 (°C)	Perdas de potência (MW)	Diferencial de potência (%)	Diferencial de eficiência (%)
CGCM3.1	25,9	1,4	-0,47%	-0,19%

MIROC3.2	26,4	1,5	-0,50%	-0,21%
UKMO-HadCM3	26,2	1,5	-0,50%	-0,21%

Para valores das médias da estação de verão, a eficiência pode ser reduzida em 0,17% no cenário de referência. Já as projeções climáticas para 2050 indicam que a eficiência se reduziria em 0,19% (CGCM3.1 e UKMO-HADCM3) e 0,21% (MIROC3.2) para o cenário A2. Com respeito ao cenário B1 a eficiência se reduziria em 0,19% (CGCM3.1) e 0,21% (UKMO-HADCM3, MIROC3.2).

Tabela IV.33 Ganho de potência (MW) e de eficiência (%) para cenário de referência, e cenários A2 e B1 (2021-2050) para a estação do inverno.

Temperatura média do verão - Cenário Base (°C)		Ganho de potência (MW)	Diferencial de potência (%)	Diferencial de eficiência (%)
15,50		4,4	+1,47%	+0,67%
Modelos Climáticos	Temperatura média do inverno - Cenário A2 (°C)	Ganho de potência (MW)	Perda de potência (%)	Perda de eficiência (%)
CGCM3,1	16,2	3,9	+1,30%	+0,55%
MIROC3,2	16,3	3,8	+1,27%	+0,52%
UKMO-HadCM3	17,2	3,0	+1,00%	+0,42%
Modelos Climáticos	Temperatura média do inverno - Cenário B1 (°C)	Ganho de potência (MW)	Diferencial de potência (%)	Diferencial de eficiência (%)
CGCM3.1	16,2	3,9	+1,30%	+0,55%
MIROC3.2	16,4	3,7	+1,23%	+0,51%
UKMO-HadCM3	17,1	3,1	+1,03%	+0,43%

Finalmente, para o inverno, a UTE CTSUL poderia ser beneficiada com a redução do consumo do carvão mineral, além de garantir a geração de eletricidade contratada. Já as projeções climáticas para 2050 indicam que a eficiência aumentaria em 0,42% (UKMO-HADCM3), 0,52% (MIROC3.2) e 0,55% (CGCM3.1) para o cenário A2. Com respeito ao cenário B1 a eficiência aumentaria em 0,43% (UKMO-HADCM3), 0,51% (MIROC3.2) e 0,55% (CGCM3.1).

4.8. Medidas de Adaptação a Impactos Climáticos sobre UTEs à Carvão Mineral

Tal como afirma BIRD (2010a), medidas de adaptação podem reduzir a vulnerabilidade às alterações climáticas e ambientais. Assim, uma das alternativas para reduzir os impactos das mudanças climáticas sobre o aumento de temperatura da água de captura, considerando as restrições ambientais no retorno ao corpo receptor no caso de sistemas de resfriamento aberto, é a possibilidade de se aumentar a capacidade das bombas do condensador, conforme sugerem FÖRSTER e LILLIESTAM (2010). Os autores sinalizam que é preferível aplicar esta alternativa em plantas a serem construídas, mas não nas já operativas. Além disso, um aumento da capacidade das bombas se reflete em um aumento da retirada de água das fontes hídricas e perda de potência na usina. No caso brasileiro, a UTE Jacuí é a única que considera um sistema de resfriamento aberto e cuja fonte de captação será em águas superficiais (rio Jacuí). Porém, como se observou, o nível de disponibilidade hídrica lá é confortável.

Passar de um sistema de resfriamento de ciclo aberto para um fechado com torres úmidas de resfriamento poderia reduzir em até 97% a retirada de água (FEELEY III *et al.*, 2008), além de evitar impacto negativo térmico nos ecossistemas aquáticos, configurando-se em uma boa opção de adaptação para as bacias que já apresentam criticidade ou uma redução na vazão e disponibilidade hídrica. Porém, deve-se ter em consideração que a tecnologia de torres de resfriamento consome maior quantidade de água (75% do retirado é evaporado). Portanto, seria importante realizar um estudo de factibilidade sobre as necessidades dos outros usuários à jusante do ponto de captação nestes casos. Outra alternativa é a implantação de sistemas de resfriamento fechados secos (BIRD, 2010a), que

mesmo que tenham uma menor eficiência no resfriamento e um maior consumo de energia interna para seu funcionamento são recomendáveis para regiões secas ou de pouca disponibilidade hídrica. A China tem implementado essa tecnologia, que inclusive é considerada em estudos de cenários futuros de planejamento para economizar água no ciclo de vida do carvão (PAN *et al.*, 2012).

O mar como fonte hídrica para o sistema de resfriamento é identificado como uma boa opção para evitar a dependência da disponibilidade hídrica de águas superficiais (FÖRSTER e LILLIESTAM, 2010, PAN *et al.*, 2012). Este tipo de técnica se vê evidenciado nas novas plantas térmicas a serem implementadas em Porto de Itaqui e Porto do Açu I.

Já, no caso dos possíveis impactos sobre UTEs que se encontram perto da beira do mar, o MCT (2010) indica a ocorrência de possíveis prejuízos estruturais ou operacionais a portos e terminais. Afirmação que ainda é incerta. Contudo, como estratégia de contingência frente a esses eventos, o MCT (2010) recomenda a elaboração de diretrizes e de normas técnicas para obras costeiras e marítimas, que incorporem os possíveis impactos da mudança climática sobre obras e construções. Além disso, o BIRD (2010a) sinaliza a importância de se fazer seguro para obras de infraestrutura para o caso de eventos extremos, o que poderia se qualificar como uma medida de adaptação.

FEELEY III *et al.* (2008) e PAN *et al.* (2012) propõem um incremento nos ciclos de resfriamento a torre úmida, aumentando a concentração de água de purga e diminuindo assim a retirada de água para sua reposição. Além disso, mudar para uma tecnologia tipo IGCC faria com que a necessidade de resfriamento fosse reduzida, uma vez que dois terços da energia gerada provêm da turbina a gás, e este ciclo não precisa de sistema de resfriamento. (FEELEY *et al.* 2005, GERDES e NICHOLS, 2009).

Outras alternativas relacionadas à diminuição do uso e do consumo de água para todos os tipos de térmicas são desenvolvidas pela NELT (FEELEY *et al.*, 2005). Esses projetos também são descritos por FEELEY III *et al.* (2008) e são apresentados a seguir:

A. Fornecer fonte alternativa de água de resfriamento de reposição.

- Desenvolvimento e demonstração de uma modelagem para avaliação da eficácia do uso de água de mina para serem utilizadas como reposição em torres de resfriamento. Isto dependeria da quantidade de água de mina disponível para assegurar seu fornecimento e do custo de tratamento. Segundo FEELEY *et al.* (2005), os ensaios em laboratório determinaram que em algumas ocasiões o custo do uso de água de mina era equivalente ao de uso de águas superficiais.
- Reutilização de efluentes gerados no sistema termelétrico ou de algum sistema externo com prévio tratamento.

B. Tecnologia de resfriamento avançada

- Uso de tecnologia para recuperar água doce da perda normal da evaporação em uma torre de resfriamento.

C. Recuperação de vapor dos gases de combustão para uso como água de reposição em torres de resfriamento.

- O gás de combustão contém grandes quantidades de vapor de água produzidas a partir do processo de combustão do carvão (mas também de qualquer tipo de combustível fóssil). A quantidade de água potencialmente recuperável dos gases de combustão é de 50%. Com essa quantidade se poderia reduzir em 3,8% a retirada e consumo de água necessária na reposição⁴⁰.
- Recuperação de água da caldeira de combustão de gás.
- Redução do uso da água no sistema de FGD úmido.

D. Reduzir perdas da torre de resfriamento evaporativo através de secagem de carvão prévio à introdução deste no boiler.

- Secagem do carvão com o calor liberado na condensação. Isto faria com que a água utilizada na condensação retornasse à torre de resfriamento com uma menor

⁴⁰ FEELEY III *et al.* (2008) adiciona que nos casos de plantas com ciclo combinado possuem maior vapor de água, e a redução da captura e consumo de água seria de até 8,8%.

temperatura e reduziria a evaporação. Além disso, a secagem do carvão aumentaria a eficiência na queima do combustível.

V. LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A vulnerabilidade de usinas termelétricas às mudanças climáticas reflete-se tanto na redução de eficiência do ciclo de geração quanto na necessidade de água para o sistema de resfriamento destas. O fato da escolha da localização das UTEs a carvão mineral nacional no Brasil no passado, ter como prioridade a proximidade de jazidas do mineral (devido a sua baixa qualidade) e não a disponibilidade hídrica das bacias comprometidas faz com que as condições meteorológicas possam aumentar a vulnerabilidade destas frente a possíveis mudanças do clima.

Assumindo-se uma possível tendência sobre mudanças do clima futuro nessas regiões, pode-se dizer que, ainda que a Região Sul (localizadas as usinas em operação e a maioria projetadas) possua algumas bacias com um nível crítico de disponibilidade hídrica, AOGCMs⁴¹ projetam uma tendência de aumento da precipitação (CCSR/NIES, HadCM3 e GFDL). Isso significaria um aumento nas vazões dos rios e, portanto, aumento na disponibilidade hídrica. Porém, este aumento de precipitação deveria ser avaliado sob o ponto de vista de eventos extremos e, com isso, um maior aprofundamento na pesquisa de impacto sobre a infraestrutura destes empreendimentos se faz necessário. Além disso, os AOGCMs indicam um possível aumento da temperatura média, o que afetaria a eficiência do ciclo de geração. Este impacto se evidencia pelo ingresso da água para resfriamento a uma temperatura maior, problemas de cumprimento de restrições ambientais de efluentes (sistema aberto) ou na eficiência do próprio processo de resfriamento (em casos de torres de resfriamento) e, com isso, a eficiência do ciclo térmico de geração de energia.

No caso da Região Nordeste (localizadas as usinas em construção: Porto do Itaqui, Porto do Pecém I e Porto do Pecém II), os AOGCMs estimam um aumento de temperatura. Isto poderia afetar a eficiência das torres de resfriamento das três usinas em construção, mas não a temperatura da água de reposição, uma vez que a UTE de Porto Itaqui utilizará água do mar, inferindo-se que a captura será a uma profundidade determinada e não na

⁴¹ AOGCMs analisados por MARENGO (2007)

superfície. Dessa forma, a temperatura da água de captura deveria ser analisada em base à expansão térmica da água do oceano e o armazenamento de calor associado (BIRD, 2010a). Para o caso das UTEs PECEM I e PECEM II, sendo que a fonte de fornecimento é de uma planta de tratamento para abastecimento humano, que a sua vez retira a água de reservatórios, não pode-se dar uma discussão sobre um possível aumento de temperatura e o impacto ao sistema de resfriamento. Contudo, o fato da infraestrutura consistir em vários reservatórios conectados entre si com a planta de tratamento, deduz-se uma perda considerável de água devido à evaporação em ambas infraestruturas, podendo comprometer a criticidade na disponibilidade dos rios envolvidos. Porém, há uma lacuna de estudos para a determinação desse efeito. Com respeito à precipitação, existe uma contradição entre aumento (GFDL) e escassez (HADCM3) de chuva. MCT (2010) indica a preocupação existente em caso de aumento de chuva, uma vez que a erosão nessa área aumentaria. A erosão causa a sedimentação nos reservatórios e, por este motivo, diminui a capacidade de armazenamento e oferta de água destes (MCT, 2010).

Uma das metodologias sugeridas para o estudo de caso foi a modelagem de um balanço hídrico em áreas de captação integradas para determinação da disponibilidade hídrica superficial quantitativa para UTE CTSUL frente a variações de precipitação e temperatura de modelos climáticos (CGCM3.1, MIROC3.2 e UKMO-HadCM3) com cenários de emissão de GEE A2 e B1 (IPCC, 2000). Para o desenvolvimento desta metodologia foi utilizado o programa WEAP, o qual possibilitou avaliar a disponibilidade de água em um contexto integrado com respeito à consideração da existência de outros usuários a montante do ponto de captação da usina em estudo (áreas agrícolas com necessidade de riego, abastecimento humano e criação de animal), assim como a identificação de infraestrutura que regulariza a vazão do rio (reservatório de uma usina hidrelétrica). Além disso, pode-se realizar com essa metodologia estudos de projeção futura assumindo mudanças no clima. Devido às incertezas das projeções climáticas não é possível determinar uma precisão na disponibilidade hídrica e nas variações da eficiência na geração termelétrica no ciclo *Rankine*. Porém é importante para indicar a proposição de medidas de adaptação para gestão de águas assim como para geração elétrica.

O uso de vários modelos climáticos para uma mesma área hidrológica possibilita analisar a tendência e relevância dos resultados projetados e com isto uma melhor tomada de decisões no caso se precisarem de medidas de adaptação. Da mesma forma, foram considerados dois cenários de emissões de GEE, sendo que o IPCC estudou 40 cenários de emissão distribuída em 04 grandes famílias (A1, A2, B1, B2). No entanto, MINVILLE *et al.* (2008), reconhece as limitações da realização de um estudo em conjunto devido à infraestrutura computacional.

Neste estudo não foram consideradas a interconexão com as águas subterrâneas nem a disponibilidade hídrica do ponto de vista qualitativo. É por isso que em estudos futuros seria recomendável fazer esse tipo de modelagem integrada. A baixa qualidade de água gera maior consumo e maior gasto de energia para seu tratamento (MOHIUDDIN e KANT, 1996b, AL-BASSAM e MAHESHWARI, 2011). Já o RIMA da UTE USITESC sinaliza que a disponibilidade de água que a usina precisará poderia se reduzir se a concentração dos poluentes no Rio Mãe Luiza fosse menor. Esses poluentes são principalmente provenientes das atividades ligadas à mineração de carvão e outros usos da água do rio (CARBONÍFERA CRICIÚMA S.A e COMPANHIA CARBONÍFERA METROPOLITANA S.A, 2006)

A construção do modelo hidrológico no WEAP para o caso da UTE CTSUL teve algumas limitações que devem ser consideradas em futuras modelagens. As escalas dos mapas empregados no trabalho foram entre 1/1000000 e 1/250000, sendo que para modelagem de bacias seria preferível trabalhar com uma escala maior, como 1/50000. A uma escala maior, consegue-se maior detalhe de informação e com isto reduzem-se as incertezas sobre a construção da área hidrográfica, a cobertura e uso do solo e a identificação dos diferentes usuários de água. Analogamente, um melhor reconhecimento dos demandantes e seu consumo da água e verificação da informação através de pesquisa de campo aperfeiçoa a qualidade do modelo construído. Com isto, consegue-se reduzir as incertezas e obter melhores resultados na calibragem do modelo. Igualmente, não foi considerado o uso consuntivo do setor industrial, uma vez que não foi possível contatar os comitês de bacias da área em estudo que gerenciam as licenças de outorga do uso da água.

É por esse motivo que os resultados apresentados devem ser considerados a partir de uma visão conservadora de manejo de dados.

Com respeito à informação meteorológica, o Brasil carece ainda de uma base de dados históricos fluviométricos e climatológicos de maior consistência, que permitam fundamentar e reduzir as incertezas a respeito as mudanças climáticas e sua relação com análises de geração de energia. Essas dificuldades foram identificadas no estudo de caso, mas também em outros estudos (SCHAEFFER *et al.*, 2008b, LUCENA, 2010, NASCIMENTO, 2011). Por este motivo, considerou-se uma mesma estação meteorológica para várias áreas de captação. Ademais, para a construção do modelo hidrológico foi necessário valores observados de precipitação, temperatura e vazão do rio em um mesmo período de tempo. Isto dificultou a modelagem uma vez que muitas das estações de precipitação e temperatura tinham séries históricas incompletas em vários anos, fazendo-se necessário um esforço para completar essas séries. Dessa forma, sugere-se o melhoramento na qualidade, disponibilidade e aumento da informação do clima.

Com a finalidade de atingir o objetivo de utilizar diferentes modelos climáticos e com isto conseguir uma avaliação mais abrangente sobre o possível clima futuro, no estudo de caso trabalhou-se com quatro AOGCMs. Isto significou o uso de poucos pontos representativos de precipitação e temperatura que caracterizassem as áreas de captação, uma vez que os resultados desses modelos estão disponíveis apenas em larga escala. Dessa forma, o uso de modelos climáticos de uma resolução maior poderia caracterizar melhor a bacia estudada. Modelos regionalizados (*downscaling* dinâmico) que possuam uma redução da escala com aumento da resolução poderia ser uma boa alternativa para reduzir as incertezas nas projeções dos cenários trabalhados. Segundo BIRD (2010a), para o Quinto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do IPCC (AR5, previsto para 2013-2014), um novo programa internacional (CORDEX) irá a reproduzir os cenários de GEE com modelos climáticos regionalizados (MCT, 2010). Já a Segunda Comunicação Nacional do Brasil sobre Mudança do Clima (MCT, 2010) indica que um dos principais objetivos para trabalhar em medidas de adaptação é a elaboração de modelagem regional de clima, acrescentando que a escala temporal também é importante, uma vez que os eventos

extremos podem ser identificados apenas com dados diários e não com os dados mensais ou sazonais produzidos pela maioria dos modelos globais do IPCC. Além disso, evidenciou-se que o resultado pode variar dependendo do tipo de fatores de ajuste dos modelos climáticos. Por esse motivo, no caso em que se tem uma boa série histórica (30 anos), sugere-se o estudo da vulnerabilidade utilizando ambos fatores de ajuste e análise de resultados.

Uma metodologia adicional foi proposta para avaliar a eficiência na geração de energia com respeito ao impacto causado por um aumento de temperatura do ar na torre de resfriamento. Esta metodologia foi baseada no ciclo termodinâmico na geração elétrica. Nela foi considerada que a quantidade de combustível para geração do vapor seria mantido no processo, sendo que na realidade isto poderia não acontecer uma vez que a usina não deixaria de fornecer a energia contratada.

Em relação aos resultados das metodologias sugeridas, identifica-se que os modelos climáticos utilizados (CGCM3.1, MIROC3.2 e UKMO-HadCM3), no caso da UTE CTSUL, possuem uma variabilidade na precipitação e temperatura semelhante. Esta variabilidade indica que as previsões de clima futuro para 2050 poderiam auxiliar na tomada de decisões futuras de planejamento. No caso da disponibilidade hídrica, mostrou-se que a UTE CTSUL não teria problemas na demanda de água para operação da usina, mesmo apresentando um crescimento na demanda dos outros usos consuntivos localizados à montante do ponto de captação. Além disso, projetou-se que a vazão do rio Jacuí ficaria alguns meses acima do cenário de referência (mesmo com um aumento de temperatura no mesmo período de tempo). Além disso, um aumento na precipitação é projetado, o que poderia acarrear a ocorrência de eventos extremos como enchentes, que poderia afetar a infraestrutura da usina. Contudo, precisam-se de maiores estudos para evidenciar esses possíveis acontecimentos. Todavia, segundo CDKN (2012) é necessário alcançar um novo equilíbrio entre as medidas de redução de risco (através de seguros, por exemplo) que compreendam contingências nos seus processos orçamentários.

Como foi evidenciado, a geração termelétrica e o recurso água estão intimamente inter-relacionados. A produção e uso de um recurso não pode ser alcançado sem se depender um do outro. Além disso, ambos são dependentes das variabilidades do clima. Portanto, comprovou-se que a proposta metodológica no uso do WEAP é uma boa alternativa para avaliação da disponibilidade hídrica para geração termelétrica a carvão mineral frente às mudanças climáticas, tomando em consideração a demanda dos outros usos consuntivos. Da mesma forma, esta plataforma permite analisar a disponibilidade hídrica em diferentes períodos de tempo (mensal ou anual), além de determinar a porcentagem de cobertura de abastecimento de água para a planta. Igualmente, a robustez desta ferramenta baseia-se na avaliação do modelo de balanço hídrico com vários modelos de projeção de clima futuro em simultâneo, que ajuda a fortalecer as tomadas de decisão frente a possíveis ações de adaptação requeridas. Assim, organismos governamentais como o MME junto com a ANA e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)⁴² poderiam enfocar esse tipo de pesquisa, realizando um planejamento integrado identificando a vulnerabilidade do sistema, sendo relevante na tomada de decisões de gestão e em nível operativo, além de implementar ações de adaptação.

Finalmente, a metodologia com respeito ao impacto do aumento da temperatura do ar durante o verão mostrou que um sistema de resfriamento fechado com torre úmida perde pouca eficiência e pontos de potência. Porém, mesmo que a perda de eficiência seja pequena, isto poderia incorrer em grandes custos. MOHIUDDIN e KANT (1996a) sinalizam que para um controle preciso da temperatura da água fria pode ser conseguido com uso de ventiladores dentro da torre (ventilação artificial). Mas, a operação deste sistema e custo de manutenção favorece a ventilação natural. Além disso, o uso de ventiladores pode causar problemas com a geração de nebulização dentro da torre. Por outro lado, durante o inverno a usina poder-se-ia beneficiar com a redução do uso do carvão mineral como combustível fóssil.

⁴² O INPE, vinculado ao MCT, é responsável por coordenar a modelagem regional do clima e de cenários da mudança do clima para o futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-BASSAM, E., MAHESHWARI, G. P. A new scheme for cooling tower water conservation in arid-zone countries. **Energy**, v. 36, n. 7, pp. 3985-3991, Jul 2011.
- ANA. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Agência Nacional de Águas. Brasília, Brasil. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2011. 2005.
- ANA. **Estações ANA - Portal do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH**. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/portalsnirh/Esta%C3%A7%C3%B5esdaANA/tabid/359/Default.aspx>>. Acesso em: 10 set. 2011a. 2011.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil : Informe 2011**. Agência Nacional de Águas. Brasília, Brasil. 2011b.
- ANEEL. RESOLUÇÃO AUTORIZATIVA No 2.097. Autoriza a empresa CTSUL Central Termoeletrica Sul S/A a estabelecer-se como Produtor Independente de Energia Elétrica mediante implantação e exploração da UTE CTSUL e seu respectivo sistema de transmissão de interesse restrito, localizada no Município de Cachoeira do Sul, Estado do Rio Grande do Sul. 15 set. 2009.
- ANEEL. **Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – SIGEL**. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 1 ago. 2011. 2011a.
- ANEEL. Nota Técnica no. 034/2011-SRG/ANEEL - Processo no: 48500.002263/2011-18. Processo no: 48500.002263/2011-18. Assunto: Proposta de revisão da Resolução Normativa no. 129/2004, sobre o reembolso de combustíveis para centrais termelétricas que utilizam carvão mineral nacional. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/043/documento/nota_tecnica_034_2011_srg.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2011b. 15 nov 2011.
- ANEEL. **Banco de Informações de Geração - BIG**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15&idPerfil=2>>. Acesso em: 1 nov. 2011. 2011c.
- ANSOLABEHERE, S., BEER, J. CO-CHAIR, J. D., *et al.* **The Future of Coal**. MIT, 2007.
- ARNELL, N., TOMPKINS, E., ADGER, N., DELANEY, K. **Vulnerability to abrupt climate change in Europe**. Tyndall Centre for Climate Change Research. Disponível em: <<http://www.tyndall.ac.uk/content/vulnerability-abrupt-climate-change-europe>>. Acesso em: 17 mai. 2012. 2005.
- AVERYT, K., FISHER, J., HUBER-LEE, A., *et al.* **Freshwater use by U.S. power plants: Electricity's thirst for a precious resource. A report of the Energy and Water in a Warming World Initiative**. Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists. 2011.

- BAZILIAN, M., ROGNER, H., HOWELLS, M., *et al.* Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. **Energy Policy**, v. 39, n. 12, pp. 7896-7906, dez 2011.
- BEÉR, J. M. Electric Power Generation: Fossil Fuel. **Encyclopedia of Energy**. New York: Elsevier, 2004. pp. 217-228.
- BERG, P., FELDMANN, H., PANITZ, H.-J. Bias correction of high resolution regional climate model data. **Journal of Hydrology**, v. 448–449, n. 0, pp. 80-92, 2 jul 2012.
- BIRD. Thermal Power Guidelines for New Plants. Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial. 2008.
- BIRD. **Climate Impacts on Energy Systems - Key Issues for Energy Sector Adaptation**. Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial. Washington DC, USA. 2010a.
- BIRD. **Estudo de Baixo Carbono para o Brasil – Energia, Cenário de Baixa Emissão para o Brasil**. Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial. Washington DC, USA. 2010b.
- BRASIL - PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Lei Nº 9.433. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. 8 jan. 1997.
- BULL, S., BILELLO, D., EKMANN, J., SALE, M. J., SCHMALZER, D. K. **Effects of Climate Change on Energy Production and Distribution in the United States**. In: U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. 2008.
- CÂMARA, G., DAVIS, C., VIEIRA, A. M. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2001.
- CARBONÍFERA CRICIÚMA S.A, COMPANHIA CARBONÍFERA METROPOLITANA S.A. **Relatório de Impacto Ambiental da Usina Termelétrica Sul Catarinense - USITESC**. Santa Catarina, 2006.
- CARNEY, B., FEELEY, T., MCNEMAR, A. **Water-Energy Nexus - Breakout session of the International conference on Water Scarcity, Global Changes, and Groundwater Management Responses**. NELT, 2008.
- CDKN. **Gerenciando extremos climáticos e desastres na América Latina e no Caribe: Lições do relatório SREX**. Climate and Development Knowledge Network. Disponível em: <www.cdkn.org/srex>. Acesso em: 30 ago. 2012. Quito, 2012.
- CERH/SC. **Diagnostico e prognostico das demandas hídricas do plano integrado hídricos da bacia hidrográfico do rio Tubarão e Complexo Lagunar**. Santa Catarina: Comitê do Rio Tubarão e Complexo Lagunar - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.aguas.sc.gov.br/sirhsc/index.jsp?idEmpresa=15>>. Acesso em: 12

- fev. 2012. Santa Catarina, 2008.
- CGIAR-CSI, C. C. FOR S. I. **SRTM - Modelo Digital de Elevação (MDE)**, 2004.
- CHANDEL, M. K., PRATSON, L. F., JACKSON, R. B. The potential impacts of climate-change policy on freshwater use in thermoelectric power generation. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, pp. 6234-6242, out 2011.
- CHITALE, M. A. **Cooling with Mist**. Disponível em: <http://www.process-cooling.com/Articles/Feature_Article/BNP_GUID_9-5-2006_A_10000000000000335825>. Acesso em: 22 maio. 2012.
- CHUANG, C.-C.; SUE, D.-C. Performance effects of combined cycle power plant with variable condenser pressure and loading. **Energy**, v. 30, n. 10, pp. 1793-1801, jul 2005.
- CIFERNO, J., FOUT, T., MURPHY, J. T., JONES, A. P. **DOE/NETL's Carbon Capture R&D Program for Existing Coal-Fired Power Plants**. . DOE/NETL. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/ewr/co2/pubs/EPEC%20CO2%20capture%20program%20overview%20feb09.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2012. 2009.
- COMASE. **Comitê Coordenador das Atividades de meio Ambiente do Setor Elétrico, Referencial para Ornamentação dos Programas Socioambientais**. Brasil, 1994.
- CONAMA. Resolução CONAMA no 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005, Sec. I, pp. 58-63.
- CONAMA. Resolução CONAMA no 397, de 3 de abril de 2008. Altera o inciso II do § 4o e a Tabela X do § 5o, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA no 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. 2008, Sec. I, pp. 68-69.
- COPEL. **Relatório Anual de Gestão e Sustentabilidade 2008**. Companhia Paranaense de Energia. Disponível em: <http://www.copel.com/relatoriosanuais/2008/pt/relatorio/05_14.htm>. Acesso em: 12 set. 2011. Paraná, 2009.
- COPEL. **Relatório Anual de Gestão e Sustentabilidade 2010**. Companhia Paranaense de Energia. Paraná, 2011.
- CORSAN. **Companhia Riograndense de Saneamento**. Disponível em: <<http://www.corsan.com.br/node/3>>. Acesso em: 15 maio. 2012.
- COUTURE, P. L. **Thermal-Hydraulic Design of Replacement Cooling Towers for Vermont Yankee Nuclear Power Station**. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, CT, 2010.
- CTSUL.. **Relatório de Impacto Ambiental – Rima da Central Termoeletrica Sul S.A.** Cachoeira do Sul. 2005.

- DIAZ-NIETO, J., WILBY, R. L. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. **Climatic Change**, v. 69, n. 2, pp. 245-268, 2005.
- DIBIKE, Y. B., COULIBALY, P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1–4, pp. 145-163, 9 jun 2005.
- DOE. **Energy Demands on Water Resources—Report to Congress on the Interdependency of Energy & Water**. United States Department of Energy. Washington D.C, 2006.
- DURMAYAZ, A.; SOGUT, O. S. Influence of cooling water temperature on the efficiency of a pressurized-water reactor nuclear-power plant. **International Journal of Energy Research**, v. 30, n. 10, pp. 799-810, 1 ago 2006.
- EATON, J. **Record Heat, Drought Pose Problems for U.S. Electric Power**. Disponível em: <<http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2012/08/120817-record-heat-drought-pose-problems-for-electric-power-grid/>>. Acesso em: 25 ago. 2012.
- ECKERT, V. **Europe Power-Spot mixed, resists brief heat wave**. Disponível em: <<http://af.reuters.com/article/energyOilNews/idAFL6E8JK40X20120820>>. Acesso em: 22 ago. 2012.
- ELECTROBRAS CGTEE. **Realização física acumulada de Candiota III atinge 93,9% em julho 2010**. Disponível em: <<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=130>>. Acesso em: 13 set. 2011. 2010.
- ELECTROBRAS CGTEE. **Usina Termelétrica Presidente Médici**. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=37>>. Acesso em: 13 nov. 2011a. 2011.
- ELECTROBRAS CGTEE. **Candiota III (Fase C) é obra do PAC**. Disponível em: <<http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php?secao=103&periodico=62>>. Acesso em: 14 nov. 2011b. 16 mar 2011.
- EMBRAPA. **Mapa da Cobertura Vegetal do Brasil**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2005.
- ENCALADA REYES, M. A. **Potencial impacto ambiental de las industrias en el Ecuador: exploración preliminar y soluciones**. 1 ed. Quito, Fundación Natura, 1991.
- EPE. **Plano Nacional de Energia 2030 - Geração Termelétrica – Gás Natural**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2007a.
- EPE. **Plano Nacional de Energia 2030 - Geração Termelétrica – Carvão Mineral**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2007b.
- EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020**. Empresa de Pesquisa Energética Brasília, 2011a.

- EPE. **Balanco Energético Nacional 2011: Ano base 2010**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2011b.
- EPE. **Informe à Imprensa, Resultados preliminares – BEN 2012**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 11 jun 2012a.
- EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**. Empresa de Pesquisa Energética Brasília, 2012b.
- EPRI. **Water & Sustainability: U.S. Water Consumption for Power Production—The Next Half Century**. Electric Power Research Institute, Inc. Estados Unidos, 2002.
- ESCOBAR, M., PURKEY, D., POUGET, J. C., *et al.* Construcción del Modelo WEAP del Río Santa. **Evaluación de Impactos de Cambio Climático en Hidrología de Montañas: Desarrollo de una Metodología a través de un Estudio de Caso en Perú**, nov 2008.
- ESTADO DE SANTA CATARINA. Portaria nº 024/79. Enquadra os cursos d'água do Estado de Santa Catarina. 1979.
- EUROPEAN COMMISSION JOINT RESEARCH CENTRE. **A vegetation map of South America**. European Union. Disponível em: <<http://www.cobveget.cnpm.embrapa.br/resulta/relat/vegetation.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2011. 2002.
- FAN, F. M., COLLISCHONN, W. **Manual Arc-Hydro para aplicação o Modelo MGB-IPH, versão 1.2**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. jul 2009.
- FEELEY III, T. J., SKONE, T. J., STIEGEL JR., G. J., *et al.* Water: A critical resource in the thermoelectric power industry. **Energy**, v. 33, n. 1, pp. 1-11, jan 2008.
- FEELEY, T., GREEN, L., MURPHY, J., *et al.* Addressing the critical link between fossil energy and water. United States Department of Energy. Washington D.C, 2005.
- FÖRSTER, H., LILLIESTAM, J. Modeling thermoelectric power generation in view of climate change. **Regional Environmental Change**, v. 10, n. 4, pp. 327-338, 2010.
- GERBENS-LEENES, P. W., LIENDEN, A. R. VAN, HOEKSTRA, A. Y., MEER, T. H. VAN DER. Biofuel scenarios in a water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030. **Global Environmental Change**, 2012.
- GERDES, K., NICHOLS, C. **Water Requirements for Existing and Emerging Thermoelectric Plant Technologies**. DOE/NETL-402/080108.2009. 2009.
- GHOSH, S., MUJUMDAR, P. P. Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow using relevance vector machine. **Advances in Water Resources**, v. 31, n. 1, pp. 132-146, jan 2008.
- GOLOMBEK, R.; KITTELSEN, S. A. C.; HADDELAND, I. Climate change: impacts on electricity markets in Western Europe. **Climatic Change**, 23 nov 2011.
- GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Estudo de Impacto Ambiental do Complexo Industrial do Pecém - São Gonçalo do Amarante e Caucaia – Ceará**. Secretaria

da Infraestrutura – SEINFRA - Governo do Estado de Ceará. Disponível em: <http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento_ambiental/Outras%20Atividades/Completo%20Industrial%20de%20Pec%C3%A9ria_m_CE/EIA-RIMA/VOL.%20I%20-%20EIA/Tomo%20B-2/00_Sum%C3%A9rio_Vol%20I_Tomo%20B%20-%202.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2012. 2009.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Licença de Instalação LI N° 0821/2001-DL. Licença de Instalação da Usina Termelétrica de Jacuí I. 2001.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, pp. 80-91, 20 out 2009.

HANKIN, S.; HARRISON, D. E.; OSBORNE, J.; DAVISON, J.; O'BRIEN, K. A Strategy and a Tool, Ferret, for Closely Integrated Visualization and Analysis. **NOAA**. 1995.

HAWKINS, E.; OSBORNE, T. M.; HO, C. K.; CHALLINOR, A. J. Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 0, pp. 1-13, 2012.

HELPER, F. **Demandas e Disponibilidades Hídricas da Bacia do Rio Pardo nos Cenários Atual Futura para diferentes Sistemas de Produção de Arroz Irrigado**. Dissertação de M.Sc, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

HERRERA, J. **La precipitación: el agua en la atmósfera**, 2009.

HIGHTOWER, M., PIERCE, S. A. The energy challenge. **Nature**, v. 452, n. 7185, pp. 285-286, 19 mar 2008.

HO, C. K., STEPHENSON, D. B., COLLINS, M., FERRO, C. A. T., BROWN, S. J. Calibration Strategies: A Source of Additional Uncertainty in Climate Change Projections. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 1, pp. 21-26, jan 2012.

HOFFMANN, B. S. **O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO2: uma solução para mitigar as emissões de CO2 em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?**. Dissertação de M.Sc, Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

HORA, M. A. G. **Compatibilização da geração de energia em aproveitamento hidrelétricos com os demais usos dos recursos hídricos**. 1. ed. Niteroi - RJ, 2011.

HUTSON, S., BARBER, N., KENNY, JOAN, *et al.* **Estimated Use of Water in the United States in 2000**. U.S. Geological Survey. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/circ/2004/circ1268/index.html>>. Acesso em: 1 dez. 2011. 2005

IAEA. **Operating experience with nuclear power stations in member states in 2003**. International Atomic Energy Agency. Viena, 2004

IBAMA. PARECER TÉCNICO N° 007/2009 – COEND/CGENE/DILIC/IBAMA.

- Licenciamento Ambiental da Usina Termelétrica Seival, a ser instalada no município de Candiota - RS. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 9 fev. 2009 a.
- IBAMA. Parecer Técnico no. 015 /2009 - COEND/CGENE/DILIC/IBAMA. Análise do Plano Básico Ambiental e Atendimento as Condicionantes da LP 293/2008 Empreendimento UTE Porto de Itaquí. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 17 mar. 2009 b.
- IBGE. **Projeção da População do Brasil por sexo e idade: 1980-2050 - Revisão 2008.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- IBGE. **Censo Agropecuário 2006 - Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- IBGE. **Produção da Pecuária Municipal.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- IBGE. **Cartografia,** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- IBGE. **Banco de Dados Agregados - Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 12 maio. 2012.
- IEA. **Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios and Strategies to 2050.** Organization for Economic Cooperation & Devel, International Energy Agency. Paris, 2008.
- INDIA, M. B., BONILLO, D. L. **Detecting and Modelling Regional Climate Change.** Softcover reprint of hardcover 1st ed. 2001. Springer, 2010.
- INEI. **Proyecciones Nacionales.** Instituto Nacional de Estadística e Informática. Disponível em: <<http://www.inei.gob.pe/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0335/cap2.htm>>. Acesso em: 17 jan. 2012.
- IPCC. **Special Report on Emission Scenarios (SRES).** Intergovernmental Panel on Climate Change. Viena, 2000.
- IPCC. **Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001.
- IPCC. **Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- IPCC. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. Disponível em: <http://ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All_FINAL.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2012. 2012.

- KHALIQ, A.; KAUSHIK, S. C. Second-law based thermodynamic analysis of Brayton/Rankine combined power cycle with reheat. **Applied Energy**, v. 78, n. 2, pp. 179-197, jun 2004.
- KOCH, H.; VÖGELE, S. Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change. **Ecological Economics**, v. 68, n. 7, pp. 2031-2039, 15 maio 2009.
- KOCH, H.; VÖGELE, S. Modeling thermoelectric power generation in view of climate change: a comment. **Regional Environmental Change**, v. 11, n. 1, pp. 207-209, 1 mar 2011.
- KOHLI, A.; FRENKEN, K. **Cooling water for energy generation and its impact on national-level water statistics**. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura . Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/catalogues/Thermoelectric_cooling_water_20110429.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2011. 2011.
- KUNDZEWICZ, Z.W, MATA, L., ARNELL, N. W., *et al.* Freshwater resources and their management. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II**. In: the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 173-210. 2007.
- LABGIS. **Sistemas de informações geográficas con ArcGis Desktop 10 - Modulo I**. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- LAMONICA, M. **Drought and Heat Disrupt Energy This Summer**. Disponível em: <<http://www.technologyreview.com/view/428919/drought-and-heat-disrupt-energy-this-summer/>>. Acesso em: 22 ago. 2012.
- LÉVITE, H.; SALLY, H.; COUR, J. Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 28, n. 20-27, pp. 779-786, 2003.
- LIMA, A. G. G. **Máquinas térmicas**. Disponível em: <<http://antoniolima.web.br.com/arquivos/tubina vapor.htm>>. Acesso em: 10 jul. 2012.
- LINNERUD, K., MIDEKSA, T., GUNNAR S. ESKELAND. The Impact of Climate Change on Nuclear Power Supply. **The Energy Journal**, v. 32, n. 1, 2011.
- LUCENA, ANDRÉ FROSSARD PEREIRA DE. **Proposta metodológica para avaliação da vulnerabilidade às mudanças climáticas globais no setor hidroelétrico**. Tese de D.Sc, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- LUCENA, ANDRE FROSSARD PEREIRA, SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 2, pp. 342-350, maio 2010.
- MARENGO, J. **Caracterização do clima no Século XX e Cenários Climáticos no Brasil**

- e na América do Sul para o Século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC.** Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. CPTEC/INPE. São Paulo, Brasil, 2007.
- MCT. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima - Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Brasília, Brasil, 2010.
- MEGAWATSOFT INC. **Psychrometric Calculator.** MegaWatSoft Inc., 2012.
- MERSCHMANN, P., VASQUEZ, E.; SZKLO, A., SCHAEFFER, R. “The CCS technical viability application in coal-fired power plants situated in northeast Brazil: an water consumption case”. **The 7th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems – SDEWES, Ohrid - Macedonia, GHG emissions.** jul, 2012.
- MIDEKSA, T. K., KALLBEKKEN, S. The impact of climate change on the electricity market: A review. **Energy Policy**, v. 38, n. 7, pp. 3579-3585, jul 2010.
- MILOSAVLJEVIC, N., HEIKKILÄ, P. A comprehensive approach to cooling tower design. **Applied Thermal Engineering**, v. 21, n. 9, pp. 899-915, jun 2001.
- MINVILLE, M., BRISSETTE, F., LECONTE, R. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. **Journal of Hydrology**, v. 358, n. 1–2, pp. 70-83, 30 ago 2008.
- MMA. **Caderno da região hidrográfica Atlântico Sul.** Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, Brasil, 2006a.
- MMA. **Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental.** Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, Brasil, 2006b.
- MMA. **Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental.** Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, Brasil, 2006c.
- MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Paraná.** Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, Brasil, 2006d.
- MOHIUDDIN, A. K., KANT, K. Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Part I: Selection and tower characteristics. **International Journal of Refrigeration**, v. 19, n. 1, pp. 43-51, jan 1996a.
- MOHIUDDIN, A. K., KANT, K. Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Part II: Fill and other design parameters. **International Journal of Refrigeration**, v. 19, n. 1, pp. 52-60, jan 1996b.
- MPX GRUPO EBX. Ute Porto do Açú Energia S.A. - Relatório da Administração. **Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro**, pp. 17, 27 mar 2012.
- MPX MINERAÇÃO E ENERGIA LTDA. **Relatório de Impacto Ambiental – Rima, Usina Termoeletrica MPX (Pecém I).** MPX Mineração e Energia Ltda. 2006

- NASA. **Water cycle.** Disponível em: <<http://science.nasa.gov/earth-science/oceanography/ocean-earth-system/ocean-water-cycle/>>. Acesso em: 10 jul. 2012.
- NASCIMENTO, J. A. S. DO. **Vulnerabilidade a eventos climáticos extremos na Amazônia Ocidental: Uma visão integrada na bacia do rio Acre.** Tese de D.Sc, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- NASSAR, A. M.; HARFUCH, L.; MOREIRA, M. M. R.; CHIODI, L.; ANTONIAZZI, L. B. **Modelagem do Uso da Terra no Brasil - Documento Preparado para o “Estudo de Baixo Carbono para o Brasil”.** Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais - ICONE. 2010.
- NEVES, C. F., MUEHE, D. E., VALENTINI, E. M., ROSMAN, P. C. C. **Estudo de Vulnerabilidades no Litoral do Estado do Rio de Janeiro devido às Mudanças Climáticas.** Fundação Coppetec. Rio de Janeiro, Brasil, 2007
- NICHOLLS, ROBERT J, TOL, R. S. Impacts and responses to sea-level rise: A global analysis of the SRES scenarios over the 21st Century. **Philos. T. Roy. Soc. A**, **364**, pp. 1073 - 1095, 2006.
- NNDC. **NNDC Climate Data Online.** National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <<http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd?datasetabbv=GSOD&countryabbv=&georegionabbv=>>. Acesso em: 10 nov. 2011. 2011.
- NOAA. **FERRET - Data Visualization and Analysis.** Pacific Marine Environmental Laboratory, 2011.
- NUNES, R., FREITAS, M., PINGUELLI, L. **Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos No Âmbito Regional e Urbano - Coleção Mudanças Globais.** Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- OLIVEIRA, G. S. DE. **El Niño.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 15 ago. 2012.
- ONS. **Inventário das restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos.** Operador Nacional do Sistema Elétrico. 2007.
- PAN, L., LIU, P., MA, L., LI, Z. A supply chain based assessment of water issues in the coal industry in China. **Energy Policy**, v. 48, n. 0, pp. 93-102, set 2012.
- PARKER, S. P. **McGraw-Hill Encyclopedia of Energy.** 2nd edition ed. McGraw-Hill, 1981.
- PEREZ-GARCIA, J., JOYCE, L. A., MCGUIRE, A. D., XIAO, X. Impacts of climate change on the global forest sector. **Climate Change**, n. 54, pp. 439–461, 2002.
- PESTANA, A. **Elementos de Geodesia e Cartografia.** Disponível em: <http://topografiasig.isep.ipp.pt/apontamentos/Apontamentos%20SIG/Textos/geodesia_cartografia.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2012. 2008.

- PIANI, C., WEEDON, G. P., BEST, M., *et al.* Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 395, n. 3–4, pp. 199-215, 15 dez 2010.
- PINTO, N. DE S., TATIT, A. C., MARTINS, J. A. **Hidrologia de Superfície**. 2. ed. Edgar Blucher Ltda, 1973.
- RAJ, P., SINGH, V. **Applied Hydrometeorology**. Springer, 2009.
- RFI. **France scorched by heatwave after months of rain**. Radio France Internationale. Disponível em: <<http://www.english.rfi.fr/visiting-france/20120818-france-scorched-heatwave-after-months-rain>>. Acesso em: 25 ago. 2012.
- RIO CARRILLO, A. M.; FREI, C. Water: A key resource in energy production. **Energy Policy**, v. 37, n. 11, pp. 4303-4312, nov 2009.
- ROCHEDO, P. R. R. **Análise econômica sob incerteza da captura de carbono em termoeletricas a carvão: Retrofitting e Capture-Ready**. Dissertação de M.Sc, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- RODRIGUEZ, L. M. **Alterações espaciais e temporais de características limnológicas resultantes da transformação rio-reservatório na área do reservatório da usina hidrelétrica Dona Francisca, RS, Brasil**. Dissertação de M.Sc, Programa de Pós-Graduação em Ecologia – Instituto de Biociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.
- ROSENZWEIG, C., STRZEPEK, K. M., MAJOR, D. C., *et al.* Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. **Global Environmental Change**, v. 14, n. 4, pp. 345-360, dez 2004.
- SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S., LUCENA, ANDRÉ FROSSARD PEREIRA DE; *et al.* **Climate Change: Energy Security**. PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2008a.
- SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S., LUCENA, A.F.P., *et al.* **Economia das Mudanças Climáticas No Brasil - Segurança Energética**. PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2008b.
- SCHAEFFER, R., SZKLO, A. S., LUCENA, A. F.P., *et al.* Energy sector vulnerability to climate change: A review. **Energy**, v. 38, n. 1, pp. 1-12, fev 2012.
- SEI. **WEAP (Water Evaluation and Planning): User Guide for WEAP21**. Stockholm Environment Institute. Boston, EUA, 2001.
- SEI. **Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP**. Stockholm Environment Institute, Universidad de Chile. 2009.
- SEI. **Long range Energy Alternatives Planning System - LEAP**. Stockholm Environment Institute, 2012a.
- SEI. **WEAP**. Stockholm Environment Institute, 2012b.
- SEMA. **Relatório Síntese da Fase A- RSA Diagnóstico e Prognóstico Hídrico das Bacias Hidrográficas do Rio Grande do Sul. Contrato N° 002/06, Elaboração**

- do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul.** Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Governo do Estado do Rio Grande do Sul. 2007.
- SEMA. **Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul.** Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/>>. Acesso em: 15 maio. 2012.
- SEMA PARANÁ. **Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos - Diagnóstico das demandas e disponibilidades hídricas superficiais (definição do balanço entre disponibilidades e demandas).** Secretaria do Estado de Meio Ambiente, Governo do Estado de Paraná. 2010.
- SIRH/CE. **Eixão.** Sistema de Informações dos Recursos Hídricos do Ceará. Disponível em: <<http://www.srh.ce.gov.br/index.php/eixao>>. Acesso em: 15 mar. 2012.
- SIRH/CE. **Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará.** Sistema de Informações dos Recursos Hídricos do Ceará. Disponível em: <<http://atlas.srh.ce.gov.br/>>. Acesso em: 10 jun. 2012. 2012.
- SRH/CE. **Secretaria dos Recursos Hídricos do Governo de Ceará.** Sistema de Informações dos Recursos Hídricos do Ceará. Disponível em: <<http://www.srh.ce.gov.br/>>. Acesso em: 12 abr. 2012.
- SSMA/RS. PORTARIA N.º 05/89 - SSMA. Aprova a NORMA TÉCNICA SSMA N.º 01/89 – DMA, que dispõe sobre critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados por todas as fontes poluidoras que lancem seus efluentes nos corpos d'água interiores do Estado do Rio Grande do Sul. pp. 1-6. 1989.
- STAMM, H. R. **Método para Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) em Projetos de Grande Porte: Estudo de Caso de uma Usina Termelétrica.** Dissertação de M.Sc, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003.
- STETZEL, D. **France's nuclear delays, heat wave, lifts prompt to six-month high.** Disponível em: <<http://www.platts.com/RSSFeedDetailedNews/RSSFeed/ElectricPower/8645390>>. Acesso em: 22 ago. 2012.
- TEUTSCHBEIN, C., SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456–457, n. 0, pp. 12-29, 16 ago 2012.
- THERMAL POWERTEC LTD. **Steam Condenser & Cooling Systems.** Disponível em: <<http://www.tpowertec.com/coolingsystems.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2011. 2011.
- TRACTEBEL ENERGIA. **Ficha Técnica - UTE Charqueadas.** Disponível em: <<http://www2.tractebelenergia.com.br/asp/system/viewPage.asp?P=976&VID=&SID=602009732775945&S=1&A=setvalue:setpopup:Y&template=popup&C=41238>>. Acesso em: 10 set. 2011a. 2011.
- TRACTEBEL ENERGIA. **Ficha Técnica - Complexo Térmico Jorge Lacerda.** Disponível em: <<http://www2.tractebelenergia.com.br/asp/system/viewPage.asp?P=973&VID=&SID=602009732775945&S=1&A=setvalue:setpopup:Y&template=popup&C=41238>>. Acesso em: 10 set. 2011b. 2011.

- D=642478672185396&S=1&A=setvalue:setpopup:Y&template=popup&C=33637>
 . Acesso em: 10 set. 2011b.2011.
- UNESCO. **Managing Water Under Uncertainty and Risk**. United Nations Educational, v. I. 2012.
- UNFCCC. **Water and climate change impacts and adaptation strategies**. Framework Convention on Climate Change. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/2011/tp/05.pdf>>. Acesso em: 12 maio. 2012. 22 nov 2011.
- UNITED NATIONS NEWS SERVICE. **At World Economic Forum, Ban Ki-moon pledges action on water resources**. Disponível em: <<http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=25398&Cr=davos&Cr1>>. Acesso em: 24 ago. 2012.
- UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. **TermoGraf - simulador termodinâmico**. Universidad de Zaragoza, España, 2011.
- USEPA. Sec. 316. Thermal Discharges. Cooling Water Intake Structures—CWA §316(b). United States Environmental Protection Agency. 2011a.
- USEPA. **Technical Development Document for the Proposed Section 316(b) Phase II Existing Facilities Rule**. Office of Water - U.S. Environmental Protection Agency. 2011b.
- USINA TERMELÉTRICA (UTE) PORTO DO AÇU ENERGIA S/A. **Relatório de Impacto Ambiental - RIMA da Usina Termelétrica Porto do Açu Energia S/A**. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- VAMERLATI, J. **Um Olhar Sócio-Ambiental da História: A trajetória do movimento ambientalista e seus conflitos com a atividade carbonífera no sul de Santa Catarina**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2008.
- VIÉGAS, R. N. **Conflitos Ambientais no Rio de Janeiro: Estudos dos Casos do Projeto da Usina Termelétrica de Sepetiba e do Projeto da Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA)**. Dissertação de M.Sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- WARK, K.; RICHARDS, D. **Termodinâmica**. 6. ed. McGraw Hill, 2001.
- WEBBER, M. E. Will Drought Cause the Next Blackout? **The New York Times**, 23 jul 2012.
- WEF. **Energy Vision Update 2009, Thirsty Energy: Water and Energy in the 21st Century**. World Economic Forum. Suíça, 2008.
- WU, C. **Thermodynamics And Heat Powered Cycles: A Cognitive Engineering Approach**. Nova Science Publishers, Inc. New York, 2007.
- YATES, D., SIEBER, J., PURKEY, D., LEE, A. H.- WEAP21 – A Demand, Priority, and Preference Driven Water Planning Model - Part 1: Model Characteristics. **International Water Resources Association**, v. 30, n. 4, pp. 487-500, 2005.

- ZHAI, H., RUBIN, E., VERSTEEG, P. Water Use at Pulverized Coal Power Plants with Postcombustion Carbon Capture and Storage. **Environmental Science and Technology**, pp. 2479 - 2485, 2011.
- ZHAI, H., RUBIN, E. S. Carbon capture effects on water use at pulverized coal power plants. **Energy Procedia**, v. 4, pp. 2238-2244, 2011.

APENDICE A - Resultados de precipitação (mm) e temperatura para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3 para o cenário A2 e B1 no período 2021 – 2050.

Resultados de precipitação (mm) para os modelos climáticos CGCM3.1, MIROC3.2, UKMO-HADCM3 para o cenário A2 no período 2021 – 2050.

Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Alto Jacuí												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.2	184,33	118,47	111,92	130,24	154,59	139,57	133,39	115,71	191,67	227,31	152,22	129,61
MIROC3.2	188,02	168,12	103,57	151,67	108,94	130,80	245,76	127,11	150,53	240,58	130,22	140,51
UKMO-HADCM3	231,58	119,70	104,48	177,96	98,80	122,39	191,43	94,14	192,37	260,00	169,56	123,98
Referência	177,29	127,67	90,42	160,88	125,45	155,91	147,56	106,45	197,79	223,21	139,33	125,92
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Hidrelétrica												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	250,97	167,98	184,21	174,56	141,77	173,86	211,16	148,58	185,41	171,81	167,48	160,35
MIROC3.2	206,99	217,87	160,40	173,09	117,96	122,16	311,87	148,29	139,96	206,07	119,27	153,87
UKMO-HADCM3	245,35	137,22	164,42	203,25	144,86	114,08	270,13	116,94	215,41	168,04	128,76	120,90
Referência	195,17	165,46	140,04	183,60	135,83	145,60	187,26	124,18	183,91	191,19	127,62	137,90

Precipitação (mm) / Período 2021-2050**Área de captação: Dona Francisca**

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	244,53	163,67	179,49	170,09	138,13	169,40	205,74	144,77	180,65	167,40	163,18	156,24
MIROC3.2	201,68	212,29	156,29	168,65	114,93	119,02	303,87	144,49	136,37	200,79	116,21	149,93
UKMO-HADCM3	239,06	133,70	160,20	198,04	141,15	111,15	263,20	113,95	209,88	163,73	125,46	117,80
Referência	190,16	161,22	136,45	178,90	132,34	141,87	182,46	121,00	179,20	186,29	124,34	134,36

Precipitação (mm) / Período 2021-2050**Área de captação: São Lorenzo**

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	221,75	163,30	152,66	154,61	121,13	181,79	176,12	147,55	166,91	158,45	161,55	160,74
MIROC3.2	182,89	211,80	132,93	153,31	100,78	127,73	260,12	147,27	126,00	190,05	115,05	154,25
UKMO-HADCM3	215,81	134,93	145,33	182,23	122,52	116,25	250,16	114,02	195,60	152,02	115,92	122,05
Referência	155,60	112,06	79,36	141,20	110,10	136,84	129,51	93,43	173,60	195,90	122,29	110,51

Precipitação (mm) / Período 2021-2050**Área de captação: CTSUL**

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	160,37	127,54	131,41	157,51	112,80	144,57	182,47	126,00	149,98	132,82	145,11	126,23
MIROC3.2	142,63	180,83	116,45	161,21	82,80	89,15	148,65	97,78	85,92	134,07	96,12	126,22
UKMO-HADCM3	150,23	102,96	123,05	184,18	109,75	90,63	258,29	94,80	168,02	129,41	106,61	99,78

Referência	124,71	125,63	99,90	165,67	108,07	121,08	161,82	105,31	148,77	147,81	110,58	108,56
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Restinga Seca												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	231,66	155,06	170,04	161,13	130,86	160,48	194,91	137,15	171,15	158,59	154,59	148,01
MIROC3.2	191,06	201,11	148,06	159,77	108,88	112,76	287,88	136,88	129,20	190,22	110,10	142,04
UKMO-HADCM3	226,47	126,66	151,77	187,61	133,72	105,30	249,35	107,95	198,84	155,11	118,85	111,60
Referência	180,15	152,73	129,27	169,48	125,38	134,40	172,86	114,63	169,76	176,49	117,80	127,29
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Vacacai												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	172,71	113,99	161,02	160,23	120,72	146,98	165,60	117,58	147,56	129,78	133,69	127,53
MIROC3.2	153,60	161,61	142,68	164,00	88,62	90,63	134,91	91,24	84,53	131,00	88,55	127,51
UKMO-HADCM3	174,50	94,91	152,23	188,91	114,04	94,92	231,64	88,72	170,04	127,11	98,67	97,27
Referência	134,31	112,27	122,41	168,53	115,66	123,10	146,86	98,27	146,37	144,42	101,87	109,67

Resultados de precipitação (mm) para os modelos climáticos CGCM3.1, GFDL_CM2, MIROC3.2, UKMO-HADCM3 para o cenário B1 no período 2021 – 2050.

Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Alto Jacuí												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	179,12	140,28	101,20	156,76	150,58	132,36	153,40	100,89	188,28	243,53	139,12	131,91
MIROC3.2	156,40	148,00	105,18	130,18	94,55	98,98	189,16	139,69	157,49	284,15	124,06	149,12
UKMO-HADCM3	227,43	143,33	135,60	197,96	85,46	100,38	139,57	83,26	205,05	238,97	172,49	129,64
Referência	177,29	127,67	90,42	160,88	125,45	155,91	147,56	106,45	197,79	223,21	139,33	125,92
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Hidrelétrica												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	234,99	171,55	169,11	209,39	143,52	138,18	229,04	151,64	194,31	182,58	164,52	163,89
MIROC3.2	172,18	191,80	162,89	148,56	102,37	92,44	240,05	162,96	146,44	243,39	113,63	163,30
UKMO-HADCM3	222,51	163,51	230,66	219,23	129,73	83,32	203,75	105,74	219,97	154,94	138,88	130,07
Referência	195,17	165,46	140,04	183,60	135,83	145,60	187,26	124,18	183,91	191,19	127,62	137,90
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Dona Francisca												

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	228,97	167,15	164,77	204,02	139,84	134,64	223,17	147,76	189,33	177,89	160,30	159,69
MIROC3.2	167,76	186,88	158,72	144,75	99,75	90,07	233,89	158,78	142,68	237,15	110,71	159,12
UKMO-HADCM3	216,80	159,31	224,75	213,61	126,41	81,19	198,53	103,03	214,33	150,97	135,32	126,74
Referência	190,16	161,22	136,45	178,90	132,34	141,87	182,46	121,00	179,20	186,29	124,34	134,36
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: São Lorenzo												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	207,63	166,77	140,15	185,46	122,63	144,49	191,03	150,60	174,92	168,38	158,70	164,29
MIROC3.2	152,13	186,46	135,00	131,58	87,47	96,66	200,21	161,84	131,82	224,47	109,61	163,70
UKMO-HADCM3	195,72	160,78	203,89	196,56	109,73	84,91	188,69	103,10	199,74	140,18	125,04	131,31
Referência	155,60	112,06	79,36	141,20	110,10	136,84	129,51	93,43	173,60	195,90	122,29	110,51
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: CTSUL												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	150,16	130,25	120,64	188,93	114,19	114,91	197,92	128,60	157,18	141,15	142,55	129,02
MIROC3.2	118,64	159,19	118,26	138,37	71,86	67,46	114,42	107,45	89,89	158,35	91,57	133,96
UKMO-HADCM3	136,25	122,68	172,63	198,66	98,29	66,19	194,83	85,72	171,58	119,33	115,00	107,36

Referência	124,71	125,63	99,90	165,67	108,07	121,08	161,82	105,31	148,77	147,81	110,58	108,56
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Restinga Seca												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	216,91	158,35	156,10	193,28	132,48	127,55	211,42	139,98	179,36	168,53	151,87	151,28
MIROC3.2	158,93	177,05	150,36	137,14	94,50	85,33	221,58	150,43	135,17	224,67	104,89	150,74
UKMO-HADCM3	205,39	150,93	212,92	202,36	119,75	76,91	188,08	97,61	203,05	143,03	128,20	120,07
Referência	180,15	152,73	129,27	169,48	125,38	134,40	172,86	114,63	169,76	176,49	117,80	127,29
Precipitação (mm) / Período 2021-2050												
Área de captação: Vacacaí												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	161,71	116,41	147,81	192,19	122,21	116,82	179,63	120,00	154,65	137,91	131,33	130,35
MIROC3.2	127,77	142,27	144,90	140,76	76,91	68,58	103,84	100,26	88,44	154,72	84,36	135,33
UKMO-HADCM3	158,25	113,09	213,57	203,76	102,13	69,33	174,72	80,22	173,64	117,21	106,43	104,66
Referência	134,31	112,27	122,41	168,53	115,66	123,10	146,86	98,27	146,37	144,42	101,87	109,67

Resultados de temperatura (°C) para os modelos climáticos CGCM3.1, GFDL_CM2, MIROC3.2, UKMO-HADCM3 para o cenário A2 no período 2021 – 2050,

Temperatura (°C)												
Área de captação: Alto Jacuí												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	27,24	24,36	24,63	21,29	16,52	15,55	14,64	16,46	16,81	20,77	22,75	24,79
MIROC3.2	26,14	25,25	25,25	22,09	17,15	16,53	16,82	16,40	18,50	20,60	23,93	24,94
UKMO-HADCM3	27,28	24,64	24,33	21,07	16,64	16,00	15,15	15,85	17,76	20,66	23,80	25,19
Referência	25,71	24,74	23,78	20,33	15,82	14,38	14,19	15,44	16,66	19,88	22,60	25,16
Temperatura (°C)												
Área de captação: Hidrelétrica												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	27,87	24,99	25,26	21,92	17,15	16,18	15,27	17,09	17,44	21,40	23,38	25,42
MIROC3.2	26,77	25,88	25,88	22,72	17,78	17,16	17,45	17,03	19,13	21,23	24,56	25,57
UKMO-HADCM3	27,91	25,27	24,96	21,70	17,27	16,63	15,78	16,48	18,39	21,29	24,43	25,82
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: Dona Francisca												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro

CGCM3.1	27,87	24,99	25,26	21,92	17,15	16,18	15,27	17,09	17,44	21,40	23,38	25,42
MIROC3.2	26,77	25,88	25,88	22,72	17,78	17,16	17,45	17,03	19,13	21,23	24,56	25,57
UKMO-HADCM3	27,91	25,27	24,96	21,70	17,27	16,63	15,78	16,48	18,39	21,29	24,43	25,82
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: São Lorenzo												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	27,87	24,99	25,26	21,92	17,15	16,18	15,27	17,09	17,44	21,40	23,38	25,42
MIROC3.2	26,77	25,88	25,88	22,72	17,78	17,16	17,45	17,03	19,13	21,23	24,56	25,57
UKMO-HADCM3	27,91	25,27	24,96	21,70	17,27	16,63	15,78	16,48	18,39	21,29	24,43	25,82
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: Restinga Seca												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	27,87	24,99	25,26	21,92	17,15	16,18	15,27	17,09	17,44	21,40	23,38	25,42
MIROC3.2	26,77	25,88	25,88	22,72	17,78	17,16	17,45	17,03	19,13	21,23	24,56	25,57
UKMO-HADCM3	27,91	25,27	24,96	21,70	17,27	16,63	15,78	16,48	18,39	21,29	24,43	25,82
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81

Temperatura (°C)												
Área de captação: CTSUL												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	27,87	24,99	25,26	21,92	17,15	16,18	15,27	17,09	17,44	21,40	23,38	25,42
MIROC3.2	26,77	25,88	25,88	22,72	17,78	17,16	17,45	17,03	19,13	21,23	24,56	25,57
UKMO-HADCM3	27,91	25,27	24,96	21,70	17,27	16,63	15,78	16,48	18,39	21,29	24,43	25,82
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: Vacacaí												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	27,87	24,99	25,26	21,92	17,15	16,18	15,27	17,09	17,44	21,40	23,38	25,42
MIROC3.2	26,77	25,88	25,88	22,72	17,78	17,16	17,45	17,03	19,13	21,23	24,56	25,57
UKMO-HADCM3	27,91	25,27	24,96	21,70	17,27	16,63	15,78	16,48	18,39	21,29	24,43	25,82
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81

Resultados de temperatura (°C) para os modelos climáticos CGCM3.1, GFDL_CM2, MIROC3.2, UKMO-HADCM3 para o cenário B1 no período 2021 – 2050,

Temperatura (°C)												
Área de captação: Alto Jacuí												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	26,76	24,57	24,41	21,35	16,42	15,41	14,70	16,68	17,06	21,11	23,01	24,48
MIROC3.2	26,32	25,64	25,20	21,24	16,65	15,84	17,19	16,49	17,91	20,33	24,15	24,63
UKMO-HADCM3	27,37	24,84	24,53	21,13	16,93	15,98	15,50	15,90	18,38	20,86	23,98	25,00
Referência	25,71	24,74	23,78	20,33	15,82	14,38	14,19	15,44	16,66	19,88	22,60	25,16
Temperatura (°C)												
Área de captação: Hidrelétrica												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	27,39	25,20	25,04	21,98	17,05	16,04	15,33	17,31	17,69	21,74	23,64	25,11
MIROC3.2	26,95	26,27	25,83	21,87	17,28	16,47	17,82	17,12	18,54	20,96	24,78	25,26
UKMO-HADCM3	28,00	25,47	25,16	21,76	17,56	16,61	16,13	16,53	19,01	21,49	24,61	25,63
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: Dona Francisca												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
CGCM3.1	27,39	25,20	25,04	21,98	17,05	16,04	15,33	17,31	17,69	21,74	23,64	25,11

MIROC3.2	26,95	26,27	25,83	21,87	17,28	16,47	17,82	17,12	18,54	20,96	24,78	25,26
UKMO-HADCM3	28,00	25,47	25,16	21,76	17,56	16,61	16,13	16,53	19,01	21,49	24,61	25,63
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: Sao Lorenzo												
CGCM3.1	Janeiro 27,39	Fevereiro 25,20	Março 25,04	Abril 21,98	Maio 17,05	Junho 16,04	Julho 15,33	Agosto 17,31	Setembro 17,69	Outubro 21,74	Novembro 23,64	Dezembro 25,11
MIROC3.2	26,95	26,27	25,83	21,87	17,28	16,47	17,82	17,12	18,54	20,96	24,78	25,26
UKMO-HADCM3	28,00	25,47	25,16	21,76	17,56	16,61	16,13	16,53	19,01	21,49	24,61	25,63
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: Restinga Seca												
CGCM3.1	Janeiro 27,39	Fevereiro 25,20	Março 25,04	Abril 21,98	Maio 17,05	Junho 16,04	Julho 15,33	Agosto 17,31	Setembro 17,69	Outubro 21,74	Novembro 23,64	Dezembro 25,11
MIROC3.2	26,95	26,27	25,83	21,87	17,28	16,47	17,82	17,12	18,54	20,96	24,78	25,26
UKMO-HADCM3	28,00	25,47	25,16	21,76	17,56	16,61	16,13	16,53	19,01	21,49	24,61	25,63
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: CTSUL												

CGCM3.1	Janeiro 27,39	Fevereiro 25,20	Março 25,04	Abril 21,98	Maio 17,05	Junho 16,04	Julho 15,33	Agosto 17,31	Setembro 17,69	Outubro 21,74	Novembro 23,64	Dezembro 25,11
MIROC3.2	26,95	26,27	25,83	21,87	17,28	16,47	17,82	17,12	18,54	20,96	24,78	25,26
UKMO- HADCM3	28,00	25,47	25,16	21,76	17,56	16,61	16,13	16,53	19,01	21,49	24,61	25,63
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81
Temperatura (°C)												
Área de captação: Vacacaí												
CGCM3.1	Janeiro 27,39	Fevereiro 25,20	Março 25,04	Abril 21,98	Maio 17,05	Junho 16,04	Julho 15,33	Agosto 17,31	Setembro 17,69	Outubro 21,74	Novembro 23,64	Dezembro 25,11
MIROC3.2	26,95	26,27	25,83	21,87	17,28	16,47	17,82	17,12	18,54	20,96	24,78	25,26
UKMO- HADCM3	28,00	25,47	25,16	21,76	17,56	16,61	16,13	16,53	19,01	21,49	24,61	25,63
Referência	26,34	25,07	24,41	20,97	16,45	15,40	14,82	16,14	17,29	20,51	23,21	24,81