

MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM REFINARIAS DE PETRÓLEO
BRASILEIRAS: O CASO DA REPLAN

Leticia Magalar Martins de Souza

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

Orientador(es): André Frossard Pereira de Lucena
Alexandre Salem Szklo

Rio de Janeiro
Março de 2018

MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM REFINARIAS DE
PETRÓLEO BRASILEIRAS: O CASO DA REPLAN

Leticia Magalar Martins de Souza

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. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

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

Profa. Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc.

Prof. José Tavares Araruna Júnior, PhD.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2018

Souza, Leticia Magalar Martins de

Análise da disponibilidade hídrica como um fator de restrição à produção de derivados em refinarias/ Leticia Magalar Martins de Souza – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVI, 150 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: André Frossard Pereira de Lucena

Alexandre Salem Szklo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 137-146.

1. Disponibilidade hídrica. 2. Refinarias. 3. Reuso de Água. I. Szklo, Alexandre Salem *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Ao pequeno Kai

“Assaz o senhor sabe: a gente
quer passar um rio a nado, e
passa; mas vai dar na outra
banda é num ponto muito mais
embaixo, bem diverso do em que
primeiro se pensou. Viver nem
não é muito perigoso?”
– João Guimarães Rosa

Agradecimentos

À minha avó Marília (in memoriam), avó dos olhos brilhantes, que encheu a minha vida de muito amor e lembranças maravilhosas. E ao meu avô Nelson (in memoriam), que sempre acreditou em mim e apoiou minhas decisões ao longo da vida. Tínhamos combinado que ele viria ao Rio, sentaria na primeira cadeira da sala e tentaria, finalmente, entender sobre o que se tratava o meu mestrado. Sei que de alguma forma ele ainda estará presente, como sendo responsável pela construção de quem sou e de meus valores.

A minha mãe que sempre apoia as minhas mudanças radicais de carreira e está presente para o que der e vier. Ao meu pai, que apesar de toda a ausência, me incentivou a estudar e querer alcançar sempre mais.

Ao Alexandre Szklo, que influenciou minha decisão em migrar para a área de energia com suas aulas incríveis. Muito obrigada por sua disponibilidade e orientação.

Ao André Lucena, pela orientação e conversa que me fez não desistir do mestrado.

A Sandrinha e Paulo sempre dispostos a resolver os problemas acadêmicos.

Aos queridos amigos do PPE que tornaram os meus dias muito mais divertidos, eles tiveram a incrível capacidade de tornar leve o primeiro ano do mestrado. À querida Paula, com quem dividi minhas ansiedades e minhas idéias. A Isa que virou meu exemplo de organização. À Cindy com seu jeitinho meigo e amigo. À Heliz, figurinha que não tira o sorriso do rosto. Ao Bernardo, companheiro de carona que acabou sumindo de nossas vidas. Ao Fabio, com seu jeito Fabio de ser, mais direto e divertido impossível. À Vanessa, sempre pronta para ajudar. À Gabi, com sua empolgação contagiante. Ao Murilo e as suas murilagens. Ao Lucas com suas histórias surreais. Ao Otto com seus questionamentos e curiosidades sobre a vida. À Eveline, com quem pude trocar idéias sobre a dissertação e sobre a vida, que fez toda a diferença na minha trajetória no mestrado. Ao Pedro, por toda a sua disponibilidade e criatividade.

As grandes amigas que sempre me apoiam. Aline e Gabi pelas visitas que me deixam mais feliz. À Claudinha, pelas conversas, viagens e incentivo para entrar no mestrado. À Vivian pela amizade de uma vida inteira. À Erica, grande amiga e grande médica, que estava presente em todas as emergências de uma surpreendente gravidez de alto risco nos últimos dias de gestação.

A Bia, Manu, Mari, Clarissa, Ana, Fernanda, Carol, Ilana, no começo minhas companheiras de equipe de canoagem e agora minhas companheiras de maternidade. Elas se tornaram o meu melhor apoio.

Ao Denis, Eliana, Joana e Maya, a família que a vida me presenteou.

Ao Lucas, meu amor, meu amigo e meu grande incentivador, que embarcou comigo nessa maravilhosa missão de construir uma família e se tornou um pai maravilhoso.

Ao Kai, que com seus poucos meses de vida já me impulsiona, me faz querer ser uma pessoa melhor e me dá energia para alcançar os meus objetivos.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

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

MODELAGEM DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA EM REFINARIAS DE
PETRÓLEO BRASILEIRAS: O CASO DA REPLAN

Leticia Magalar Martins de Souza

Março/2018

Orientadores: André Frossard Pereira de Lucena

Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

A água é um recurso essencial para a produção de derivados, porém cada vez mais escasso. No Brasil, em casos de carência hídrica, prioriza-se o abastecimento humano e animal, o que afeta diretamente o setor industrial. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar em que medida os múltiplos usos de água de uma região podem afetar a operação de refinarias e indicar possíveis alternativas para reduzir o consumo de água. Para este fim, a produção do parque de refino brasileiro foi simulada para se obter sua demanda hídrica através da ferramenta *Carbon and Energy Strategy Analysis for Refineries* (CAESAR). A seguir, a região em que cada refinaria se encontra foi classificada em relação a disponibilidade de água através de dois indicadores e escolheu-se uma refinaria em situação crítica para um estudo de caso. Este consiste na elaboração de um balanço hídrico da região hidrográfica a qual está inserida a refinaria considerando os demais usos consuntivos durante o período entre 2015 e 2040 com o auxílio da ferramenta *Water Evaluation and Planning* (WEAP). A refinaria escolhida foi a REPLAN e os resultados obtidos indicam a possibilidade de restrição futura de água em função do conflito dos múltiplos usos de água na região analisada. Por fim, sugerem-se possíveis formas de minimizar o consumo de água das refinarias.

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

MODELING OF WATER AVAILABILITY IN BRAZILIAN PETROLEUM
REFINERIES: THE CASE OF REPLAN

Leticia Magalar Martins de Souza

March/2018

Advisors: André Frossard Pereira de Lucena

Alexandre Salem Szklo

Department: Energy Planning

Water is an essential resource for the production of derivatives, but increasingly scarce. In Brazil, in cases of water shortages, human and animal supplies are prioritized, which directly affects the industrial sector. In this context, the present study aims to analyze to what extent the multiple uses of water in a region can affect the operation of refineries and indicate possible alternatives to reduce water consumption. To this end, the production of the Brazilian refining plant was simulated to obtain its water demand through the tool Carbon and Energy Strategy Analysis for Refineries (CAESAR). Next, the region in which each refinery is located was classified in relation to the availability of water through two indicators and a refinery was chosen in a critical location for a case study. This consists in the elaboration of a water balance of the hydrographic region that the refinery is inserted considering other consumptive uses during the period between 2015 and 2040 with the aid of the Water Evaluation and Planning (WEAP) tool. The refinery chosen was REPLAN and the results obtained indicate the possibility of future water restriction due to the conflict of multiple water uses in the analyzed region. Finally, it is suggested possible ways of minimizing the water consumption of oil refineries.

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivo	4
1.2.	Estrutura	5
2.	Uso de Água no Refino	6
2.1.	Parque de Refino Brasileiro	6
2.2.	Descrição das principais Unidades de Refino	12
2.2.1.	Unidade de Dessalgação	13
2.2.2.	Unidades de Destilação Atmosférica e Destilação à Vácuo (UDA/UDV).....	14
2.2.3.	Unidade de Craqueamento Catalítico (FCC).....	15
2.2.4.	Unidades de Hidrotratamento (HDT)	16
2.2.5.	Unidade de Geração de Hidrogênio (UGH)	17
2.2.6.	Unidade de Coqueamento Retardado	19
2.2.7.	Unidades de Processamento de água	19
2.2.7.1.	Estação de Tratamento de água (ETA).....	19
2.2.7.2.	Unidade retificadora de águas ácidas	20
2.2.7.3.	Estação de tratamento de despejos industriais (ETDI)	21
2.3.	Utilização de água no refino	22
2.3.1.	Água de resfriamento.....	23
2.3.2.	Água de alimentação em caldeira	27
2.3.3.	Água de Processo	28
2.3.4.	Água para o combate a incêndios	28
2.3.5.	Água potável.....	28
2.3.6.	Água de lavagem	29
2.4.	Estudos sobre o uso de água no setor de refino nacional	29
2.5.	Principais Alternativas de Reuso de Água em Refinarias	34
2.5.1.	Reuso de água de processo	34
2.5.2.	Alteração dos ciclos de concentração	36
2.5.3.	Uso de resfriadores a ar (air coolers).....	37
2.5.4.	Medidas de Eficiência Energética	38
2.5.5.	Utilização de água pluvial	39
2.5.6.	Utilização de água de esgoto tratada	40
3.	Recursos Hídricos no Brasil	41
3.1.	Usos de água.....	42

3.2.	A Regulamentação da água	45
3.3.	Disponibilidade hídrica.....	49
4.	Procedimento Metodológico	51
4.1.	Simulação do Parque de Refino	52
4.1.1.	Estimativa de demanda hídrica no CAESAR.....	56
4.2.	Análise dos recursos hídricos disponíveis.....	58
4.3.	Simulação da disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas.....	60
4.3.1.	Delimitação da área de estudo	63
4.3.2.	Dados climatológicos	65
4.3.3.	Identificação das demandas de água.....	66
4.3.4.	Outros pontos de interesse.....	73
4.3.5.	Requisito Mínimo de Fluxo	73
4.3.6.	Calibragem do cenário de linha de base	73
5.	Premissas, Estudo de Caso e Resultados	76
5.1.	Simulação no CAESAR	76
5.2.	Avaliação da Disponibilidade Hídrica.....	80
5.3.	Estudo de Caso: A Refinaria de Paulínia.....	86
5.3.1.	Regras de Uso de água na bacia PCJ	90
5.3.2.	Delimitação da área estudada	91
5.3.3.	Variáveis climáticas utilizadas	93
5.3.4.	Cálculo das Demandas por tipo de uso.....	101
5.3.5.	Infraestrutura Física, Importações e Exportações de água	111
5.3.6.	Ordens de Prioridade	115
5.3.7.	Regularização de Vazões.....	116
5.3.8.	Calibragem do Modelo	119
5.3.9.	Resultados.....	124
5.4.	Discussão	127
6.	Considerações Finais	132
	Referências Bibliográficas.....	137
	ANEXO 1: Análise do preenchimento dos dados de precipitação	147
	ANEXO II: Vazões simuladas para o posto pluviométrico Foz do Jaguari	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Capacidade Nominal das refinarias e volume de petróleo processado em Mbbl/dia no ano de 2016	8
Figura 2: Participação das refinarias no processamento de petróleo em 2016.....	10
Figura 3: Percentual de produção de derivados energéticos em 2016.....	11
Figura 4: Consumo em percentual dos principais derivados de petróleo	12
Figura 5: Etapas do processo de refino.....	13
Figura 6: Percentual de uso de água em refinaria.....	23
Figura 7: Sistema de resfriamento aberto	24
Figura 8: Sistema de resfriamento semi-aberto	25
Figura 9: Sistema de Resfriamento fechado	26
Figura 10: Demonstração da economia de água com a utilização de air coolers	38
Figura 11: Percentual da vazão de retirada de água no Brasil por tipo de uso	43
Figura 12: Percentual da vazão de consumo de água no Brasil por tipo de uso.....	43
Figura 13: Esquema metodológico do WEAP.....	52
Figura 14: Esquema geral de refino da ferramenta CAESAR.....	54
Figura 15: Localização das refinarias em função da disponibilidade hídrica (Indicador I)	83
Figura 16: Localização das refinarias em função da disponibilidade hídrica (Indicador II)	84
Figura 17: Produção de derivados da REPLAN em 2016	86
Figura 18: Mapa da bacia dos rios Piracicaba, Corumbataí e Jundiaí.....	87
Figura 19: Divisão das áreas de captação	92
Figura 20: Localização dos postos pluviométricos	95
Figura 21: Precipitação Média Mensal para o ano base de 2015 na área de captação Jaguari.....	97
Figura 22: Modelagem da precipitação média anual para o período 2016-2040 da área de captação Jaguari.....	98
Figura 23: Precipitação Média Mensal para o ano base de 2015 na área de captação Camanducaia	98
Figura 24: Modelagem da precipitação média anual para o período 2016-2040 da área de captação Camanducaia.....	99

Figura 25: Precipitação Média Mensal para o ano base de 2015 na área de captação Pinhal.....	99
Figura 26: Modelagem da precipitação média anual para o período 2016-2040 da área de captação Pinhal	100
Figura 27: Evapotranspiração de Referência da área de captação Pinhal no ano base	100
Figura 28: Evapotranspiração de Referência da área de captação Camanducaia no ano base	101
Figura 29: Evapotranspiração de Referência da área de captação Jaguari no ano base	101
Figura 30: Projeção da demanda de água para abastecimento público em m ³ /s.....	104
Figura 31: Projeção da demanda de água para dessedentação animal em m ³ /s.....	105
Figura 32: Uso do solo em percentual da área Jaguari	108
Figura 33: Uso do solo em percentual da área Camanducaia.....	109
Figura 34: Uso do solo em percentual da área Pinhal	109
Figura 35: Projeção da demanda de água para irrigação em m ³ /s	111
Figura 36: Funcionamento do Sistema Cantareira	112
Figura 37: Localização dos Reservatórios Modelados no WEAP.....	117
Figura 37: Localização dos Postos Fluviométricos	120
Figura 39: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Jaguariuna-Antártica	121
Figura 40: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Foz do Jaguari ...	122
Figura 41: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Buenópolis.....	122
Figura 42: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Fazenda Barra.....	123
Figura 43: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Usina Ester	123
Figura 44: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Monte Alegre do Sul	124
Figura 45: Vazão simulada da foz do rio Jaguari em m ³ /s	127
Figura 46: Variação do consumo de água por tipo de óleo processado em percentual	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Refinarias Brasileiras.....	7
Tabela 2: Economia de água por propostas de racionalização	32
Tabela 3: Medidas de eficiência energética que reduzem o uso de vapor.....	39
Tabela 4: Tipos de petróleos definidos no CAESAR.....	55
Tabela 5: Coeficientes de utilização de água por unidade de processo.....	57
Tabela 6: Indicadores de criticidade hídrica.....	59
Tabela 7: Demanda de água por tipo de bovino	72
Tabela 8: Capacidade Total (m ³ /d) por refinaria e unidade de processamento	77
Tabela 9: Composição de cargas da simulação do CAESAR (% em base mássica).....	78
Tabela 10: Demanda de água por refinaria.....	80
Tabela 11: Criticidade hídrica das bacias onde se localizam as refinarias brasileiras ...	81
Tabela 12: Localização dos municípios em cada sub-bacia hidrográfica da UGRHI-5.	89
Tabela 13: Postos Pluviométricos inseridos nas sub-bacias Jaguari e Camanducaia.....	94
Tabela 14: Postos Pluviométricos selecionados para o estudo de caso	96
Tabela 15: Coeficientes de retorno por tipo de uso	102
Tabela 16: Demanda de água para abastecimento urbano per cápita	103
Tabela 17: Outorgas para captação e lançamento de efluentes industriais.....	106
Tabela 18: Classificação do uso do solo no software WEAP.....	107
Tabela 19: Área total por tipo de cultura	108
Tabela 20: Valores de coeficiente de cultura.....	110
Tabela 21: Evaporação média mensal	113
Tabela 22: Dados do reservatório Jaguari-Jacareí do Sistema Cantareira.....	114
Tabela 23: Ordem de Prioridade das demandas modeladas no WEAP	116
Tabela 24: Empreendimentos Hidroelétricos localizados nas bacias dos Rios Jaguari e Camanducaia	118
Tabela 25: Estações Fluviométricas utilizadas no estudo de caso.....	119
Tabela 26: Vazões de retirada, retorno e consumo das áreas simuladas	125
Tabela 27: Percentual de água consumido das vazões de referência	126
Tabela 28: Produção de Derivados por tipo de petróleo (Mm /ano)	130
Tabela 29: Consumo de água em m ³ /h por tipo de petróleo	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas
BEDA - Bovinos Equivalentes para a Demanda de Água
BHO - Bacia Hidrográfica Ottocodificada
CAESAR - Carbon and Energy Strategy Analysis for Refineries
CIIAGRO - Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas
COMPERJ - Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro
DAEE - Departamento de Águas e Energia
ETA - Estação de Tratamento de Água..
ETDI - Estação de Tratamento de Despejos Industriais
HCC – Unidade de Hidrocrackeamento
HDS – Unidade de Dessulfurização
HDS G – Unidade de Dessulfurização de Gasolina
HDT – Unidade de Hidrotratamento
HDT D – Unidade de Hidrotratamento de Diesel
HDT I – Unidade de Hidrotratamento de Instáveis
HDT N – Unidade de Hidrotratamento de Nafta
HDT Q – Unidade de Hidrotratamento de Querosene
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas
OECD - Organization for Economic Co-operation and Development
PCJ - Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí
PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos
 $Q_{7,10}$ - Menor vazão em 7 dias consecutivos para um período de retorno de 10 anos
 Q_{95} - Vazão com permanência mínima anual de 95%
 Q_m - Vazão média anual
RECAP - Refinaria de Capuava
REDUC - Refinaria de Duque de Caxias
REFAP - Refinaria Alberto Pasqualini
REGAP - Refinaria Gabriel Passos
REMAN - Refinaria Isaac Sabbá
REPAR - Refinaria Presidente Getúlio Vargas

REPLAN - Refinaria de Paulínia
REVAP - Refinaria Henrique Lage
RLAM - Refinaria Landulpho Alves
RNEST - Refinaria Abreu e Lima
RPBC - Refinaria Presidente Bernardes.
RPCC - Refinaria Potiguar Clara Camarão
SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática
UCR – Unidade de Coqueamento Retardado
UDA – Unidade de Destilação Atmosférica
UDAV – Unidades de Destilação Atmosférica e a Vácuo
UDV – Unidade de Destilação a Vácuo
UGH – Unidade de Geração de Hidrogênio
WEAP - Water Evaluation and Planning

1. Introdução

A água é um recurso natural indispensável para a sustentação da vida, a manutenção de ecossistemas saudáveis e para o desenvolvimento de diversas atividades realizadas pelo homem. Conforme a população cresce e o desenvolvimento exige o aumento das alocações de águas superficiais e subterrâneas para os setores doméstico, agrícola e industrial, a pressão sobre os recursos hídricos se intensifica, levando a tensões, conflitos entre usuários e pressão excessiva sobre o meio ambiente (TUNDISI, 2003; MEKONNEN; HOEKSTRA, 2016).

Na medida em que as regiões se tornam mais urbanizadas e desenvolvidas, a dependência pela água aumenta, sua disponibilidade se torna mais escassa e a qualidade dos mananciais é deteriorada em função do volume elevado de efluentes descartados sem tratamento adequado (ANA, 2015a). Estes fatores que levam à carência de recursos hídricos, em muitos casos, se devem a uma abordagem orientada para o desenvolvimento que não leva em conta os limites dos sistemas de água (FAO, 2007; MEKONNEN; HOEKSTRA, 2016).

Segundo FAO (2007) em 2025 é esperado que 1,8 bilhão de pessoas viverão em países ou regiões com escassez absoluta de água e dois terços da população mundial podem estar sob condições de estresse hídrico. A situação será exacerbada à medida que as áreas urbanas em rápida expansão pressionam fortemente os recursos hídricos locais.

O Brasil, apesar de ainda possuir grande disponibilidade hídrica, apresenta oferta de água desigual entre seus estados. De cerca de 260.000 m³/s de água disponível no território brasileiro, 205.000 m³/s estão localizados na bacia do rio Amazonas e os 55.000 m³/s de vazão média são distribuídos para o restante do território. Sendo assim, observa-se uma grande diversidade de situações, com abundância de água nas regiões Norte e Centro-Oeste, e relativa escassez na região Nordeste e em alguns estados desenvolvidos como Rio de Janeiro e São Paulo (HESPAHOL, 2002).

As bacias hidrográficas localizadas em grandes centros urbanos, como as regiões metropolitanas de São Paulo, Belo Horizonte, Porto Alegre, Rio de Janeiro, e Campinas, por exemplo, atualmente enfrentam baixa disponibilidade de água decorrente da demanda

excessiva e influência das condições climáticas (ANA, 2015a). Outro fato relevante é que 81,2 % da população brasileira reside em áreas urbanas, sendo que aproximadamente 40% desta população está centralizada em 22 regiões metropolitanas (IBGE, 2000). Desta forma, áreas com recursos hídricos abundantes se tornam insuficientes para satisfazer demandas excessivamente elevadas e acabam por experimentar conflitos de usos e sofrer restrições de consumo, que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida.

Apesar de o abastecimento urbano representar grande parte da utilização dos recursos hídricos, as indústrias também são responsáveis pelo consumo de uma parcela significativa de água, sobretudo aquelas relacionadas à produção de bens de consumo a partir da transformação e do processamento dos recursos naturais. A demanda consuntiva total estimada para o Brasil foi de 2.275,07 m³/s, quando considerada a vazão retirada. Deste total, o setor industrial corresponde ao terceiro maior consumidor de água o que representa 15% (ANA, 2015b).

Dependendo do processo industrial, a água pode ser tanto utilizada como matéria-prima, acrescentada ao produto final, como também um composto secundário na preparação de matérias-primas, fluido de transporte, fluido de aquecimento ou refrigeração ou ser utilizada também nos processos de limpeza de equipamentos (HESPANHOL, 2002).

A indústria de refino de petróleo é uma atividade dependente de grandes quantidades de água e no caso específico brasileiro, a presença de óleos mais pesados e ácidos no mercado associado a uma demanda crescente por combustíveis mais leves e especificados acaba por aumentar ainda mais a demanda por este recurso (BARBOSA, 2007).

A situação das refinarias brasileiras torna-se ainda mais delicada em decorrência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) que ao estabelecer especificações mais restritas nos combustíveis, engendrou um aumento na demanda por água nas refinarias em decorrência do aumento da severidade de suas unidades de processo que dependem de hidrogênio proveniente do processo auxiliar de reforma a vapor, que também utiliza consideráveis volumes de água (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012; EPE, 2015).

Além disso, a demanda brasileira por derivados de petróleo, principalmente o óleo diesel e nafta, é atualmente dependente de importações. Segundo o Plano Decenal de

Energia 2024, a demanda por combustíveis no país crescerá durante o próximo decênio, e apesar dos novos investimentos propostos pelo governo brasileiro, a atual conjuntura econômica impede a continuidade dos projetos já apresentados, assim como torna pouco provável o investimento em novas refinarias no curto prazo (PETROBRÁS, 2015).

Sendo assim, a adaptação do parque de refino atual com o objetivo de atender ao mercado de combustíveis e diminuir a dependência externa de derivados pode ser impactado pela indisponibilidade de água para suprir as demandas crescentes dos processos de tratamento já que a viabilização de novas unidades ou aumento da severidade de processos nas atuais refinarias brasileiras necessitam de um incremento da vazão de água bruta captada e isto se choca diretamente o cenário de escassez de água de qualidade nas regiões com maior importância econômica e logística do país.

Em situações de escassez de água, a política nacional dos recursos hídricos (BRASIL, 1997) determina a prioridade de captação de água para o consumo humano e dessedentação de animais. Desta forma, atividades industriais como a de refino podem ser prejudicadas caso estejam localizadas em regiões que apresentem conflitos em relação ao uso de água. Ademais, a deterioração da qualidade de água em regiões mais populosas obriga algumas indústrias a investir em tratamentos de água mais complexos que apresentam elevados custos (BARBOSA, 2007).

Logo, admite-se a hipótese de que situações de escassez de recursos hídricos em bacias hidrográficas podem limitar a produção de derivados, elevando os custos operacionais da refinaria em detrimento da implementação de tratamentos de água mais complexos e abastecimento de água, além de dificultar novos investimentos em unidades de conversão e tratamento.

Nesta lógica, o planejamento estratégico do parque de refino brasileiro deve incluir em análises de viabilidade técnica e econômica, a questão da disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas e dispor de alternativas economicamente e tecnologicamente viáveis de tratamento e reuso de água assim como outras rotas tecnológicas que acarretem na redução da demanda de água das refinarias.

Diversos estudos analisaram o consumo de água em refinarias brasileiras com a finalidade de avaliar possíveis rotas de reutilização de correntes de água e propuseram tecnologias alternativas de tratamento de água ou mudanças operacionais em processos a fim de diminuir seu consumo.

Entretanto, são poucos os trabalhos que confrontaram a situação de oferta de água de forma quantitativa, através de cenários de disponibilidade de água, com a demanda de água de refinarias. Além disso, muitos trabalhos utilizaram uma quantidade de captação de água bruta fixa, sem considerar as variações na demanda por combustíveis no futuro, que definem a campanha a ser utilizada pela refinaria, ou o tipo de óleo processado.

Sendo assim, este trabalho surge como uma abordagem complementar para lidar com o problema de escassez de água, na medida em que confronta a demanda de água no refino, calculada através de simulações da produção de combustíveis no parque de refino com a disponibilidade de recursos hídricos (oferta de água), de forma localizada e considerando os demais usos de água, que podem gerar conflitos futuros.

1.1. Objetivo

Dentro do contexto apresentado, o objetivo desta dissertação é desenvolver uma metodologia capaz de investigar em que medida situações de escassez de recursos hídricos e conflitos pelo uso de água afetam as operações de refinarias de petróleo no Brasil. Ademais, este estudo busca por alternativas operacionais e tecnológicas viáveis que possam ser utilizadas por refinarias a fim de reduzir riscos decorrentes de cortes de água imprevistos e deterioração dos corpos d'água utilizados como fonte de captação.

Para isto, tem-se como objetivos complementares os seguintes tópicos:

- Quantificação da demanda de água pelas refinarias brasileiras em função do sua campanha e tipo de óleo processado;
- Avaliação da disponibilidade hídrica das sub bacias onde estão localizadas as refinarias brasileiras;
- Criação de um estudo de caso a fim de averiguar a situação futura de uma refinaria brasileira localizada em uma área considerada crítica em relação a disponibilidade de água;
- Avaliar alternativas e rotas tecnológicas que consigam garantir o abastecimento de água de refinarias que se encontram em situações de restrição de captação de água.

1.2. Estrutura

No capítulo 2 é apresentado o histórico e característica do parque de refino brasileiro, sua capacidade de processamento de derivados, o uso de água nas unidades de processos existentes, os tipos de petróleo processados e a localização das refinarias.

O capítulo 3 é dedicado à exposição da situação atual das sub-bacias brasileiras de forma qualitativa e quantitativa. Além disso, também é apresentada a forma de gestão dos recursos hídricos dos comitês de bacia e a forma de cobrança pelo uso da água.

No capítulo 4 é descrito procedimento metodológico que se divide em duas etapas principais: a simulação do parque de refino para estimativa da demanda de água das refinarias e a construção de um balanço hídrico da área de interesse a ser estudada no estudo de caso

No capítulo 5 apresenta-se o estudo de caso proposto, as considerações utilizadas para a sua construção e os resultados obtidos.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e recomendações deste trabalho.

2. Uso de Água no Refino

2.1. Parque de Refino Brasileiro

O parque de refino brasileiro é formado por 17 refinarias que totalizam uma capacidade nominal instalada de 2,4 Mbbl/dia em 2017 (Tabela 1). Treze destas refinarias pertencem à Petrobras e correspondem a 98,2% da capacidade total, as restantes são refinarias privadas¹ (ANP, 2017) .

¹ Manguinhos (RJ), Riograndense (RS), Univen (SP) e Dax Oil (BA)

Tabela 1: Refinarias Brasileiras

Refinaria	Município (UF)	Início de operação
Refinaria de Paulínia (REPLAN)	Paulínia (SP)	1972
Refinaria Landulpho Alves (RLAM)	São Francisco do Conde (BA)	1950
Refinaria Henrique Lage (REVAP)	São José dos Campos (SP)	1980
Refinaria Duque de Caxias (REDUC)	Duque de Caxias (RJ)	1961
Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR)	Araucária (PR)	1977
Refinaria Alberto Pasqualini S.A. (REFAP)	Canoas (RS)	1968
Refinaria Presidente Bernardes (RPBC)	Cubatão (SP)	1955
Refinaria Gabriel Passos (REGAP)	Betim (MG)	1968
Refinaria de Capuava (RECAP)	Mauá (SP)	1954
Refinaria Isaac Sabbá (REMAN)	Manaus (AM)	1956
Refinaria Potiguar Clara Camarão (RPCC)	Guamaré (RN)	2000
Refinaria Abreu e Lima (RNEST)	Ipojuca (PE)	2014
Refinaria de Petróleo Riograndense S.A. (Riograndense)	Rio Grande (RS)	1937
Refinaria de Petróleos de Manguinhos S.A. (Manguinhos)	Rio de Janeiro (RJ)	1954
Univen Refinaria de Petróleo Ltda. (UNIVEN)	Itupeva (SP)	2007
Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste (LUBNOR)	Fortaleza (CE)	1966
Dax Oil Refino S.A. (Dax Oil)	Camaçari (BA)	2008

Fonte: (ANP, 2017)

Na Figura 1 a seguir estão as capacidades de processamento em Mbbl/dia das principais refinarias brasileiras assim como o volume refinado no ano de 2016, que corresponde a 80% da capacidade total do parque.

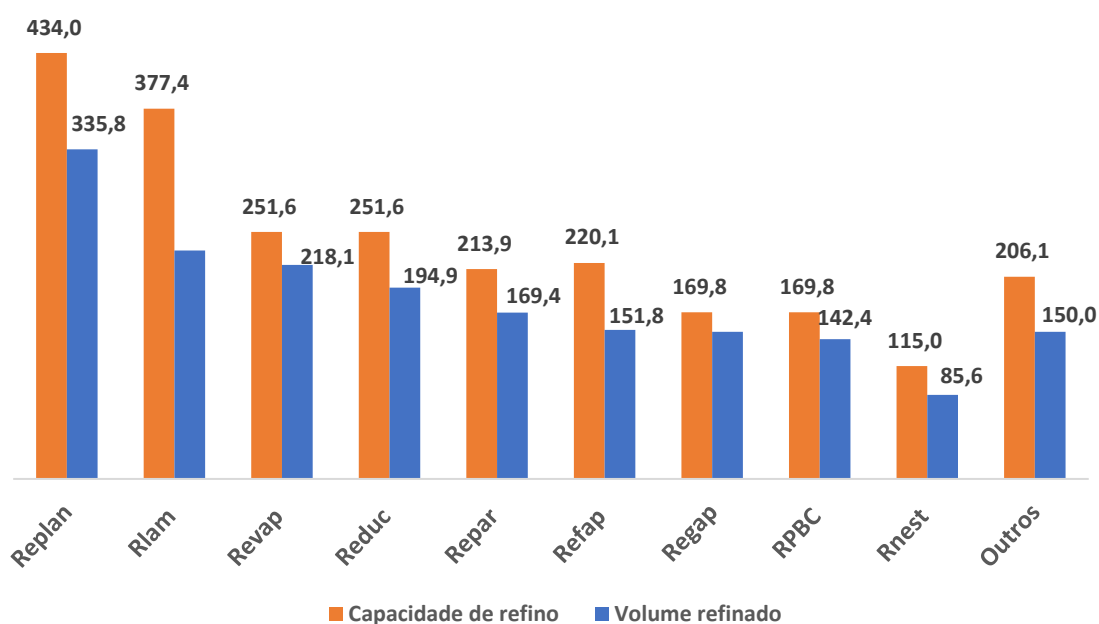


Figura 1: Capacidade Nominal das refinarias e volume de petróleo processado em Mbbl/dia no ano de 2016

Fonte: (ANP, 2017)

A maioria das refinarias brasileiras está localizada em bacias próximas a grandes centros urbanos, como Rio de Janeiro e São Paulo, que já apresentam problemas de escassez de água (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012; ANA, 2015a), conforme ilustrado no mapa a seguir. Além disso, a perspectiva de aumento da população nestas áreas agrava a disponibilidade de recursos hídricos para fins industriais (COMITESINOS, 2014; ANA, 2015b).

As refinarias brasileiras foram instaladas entre as décadas de 1960 e 1970 com objetivo principal de atender a demanda por gasolina e óleo combustível. Devido ao óleo leve utilizado como carga nesta época, as refinarias foram configuradas com unidades de FCC para atender as necessidades de conversão. Entretanto, em função do aumento da demanda por diesel assim como a descoberta de petróleos intermediários e pesados no país, foi necessário a modificação do parque de refino com o objetivo de implementar unidades de fundo de barril que são responsáveis pela conversão das frações mais pesadas de petróleo e também unidades de tratamento para atender as especificações mais restritivas dos derivados (Szklo, Uller, & Bonfá, 2012).

Desta forma, a Petrobras, através do programa PROMEGA (Programa de Produção de Médios e Gasolina), modificou seu parque de refino a fim de aumentar sua

capacidade de processamento de óleos pesados e atender a demanda de gasolina e diesel com especificações mais restritivas. A maior parcela dos investimentos foi destinada à melhoria das unidades de hidrotreatamento (PETROBRAS, 2014a; EPE, 2015).

Os investimentos propostos pela Petrobras no plano de negócios e gestão 2014-2018 (PETROBRAS, 2014b) previam a partida do segundo trem da Refinaria Abreu e Lima (RNEST) em 2015, do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ) em 2016 além das refinarias PREMIUM I e PREMIUM II para os anos de 2018 e 2019 respectivamente.

Entretanto, a Petrobras decidiu por descontinuar a construção das novas refinarias PREMIUM I e PREMIUM II e adiou por período prolongado, a conclusão do segundo trem da RNEST e o trem do COMPERJ (PETROBRAS, 2015). Esta última está dependente de uma parceria da Petrobras com eventuais investidores privados para que seja possível a retomada imediata de suas obras (EPE, 2015). O COMPERJ foi concebido inicialmente para atender o mercado de petroquímicos a partir do processamento de óleo pesado brasileiro. Porém, no ano de 2010, o projeto desta refinaria foi expandido e dividido em duas partes a fim de integrar a produção de combustíveis. O COMPERJ seria a primeira refinaria a possuir uma unidade de hidrocrackeamento catalítico com capacidade de 9500 m³/d (PETROBRAS, 2014a).

Em 2016, as refinarias produziram 110,9 milhões de m de derivados. Sendo o maior destaque para as refinarias localizadas na região Sudeste que representam 60,6% do volume total de óleo processado. Somente as refinarias de São Paulo produziram cerca de 41% de derivados (ANP, 2017).

Atualmente, como ilustrado na Figura 2 abaixo, a REPLAN é a maior refinaria brasileira, responsável por 18,3% de toda a produção nacional de derivados de petróleo, equivalente a 335,8 mil barris/dia. Esta também foi a refinaria que processou o maior percentual de petróleo nacional equivalente a 19,2% de todo o óleo brasileiro refinado em 2016. Em seguida, está a RLAM com 12,7% do total de óleo refinado e foi responsável pelo processamento do maior volume de outras cargas (resíduos de petróleo, resíduos de terminais e resíduos de derivados) (ANP, 2017).

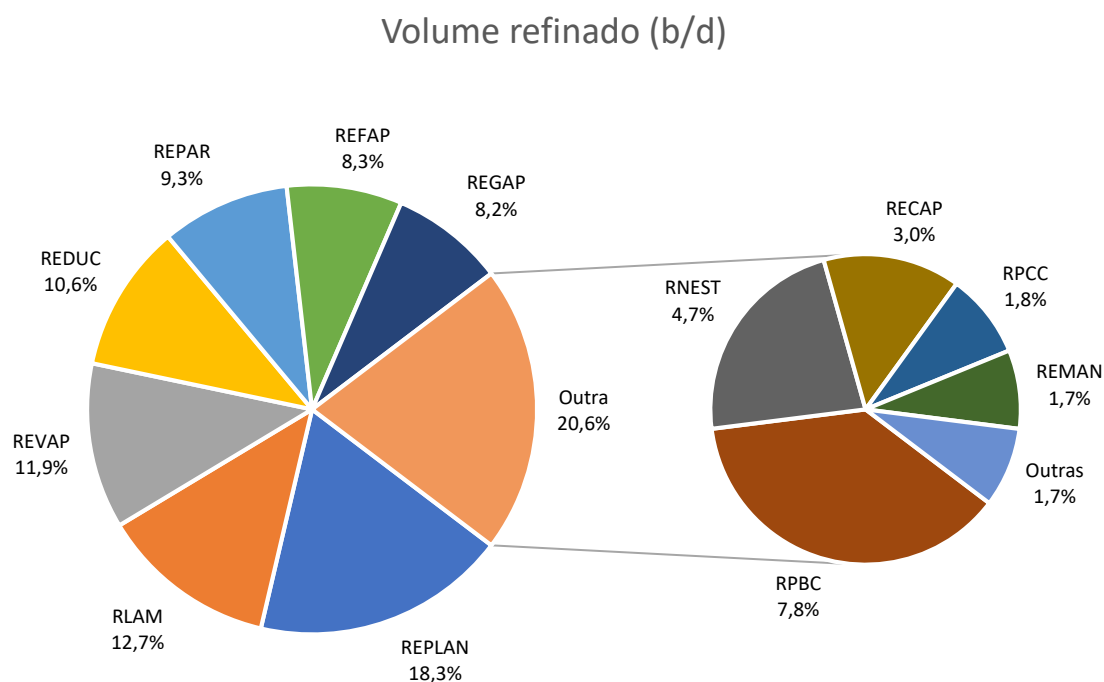


Figura 2: Participação das refinarias no processamento de petróleo em 2016.

Fonte: (ANP, 2017)

Em referência às características das correntes refinadas, no ano de 2016 o petróleo nacional² representou 87,4% do total do volume processado pelas refinarias (ANP, 2017).

Das cargas importadas, o petróleo de origem africana representou 54% do total de importados no último ano. Deste percentual, 34,2% é oriundo da Nigéria e 16,6% da Argélia. Em seguida, está o petróleo importado do Oriente Médio, que corresponde a 40,3% do total, 35,3% é proveniente da Arábia Saudita e 4,7% do Iraque (ANP, 2017).

Em relação aos derivados energéticos, o óleo diesel foi o combustível mais produzido no Brasil, equivalente a 47% da produção total de derivados, enquanto a gasolina A teve participação de 27% de acordo com a Figura 3 abaixo.

² Em 2016, foram produzidas no Brasil 65 correntes de petróleo com densidade média de 25,8 graus API e teor de enxofre de 0,50% em peso (ANP, 2017).

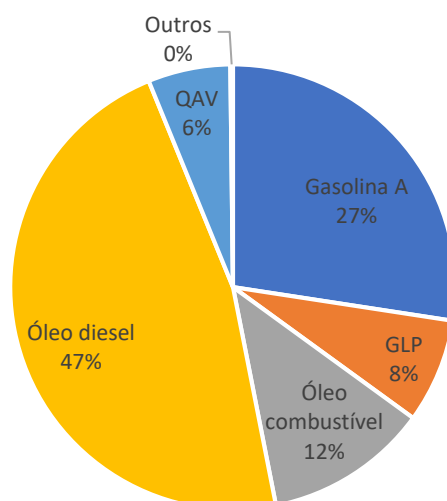


Figura 3: Percentual de produção de derivados energéticos em 2016.

Fonte: (ANP, 2017)

De acordo com a EPE (2016), até o ano de 2026, o óleo diesel mineral, atualmente a principal fonte utilizada para transporte de cargas pesadas no país, ganhará ainda mais importância entre os combustíveis derivados de petróleo, com um crescimento médio anual de 1,6% mesmo com a estimativa de aumento da participação do biodiesel no óleo diesel comercializado. Por outro lado, a gasolina apresenta redução de importância entre os derivados de petróleo em decorrência do uso do etanol em veículos leves (MME/EPE, 2017).

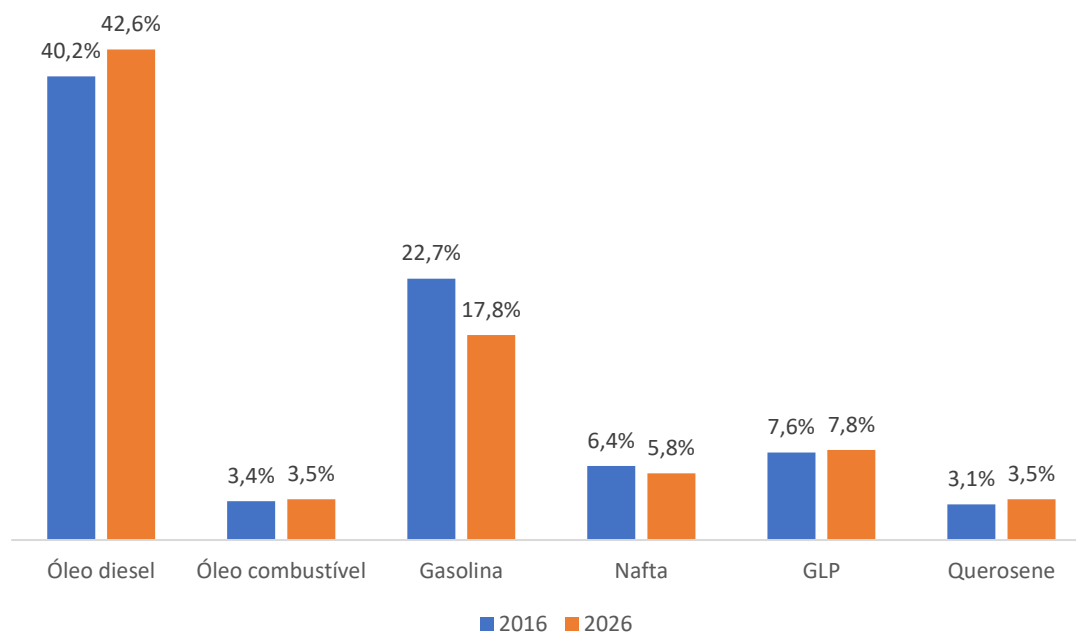


Figura 4: Consumo em percentual dos principais derivados de petróleo

Fonte: (MME/EPE, 2017)

2.2. Descrição das principais Unidades de Refino

O petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos e impurezas como o enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais, cujas quantidades variam em função do seu reservatório de origem (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012).

Para que seja possível sua utilização tanto para uso energético quanto não energético, é necessário que haja a separação do óleo bruto em frações específicas realizada em processos de separação, conversão, tratamento, além de processos auxiliares.

As características da carga processada têm grande influência sobre a escolha das unidades de processo que serão implementadas para o seu refino assim como seus rendimentos, a qualidade das frações obtidas e a campanha desejada. Esta última depende principalmente da demanda de derivados nos locais de abastecimento.

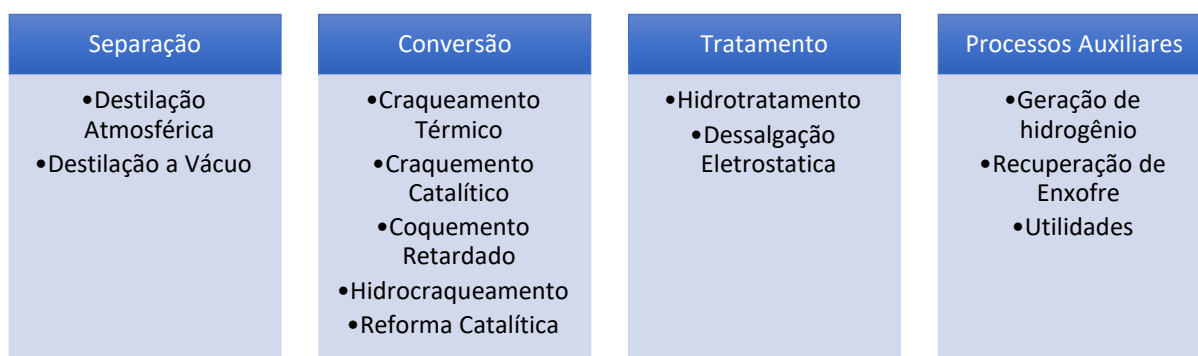


Figura 5: Etapas do processo de refino

Fonte: Elaboração Própria

A Figura 5 acima ilustra as principais unidades de processo utilizadas em refinarias. Sendo as mais comuns no Brasil, as unidades de dessalgação, destilação atmosférica e a vácuo, craqueamento catalítico, hidrotratamento e coqueamento, que serão descritas a seguir.

2.2.1. Unidade de Dessalgação

Antes do óleo cru ser fracionado é necessário um primeiro tratamento a fim de remover compostos inorgânicos tais como sais corrosivos, metais, areia e sólidos em suspensão além de reduzir seu teor de umidade. Este tratamento ocorre na unidade de dessalgação que envolve a mistura do óleo pré-aquecido com água para que ocorra a dissolução dos sais na água (GARY; HANDWERK, 2001).

Em seguida a água é removida através do uso de desemulsificantes ou através de um processo de eletrólise, que consiste na aplicação de um campo elétrico provocado por placas paralelas presentes dentro dos vasos de dessalgação. O óleo é submetido a uma alta diferença de potencial que promove a aglutinação das gotículas de água, facilitando a sua decantação segundo (GARY; HANDWERK, 2001).

A água decantada forma uma salmoura emulsionada com hidrocarbonetos e outros contaminantes do petróleo, principalmente ácido sulfúrico, amônia, fenol, sólidos em suspensão e sólidos com alta demanda bioquímica de oxigênio, que são encaminhados para tratamento na estação de tratamento de despejos industriais (ETDI) (NOGUEIRA, 2007; SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012).

Estima-se a relação entre 3% a 10% de água utilizada em relação ao volume do óleo cru ou aproximadamente 7,95 litros de água por barril processado (HWANG; MOORE, 2011; SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012).

2.2.2. Unidades de Destilação Atmosférica e Destilação à Vácuo (UDA/UDV)

A destilação atmosférica é a etapa inicial do refino após a dessalgação e pré-aquecimento e se baseia em um processo físico com o objetivo de separar os óleos brutos por destilação em frações de acordo com diferentes pontos de ebulição, de modo que cada uma das unidades de processamento a seguir terão matérias-primas que atendam às suas especificações (GARY; HANDWERK, 2001; MEYERS, 2004).

Neste processo utiliza-se uma torre de destilação vertical à pressão atmosférica, utilizada para vaporizar a carga e fracioná-la em diferentes cortes através de diversos estágios com diferentes temperaturas de condensação. Estas torres possuem diversas bandejas com temperaturas específicas, desta forma, os hidrocarbonetos cujos pontos de ebulição sejam maiores ou iguais à temperatura da bandeja ficaram retidos enquanto o restante do vapor segue em direção a próxima bandeja, de temperatura mais elevada (GARY; HANDWERK, 2001; MEYERS, 2004).

As frações mais leves se condensam e são coletadas no topo da coluna de destilação e são condensadas em trocadores externos enquanto as frações mais pesadas são coletadas no fundo.

Segundo Szklo (2012), ocorrem pelo menos quatro retiradas de carga laterais na torre em função das frações de corte que são direcionadas para uma torre de retificação em que é injetado vapor capaz de separar componentes mais leves dos mais pesados. Esta carga em seguida é inserida novamente na torre de destilação logo acima da bandeja onde ocorreu a retirada da carga. O vapor injetado entra em contato com os hidrocarbonetos originando água ácida que se destina a unidades de retificação (AMORIM, 2005).

O resíduo gerado no fundo da torre de destilação atmosférica se deve as frações mais pesadas da carga que não são separadas neste processo devido a necessidade de temperaturas mais altas para vaporizá-las, o que atingiria o limiar de decomposição térmica do petróleo. Desta forma, o resíduo da destilação atmosférica pode ser enviado à coluna de destilação à vácuo capaz de separar este resíduo gerado pelo mesmo princípio

que a destilação atmosférica porém, devido a redução da pressão, a temperatura de ebulição necessária também se reduz, permitindo o fracionamento destas moléculas mais pesadas (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012).

Nestas unidades a água é utilizada como vapor que é injetado nas torres de destilação e na injeção de água em vasos destinados ao tratamento bender³. Além disso, existem unidades auxiliares de trocadores de calor em que utiliza-se a água do sistema de condensado da própria unidade para reposição (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012).

Estas unidades representam a principal fonte de efluente líquido em uma refinaria, o que representa cerca de 100 litros de efluente por barril. Por ter contato com a carga processada, o efluente se torna normalmente ácido com a presença de contaminantes como ácido sulfúrico, amônia, mercaptanas e fenóis (NOGUEIRA, 2007).

2.2.3. Unidade de Craqueamento Catalítico (FCC)

O craqueamento catalítico é um processo de desintegração molecular a partir de carga residual composta por gasóleos leves ou pesados provenientes das torres de destilação atmosférica ou vácuo. A carga de entrada é submetida a altas temperaturas e pressões em presença de um catalisador, e assim se decompõe em várias frações mais leves, produzindo gás combustível, gasolina, óleo leve de reciclo e óleo combustível (GARY; HANDWERK, 2001; MEYERS, 2004).

O FCC também utiliza água em forma de vapor e também água ácida retificada para a remoção de contaminantes durante a lavagem de gases de topo da fracionadora. O volume de água residual gerada é cerca de 50 litros por barril processado e apresenta em sua composição óleo, sólidos em suspensão, fenóis, sulfatos e amônia. O efluente gerado é a água ácida a qual se destina às unidades retificadoras (NOGUEIRA, 2007).

³ Processo com o objetivo de melhorar a qualidade do querosene de aviação transformando compostos mercaptanas em dissulfetos, que são compostos menos agressivos.

2.2.4. Unidades de Hidrotratamento (HDT)

O hidrotratamento (HDT) tem como finalidade remover impurezas tais como compostos de enxofre ou nitrogênio, bem como promover a hidrogenação de compostos insaturados, garantindo assim a estabilidade da carga tratada. Desta forma, os derivados são especificados ou correntes intermediárias são preparadas para outros processos de refino como Craqueamento Catalítico (FCC) ou Hidrocraqueamento Catalítico (HCC) (Gary & Handwerk, 2001).

Os principais contaminantes do óleo diesel são compostos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e organometálicos, sendo as reações de remoção destes compostos realizada por meio de reações catalíticas de hidrogenação com características específicas denominadas de hidrodessulfurização (HDS), hidrodesnitrogenação (HDN), hidrodesaromatização (HDA), saturação de oleofinas e hidrodesoxigenação (HDO) (Szklo et al., 2012).

As reações de hidrotratamento se diferenciam em função de um conjunto de variáveis operacionais que definem a severidade de uma unidade de hidrotratamento. As principais são a temperatura, a pressão parcial do hidrogênio e velocidade espacial (LHSV – Liquid Hourly Space Velocity) (STANISLAUS; MARAFI; RANA, 2010; SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012).

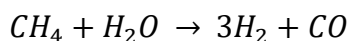
A severidade do hidrotratamento irá determinar a especificação do produto final assim como o volume de água utilizado, quanto maior a severidade, maior o consumo de hidrogênio e conseqüentemente, de água. O HDT brando é geralmente empregado para remoção de enxofre e oleofinas enquanto o HDT severo remove concentrações maiores de enxofre, anéis aromáticos e nitrogênio (STANISLAUS; MARAFI; RANA, 2010; SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012).

O consumo mais importante se deve a utilização de vapor d'água injetado nas torres de retificação⁴ de diesel, para a remoção de H₂S e outros hidrocarbonetos, e em ejetores, para a geração de vácuo⁵, respectivamente.

2.2.5. Unidade de Geração de Hidrogênio (UGH)

O hidrogênio pode ser produzido pela reforma a vapor do gás natural ou frações leves de petróleo como a nafta leve ou pela oxidação parcial de frações mais pesadas. Nas refinarias brasileiras, o processo utilizado para a produção de hidrogênio é a reforma a vapor. O gás natural é o reagente mais comum utilizado na unidade de geração de hidrogênio, uma vez que preenche todos os requisitos para a alimentação do reformador e apresenta baixo custo (GARY; HANDWERK, 2001).

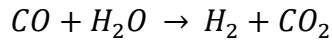
No processo de reforma a vapor ocorre uma mistura de vapor d'água e hidrocarbonetos que reagem a altas temperaturas na presença de um catalisador, formando uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio, conhecida como gás de síntese, conforme reação abaixo (MEYERS, 2004):



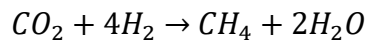
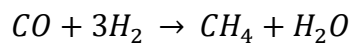
Em seguida, ocorre a reação de síntese (*water-gas shift*) na qual o monóxido de carbono reage com vapor d'água. Devido a característica exotérmica desta reação são utilizados dois reatores, o primeiro opera a alta temperatura (250°C) para que a reação seja direcionada para a formação dos produtos e o segundo reator opera com temperatura mais baixa (40°C) para favorecer o equilíbrio da reação (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012):

⁴ As torres de retificação de Diesel utilizam vapor d'água para eliminar do óleo já hidrogenado, os hidrocarbonetos leves, H₂ e H₂S, Este processo é necessário porque esses compostos abaixam o ponto de fulgor do óleo e conferem corrosividade ao produto (LAZZARINI CONSULTORIA AMBIENTAL, 2005).

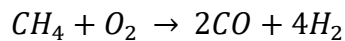
⁵ Importante na etapa de secagem do Diesel, que tem como objetivo de reduzir a umidade do óleo diesel para evitar problemas de turbidez e de ponto de entupimento (LAZZARINI CONSULTORIA AMBIENTAL, 2005).



O hidrogênio produzido após etapa de separação do dióxido de carbono ainda contém impurezas e portanto, necessita-se de uma etapa de purificação em que este contaminante é separado do gás hidrogênio através de absorção química ou por *pressure swing adsorption*. Nesta etapa ocorre a reação inversa da reforma a vapor através do processo de metanação (MEYERS, 2004):



Além da reforma a vapor, outro processo empregado para a produção de hidrogênio é a oxidação parcial (gasificação), que pode também ser complementar ao processo de reforma. Neste caso um fluxo rico em hidrogênio, como o gás natural, carvão, coque de petróleo, ou biomassa, é utilizado para a produção de gás de síntese. O processo é similar ao processo de reforma, no entanto utiliza oxigênio no lugar do vapor (MEYERS, 2004):



Nota-se que o processo de oxidação parcial produz menos hidrogênio a partir da mesma quantidade de matéria-prima, quando comparada com a reação do processo de reforma de vapor.

O vapor utilizado para a produção do hidrogênio é um volume considerado perdido. Já o vapor utilizado na torre retificadora de condensado é enviado para a unidade de retificação de águas ácidas enquanto o condensado tratado é utilizado como água de alimentação de caldeira (GONDIM, 2014).

2.2.6. Unidade de Coqueamento Retardado

A unidade de Coqueamento Retardado é um processo de craqueamento térmico que tem como objetivo decompor o resíduo da destilação a vácuo em hidrocarbonetos mais leves. Nesta unidade a carga é aquecida em elevadas temperaturas e em seguida destinada a tambores de coque onde permanece por um período longo (MEYERS, 2004).

A água é usada neste processo para resfriamento e descoqueamento em um circuito fechado, apesar de ser reaproveitada, ocorrem perdas por evaporação necessitando-se de reposição que é feita com água industrial filtrada. Além disso, também utiliza-se água ácida para a lavagem de gás de topo da fracionadora (GONDIM, 2014).

2.2.7. Unidades de Processamento de água

2.2.7.1. Estação de Tratamento de água (ETA)

Durante o refino de petróleo a água utilizada requer diferentes padrões de qualidade que variam em função de cada processo. Para que seja possível alcançar estes padrões diversos, as refinarias possuem uma estação de tratamento de água que consiste basicamente em três processos: clarificação, filtração e desmineralização (VENKATESH; COX, 2011).

A água bruta captada sofre um tratamento primário a fim de se evitar a formação de algas nos tanques de tratamento e ajuste de acidez.

O processo de clarificação tem como objetivo retirar os sólidos em suspensão da água a fim de reduzir a turbidez, cor e sua carga orgânica que ocorre através da coagulação e floculação. Parte da água clarificada é destinada ao sistema de filtração e parte dela é enviada ao tanque de armazenagem onde tem seu pH corrigido para a faixa de 7,0 a 8,0 e posteriormente enviada para os consumidores. Na filtração também ocorre a remoção de sólidos em suspensão. A água filtrada produzida é enviada para abastecer a seção de troca iônica, fornecimento de água aos processos de refino, produção de água potável e como água de reposição dos sistemas de resfriamento (VANELLI, 2004; NOGUEIRA, 2007; VENKATESH; COX, 2011).

O processo de desmineralização tem como objetivo remover sais dissolvidos responsáveis por incrustações e corrosões em tubulações e redução da eficiência operacional das unidades de processo. Os tratamentos comumente utilizados são a osmose reversa e a troca iônica. A água desmineralizada produzida é armazenada em tanque e deste é enviada para a unidade de geração de vapor (VANELLI, 2004).

2.2.7.2. Unidade retificadora de águas ácidas

Esta unidade tem como objetivo tratar a água ácida de forma a reduzir a concentração dos contaminantes H_2S , NH_3 e CO_2 presentes na água e permitir o reuso da água retificada em unidade de processamento antes de seu descarte final na ETDI (KNUST, 2013).

As águas ácidas podem ser classificadas como fenólicas e não-fenólicas. As primeiras são decorrentes da maioria das unidades de tratamento e conversão das refinarias e sua reutilização deve ser bem avaliada porque estas águas podem conter outros contaminantes como fenóis, HCN, cloretos, cianetos, mercaptanas e hidrocarbonetos que restringem seu uso em uma série de processos. Este efluente é comumente utilizado na unidade de dessalgação das correntes de petróleo porque o contato com hidrocarbonetos permite que estes contaminantes fenólicos migrem para a corrente presente na dessalgadora de forma a reduzir o teor de fenóis que seriam destinados a ETDI, que apresenta limitação para estes tipos de compostos (KNUST, 2013).

As águas ácidas classificadas como não fenólicas são originadas principalmente nas unidades de processo de hidrotratamento e seus contaminantes são basicamente H_2S , NH_3 e CO_2 e portanto podem ser reutilizadas para lavagem de gases em unidades de coqueamento retardado, craqueamento catalítico ou na unidade de dessalgação (KNUST, 2013).

Para que a água ácida seja retificada é comum utilizar vapor d'água como um solvente gasoso capaz de arrastar o H_2S e NH_3 em função do aumento da temperatura e diminuição da pressão parcial dos contaminantes.

2.2.7.3. Estação de tratamento de despejos industriais (ETDI)

A ETDI é responsável por tratar os efluentes líquidos da refinaria até que estes atendam os parâmetros exigidos pela legislação ambiental.

É comum que haja a separação de três tipos distintos de efluentes destinados a ETDI que é feita em função dos contaminantes existentes em cada efluente. O efluente oleoso, que é oriundo das unidades de processo, é enviado diretamente para separadores de água e óleo (VENKATESH; COX, 2011).

Já o efluente caracterizado como contaminado, que é proveniente de drenagens de diques, fundos de tanques e chuvas sobre áreas contaminadas com óleo, necessita passar por gradeamento, para remoção de materiais flutuantes e por um desarenador, para remoção de sólidos em suspensão para que possa ser, em seguida, direcionado ao separador de água e óleo (LAZZARINI CONSULTORIA AMBIENTAL, 2005).

O terceiro efluente é proveniente da salmoura e antes de ser destinado à ETDI, necessita passar por tanques pulmão para que haja a equalização da vazão e também uma separação de água e óleo (VENKATESH; COX, 2011).

As etapas típicas de tratamento de efluentes na ETDI consistem em um tratamento de gradeamento preliminar, uma separação primária e secundária de água e óleo, seguida de tratamento biológico e por fim um tratamento terciário. Este último depende do tipo de efluente gerado, que varia principalmente em função do tipo de petróleo utilizado no refino, e a qualidade necessária para reuso ou descarte (LAZZARINI CONSULTORIA AMBIENTAL, 2005; VENKATESH; COX, 2011).

Normalmente o efluente necessita de duas etapas de remoção de óleo antes de ser encaminhado para o sistema de tratamento biológico. Esta remoção de óleo é alcançada geralmente utilizando um separador do tipo API⁶ e um flotador de ar dissolvido (VENKATESH; COX, 2011).

Em seguida, as águas residuais são encaminhadas para bacias de aeração com lodo ativado para a remoção da carga orgânica e por fim o efluente é então enviado para

⁶ Um separador de óleo API é equipamento projetado para separar grandes quantidades de óleo suspenso e sólidos suspensos em efluentes. O nome deriva do fato de que esses separadores foram projetados de acordo com os padrões publicados pelo American Petroleum Institute (API).

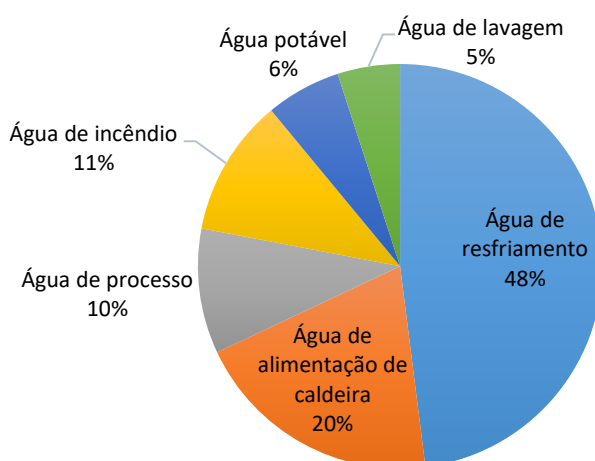
tratamento terciário, quando existente (LAZZARINI CONSULTORIA AMBIENTAL, 2005; VENKATESH; COX, 2011).

2.3. Utilização de água no refino

As refinarias de petróleo dispõem de um complexo sistema de captação, tratamento, armazenamento, e transporte de água e de efluentes. A água é necessária para limpeza, higienização, produção de vácuo, solubilização de sais, preparo de produtos químicos, sistema de incêndio além de outros serviços, entretanto dentre os principais sistemas consumidores de água em uma refinaria de petróleo destaca-se a utilização de água necessária para resfriamento e para a geração de vapor.

O volume de água bruta captado pelas refinarias varia muito em função da configuração adotada para o refino. As tecnologias utilizadas em estações de tratamento de água e nas unidades de processo além do grau de reuso de água e sua qualidade, também influenciam consideravelmente no montante de água bruta necessária (AMORIM, 2005).

Entretanto, a necessidade hídrica (retirada, reposição e consumo de água⁷) na indústria do refino depende principalmente do sistema de resfriamento utilizado, já que grande parte da água captada é utilizada nestes sistemas, conforme ilustrado na Figura 6



⁷ Retirada (*withdrawal*) representa toda água captada; Reposição (*make-up*) representa toda água que não retorna à fonte como efluente; Consumo (*consumption*) representa a água perdida seja por evaporação ou outros tipos de perda que não sejam considerados como efluente.

Figura 6: Percentual de uso de água em refinaria

Fonte: Amorim apud Schor (2006)

A água utilizada por uma refinaria pode ser proveniente de captação superficial, captação subterrânea ou ser fornecida por uma empresa de abastecimento de água. Em refinarias de grande porte, a água captada é geralmente tratada dentro da própria planta em uma estação de tratamento de água.

A água captada requer tratamentos físico-químicos prévios para que possa ser usada como água de processo ou como água de reposição das torres de resfriamento. Sendo que os tipos de tratamento desta água dependem da qualidade da água bruta captada assim como da qualidade necessária para cada tipo de água consumida dentro da refinaria.

A seguir serão descritos os tipos de água utilizadas nas refinarias:

2.3.1. Água de resfriamento

Muitos equipamentos e fluidos necessitam de resfriamento durante o processo de refino devido à grande quantidade de calor residual gerado. Para este fim, as refinarias possuem torres de resfriamento que geralmente trabalham com a água como fluido refrigerante, o que contribui significativamente para o aumento do consumo de água, como visto na Figura 6.

De modo geral, existem três tipos básicos de sistemas de resfriamento:

I. Sistema Aberto

É um sistema sem recirculação de água ou de passagem única (*once through*) em que se necessita de uma grande quantidade de água bombeada diretamente de uma determinada fonte.

A água captada passa através dos trocadores de calor para refrigerá-los e em seguida é novamente lançada em sua fonte de origem ou reutilizada para um outro fim dentro da refinaria. O custo de instalação deste sistema é baixo, porém o custo de operação é alto devido a utilização de água bruta que dependendo de sua qualidade pode submeter os equipamentos a processos corrosivos, incrustações e entupimentos.

A vantagem deste tipo de Sistema se deve à invariabilidade da concentração de sais presentes na água, já que esta é descartada após absorver calor. Porém, ocorre a poluição térmica resultante da descarga de grandes volumes de água quente em corpos d'água.

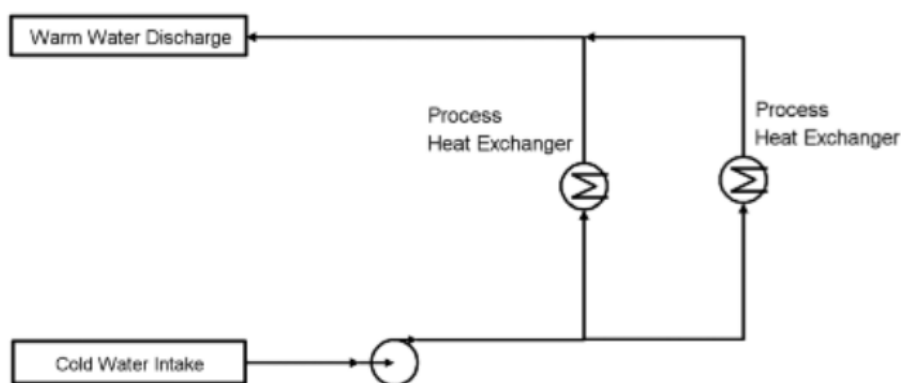


Figura 7: Sistema de resfriamento aberto

Fonte: (IPIECA, 2010)

II. Sistema Semi-aberto

Este é o sistema mais comum utilizado nas refinarias brasileiras no qual ocorre a recirculação da água captada. Esta passa por um equipamento de troca térmica e em seguida é enviada para a torre de resfriamento, onde uma porção da água é evaporada para o ar. À medida que a água se torna vapor, o ar absorve o calor, o que diminui a temperatura da água restante e por fim, esta retorna para as unidades operacionais a uma temperatura menor (IPIECA, 2010).

Nestes sistemas parte da água é perdida em decorrência da evaporação, esta perda tem como consequência a saturação de sais corrosivos assim como possível crescimento de microrganismos.

O efeito de aumento da concentração de sais e microrganismos pode ser evitado pela remoção de parte da água, através de um procedimento de descarte conhecido como purga do sistema (*blowdown*). A quantidade de purga necessária depende da qualidade da água de reposição e do número de ciclos de concentração em que a torre de refrigeração é operada. A água de purga que é descartada e o volume perdido por evaporação, arraste

e respingo são substituídos por um volume igual denominado água de reposição (*make-up water*) (IPIECA, 2010).

Os ciclos de concentração são utilizados para indicar o grau de impurezas da água de circulação em relação ao grau de impurezas na água de reposição o que permite avaliar a qualidade da água assim como o número de vezes em que ela pode circular dentro do sistema.

Estes ciclos são calculados em função da concentração de um dado elemento químico presente na água de circulação e a concentração deste mesmo elemento presente na água de reposição. Sendo assim, um ciclo de concentração de quatro indica que a água em circulação tem a concentração de impurezas quatro vezes maior do que a concentração da água de reposição.

Por fim, a purga é encaminhada para a ETDIs e representa a maior porção de efluente gerado por uma refinaria. Seu reuso implica na necessidade de adequação de sua qualidade às exigências da unidade de processo a qual será destinada (IPIECA, 2010).

Uma possibilidade para reduzir o volume de água de reposição é o aumento do ciclo de concentração das torres, o que resulta em economia de água, redução da purga e conseqüentemente na redução nos custos para seu tratamento.

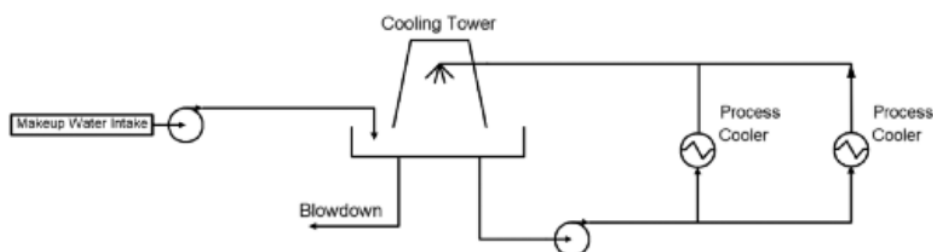


Figura 8: Sistema de resfriamento semi-aberto

Fonte: (IPIECA, 2010)

Uma vantagem deste tipo de sistema é que o consumo de água é de aproximadamente 5% em relação ao consumo de um sistema de uma única passagem e a quantidade de água aquecida e descartada em um sistema semi-aberto também é menor.

III. Sistema Fechado

Neste sistema a água aquecida é reutilizada após ser resfriada em sistemas não evaporativos, visto que seu resfriamento é feito por radiadores ou em trocadores de calor. Como não há evaporação, o ciclo de concentração se mantém praticamente constante, entretanto, existe uma pequena reposição de água, devido a eventuais vazamentos. Apesar de esses sistemas não necessitarem de grandes volumes de água de reposição, as principais desvantagens se devem à possibilidade de corrosão, e em alguns casos específicos, também há erosão ou cavitação e o alto custo operacional. Além disso, a área dos trocadores de calor é maior e, portanto, em casos de *revamp* nas refinarias, é necessário que o *layout* da planta comporte este tipo de equipamento. (IPIECA, 2010; EERE, 2011).

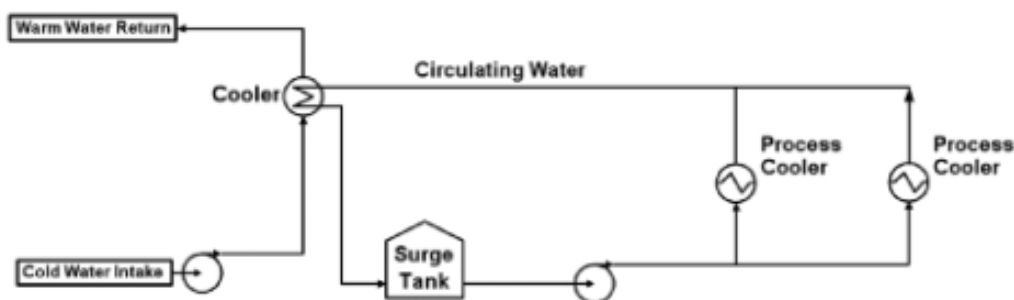


Figura 9: Sistema de Resfriamento fechado

Fonte: (IPIECA, 2010)

Recentemente, a reutilização de água tornou-se popular e muitos sistemas de resfriamento já utilizam efluentes recuperados ou água de descarga de outros processos. Apesar de a reutilização de água ser uma opção para reduzir o consumo de água fresca, deve-se levar em consideração a qualidade da água de reuso e como isso afetará o funcionamento eficiente do sistema de resfriamento e sua capacidade em atender aos requisitos de resfriamento (IPIECA, 2010; EERE, 2011).

Dependendo da localização, as fontes de água superficial terão variações sazonais e podem transportar altos níveis de lixo suspenso e detritos que causam incrustações se não forem removidas por sistemas de pré-filtração, o que aumenta os custos deste tipo de sistema. Já as fontes de água subterrânea não têm as variações sazonais como as fontes

superficiais de água, porém, dependendo da geologia da região, elas podem ter altos níveis de minerais dissolvidos que também contribuem para a formação de incrustações ou corrosões (IPIECA, 2010; EERE, 2011).

Devido ao baixo impacto ambiental e na tentativa de reduzir o consumo de água fresca, as refinarias no Brasil têm utilizado os sistemas semiabertos em seus processos e os sistemas fechados em máquinas (GONDIM, 2014).

2.3.2. Água de alimentação em caldeira

Nas refinarias, o vapor de água é utilizado na maioria das unidades de processos, com pressões específicas, para fins de aquecimento, injeção ou como matéria prima. O vapor de alta pressão é gerado nas caldeiras, enquanto os demais são oriundos de despressurização em turbinas e válvulas de pressão.

O vapor de retificação ou utilizado em ejetores é incorporado aos produtos gerados no processo e posteriormente separado, gerando um efluente contaminado devido ao contato com o óleo. Nestes casos, o condensado gerado é tratado como água ácida e por este motivo não pode retornar ao processo sem tratamento específico (IPIECA, 2010; VENKATESH; COX, 2011).

Além disso, a geração de vapor em caldeiras para o processo de refino requer a alimentação de água desmineralizada, praticamente isenta de íons, que poderiam causar incrustação ou corrosões nas caldeiras.

Apesar de ser possível recuperar parte do condensado dos processos, a recirculação desta água também provoca a concentração de contaminantes e sais que podem afetar o desempenho das caldeiras. Por este motivo, torna-se necessária uma purga feita periodicamente no sistema de geração de vapor. O efluente gerado é direcionado para a ETDI (IPIECA, 2010; VENKATESH; COX, 2011).

O vapor também é utilizado para aquecimento de trocadores de calor ou como força motriz no acionamento de bombas, compressores, agitadores ou sopradores. Porém, nestes casos é possível retornar como condensado para o processo, após um processo de purificação (GONDIM, 2014).

2.3.3. Água de Processo

Denomina-se água de processo, qualquer corrente de água que tenha entrado em contato direto com hidrocarbonetos durante algum processo industrial. Este tipo de água tem como finalidade a lavagem dos vasos em permutadores de calor e no topo das torres de destilação com o objetivo de prevenir a formação ou depósito de sais e outros contaminantes, preparação e diluição de produtos químicos que serão utilizados no processo produtivo, dissolução de sais durante o processo de dessalgação além de lavagem e transporte de hidrocarbonetos em instrumentos e equipamentos em geral (AMORIM, 2005; VENKATESH; COX, 2011).

Sua reutilização depende diretamente dos tipos de contaminantes e suas devidas concentrações presentes no efluente gerado.

2.3.4. Água para o combate a incêndios

O sistema de combate a incêndios é abastecido pela água bruta captada sem que haja qualquer tipo de tratamento. Este sistema é um circuito fechado pressurizado com água composto por tubulações e hidrantes que em condições normais de funcionamento das refinarias, não consome a água utilizada. Porém, em algumas refinarias a água presente neste sistema acaba sendo utilizada para outros fins como para a realização de testes e lavagens (AMORIM, 2005).

2.3.5. Água potável

A água potável é utilizada para suprir o consumo humano da refinaria e é proveniente da estação de tratamento de água após processo de filtração e cloração. O efluente gerado em decorrência da utilização da água é o sanitário e se destina a ETDI (VENKATESH; COX, 2011).

O consumo de água potável em uma refinaria é de aproximadamente 6% da demanda total de água (HWANG; MOORE, 2011)

2.3.6. Água de lavagem

A água de lavagem, ou água de serviço, é uma água filtrada produzida na estação de tratamento de água, que deve estar livre de sedimentos, porém não requer nenhum outro tipo de tratamento. Ela é utilizada em testes hidrostáticos, serviços de manutenção, resfriamento externos em permutadores, lavagem de pisos e equipamentos, deslocamentos e diluição de líquidos contaminados.

2.4. Estudos sobre o uso de água no setor de refino nacional

Collares (2004) avaliou alternativas de tratamento de água convencionais e com membranas com o intuito de diminuir a captação da água e o lançamento de efluentes em refinarias. Para isto, o autor elaborou um estudo de caso da refinaria de Duque de Caxias (REDUC), o qual avaliou cinco opções tecnológicas. São elas: reuso de água das correntes internas, reciclo com regeneração⁸, utilização de água salgada proveniente da baía de Guanabara, água salobra do rio Iguaçu e esgoto sanitário municipal. Por fim, o autor faz uma análise de custo de tais propostas. O resultado deste estudo indicou que o reuso interno de água na refinaria é a opção mais atrativa economicamente, principalmente se realizado em conjunto com metodologias de integração de processos como *Water Pinch*⁹, as quais não fizeram parte do escopo do trabalho. Entretanto, o autor conclui que as tecnologias propostas apresentam retorno econômico apenas em longo prazo. O estudo também aponta o mecanismo de cobrança pela água como uma alternativa de tornar atrativo os investimentos em minimização do consumo de recursos hídricos.

Assim como Collares (2004), Schor (2006) também apresentou um estudo de caso sobre a REDUC em que estudou fontes alternativas e complementares para o abastecimento de água. Pelo lado da demanda de água, foram analisadas alternativas de racionalização do uso da água, reciclagem de efluentes industriais, reuso de esgoto doméstico das comunidades vizinhas, dessalinização da água da Baía de Guanabara,

⁸ Após intervenção para remoção do contaminante, o efluente retorna para o mesmo processo que o originou (COLLARES, 2004)

⁹ A tecnologia *Water Pinch* é uma técnica utilizada para reduzir o consumo de água em que se identifica o mínimo consumo de água limpa e a geração de efluentes. É seguido do desenvolvimento de formas de distribuição do efluente gerado a partir de técnicas de reuso e regeneração que atenda aos fluxos mínimos identificados (POMBO, 2011).

captação e uso de água subterrânea. Já pelo lado da oferta de água, foi feita uma análise de caráter qualitativo sobre a Regularização da Vazão e a Manutenção da Qualidade da Água do Rio Saracuruna, que é fonte do abastecimento da REDUC (SCHOR, 2006).

Vanelli (2004) avaliou possíveis rotas de reutilização de correntes na refinaria Henrique Lage (REVAP) assim como sua viabilidade econômica com objetivo de racionalizar o consumo de água e reduzir a geração de efluentes em refinarias de petróleo. Para isto o autor realizou um balanço hídrico da REVAP e considerou as seguintes alternativas para redução do consumo de água: avaliação da eficiência do sistema de retorno de condensado, redução de evaporação das torres de resfriamento, otimização dos ciclos de concentração, tratamento de água de purga através da osmose reversa, regeneração evaporativa de purgas das torres, reutilização de água retificada, a segregação e aproveitamento da água da chuva, reutilização direta da Estação de Tratamento de Despejos Industriais (ETDI).

Como resultado, o autor considerou a renovação do sistema de retorno do condensado que apresentou problemas de perda de pressão devido à sobrecarga. Foi proposta a alteração do diâmetro de diversas tubulações e instalação de vasos separadores novos. Desta forma, chegou-se a maior recuperação possível do condensado. Para reduzir a evaporação das torres de resfriamento o autor sugeriu a instalação de um sistema de resfriadores a ar independentes na linha de retorno de água quente, para a torre conseguir uma redução de $116\text{m}^3/\text{h}$ de água a um custo de 3,315,000 dólares.

A redução no consumo de água da água de reposição foi sugerida com o aumento do ciclo de concentrações para 10, seguido por um tratamento de osmose reversa para a remoção de contaminantes da purga. Esta escolha permitiu uma redução de $49,03\text{ m}^3/\text{h}$ de água e um investimento inicial aproximado. A presença de amônia, por exemplo, poderia levar a uma proliferação de microrganismos ocasionando um aumento da taxa de corrosão e no custo de tratamento de água de resfriamento (GASPARINI, 2011). Por fim, a racionalização do uso de água na REVAP possibilita uma expansão da produção e, consequentemente, do consumo de água e da produção de efluentes, sem a necessidade de investimentos para a ampliação da ETA e da ETE de 750,000 dólares.

Vanelli (2004) também sugere a reutilização da água ácida¹⁰ retificada como água de reposição nas torres de resfriamento, porém a concentração de contaminantes da água ácida é variável em função do processo que a gerou, o que torna sua reutilização limitada.

Gasparini (2011) realizou um estudo de caso na refinaria de Paulínia (REPLAN) a partir da caracterização de correntes de água de processos que apresentam possibilidade de tratamento e reuso. Em seguida, selecionou um dos efluentes caracterizados para estudo do potencial de reuso através de ensaios de tratabilidade com processos físico-químicos para degradação dos poluentes e reutilização em unidades de processo. Os tratamentos analisados foram a fotólise com radiação ultravioleta, peroxidação, peroxidação assistida por radiação ultravioleta (H₂O₂/UV) e processos oxidativos avançados¹¹.

A corrente de água ácida retificada foi a corrente selecionada por apresentar parâmetros bioquímicos com valores adequados para os processos de tratamento estudados e também por representar um volume aproximado de 2400m³/dia, que não é reutilizado pela refinaria. O tratamento mais indicado para esta corrente foi a peroxidação assistida por radiação ultravioleta para ser reutilizada como água de reposição no sistema de resfriamento, já que esta é responsável por aproximadamente 49% do total de água utilizada na refinaria.

Na pesquisa realizada por Anze (2013), foi elaborada uma metodologia de otimização para alocação ótima de uso e reuso de água em refinarias com a utilização de regras heurísticas que representam restrições reais dos processos e, desta forma, simplificam a configuração da solução do problema. Neste estudo, primeiramente são avaliados os processos que utilizam água e suas equações de balanço material. Em seguida, a autora realizou a caracterização dos requisitos de qualidade para uso da água em cada processo, bem como a concentração máxima tolerável dos contaminantes e desta

¹⁰ Água ácida assim denominada por ter contato direto com correntes de processamento de hidrocarbonetos, que se deve a condensação do vapor de água utilizado como redutor de pressão parcial de hidrocarbonetos em torres de destilação, ou como produto da própria condensação do vapor gerado da água que contamina uma carga de hidrocarbonetos.

¹¹ Os POA são tecnologias desenvolvidas baseadas em processos físico-químicos capazes de alterar as estruturas químicas dos contaminantes a partir da geração de radicais hidroxila (-OH) que reagem com uma grande variedade de compostos orgânicos complexos, oxidando-os a moléculas simples e biodegradáveis (GASPARINI, 2011).

forma conseguiu definir uma rede de consumo de água e suas restrições necessárias para o problema de otimização.

Em etapa precedente à otimização da rede de água modelada, a autora apresentou as seguintes propostas de racionalização já consolidadas na literatura para minimizar o consumo de água individual dos processos da refinaria hipotética conforme Tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Economia de água por propostas de racionalização

Propostas de Racionalização de água	Economia de água fresca (m ³ /h)
Uso de Trocadores de calor resfriados a ar	350
Aumento do ciclo de concentração	71,72
Aumento da recuperação de condensado	48
Aproveitamento da purga de caldeiras	12,46
Uso de refeedor nas colunas de retificação	6,9
Operação das dessalgadoras em contracorrente	45

Fonte: (Anze, 2013)

O resultado da otimização global da rede de água montada sugeriu que unidades de dessalgação e a água utilizada para descoqueamento sejam abastecidas com as águas ácidas retificadas provenientes das unidades de Separação, Conversão e Hidrotratamento. Este resultado não considerou o valor ótimo para o comprimento da tubulação de água, dependente da distância entre as unidades de processo. No caso da refinaria estudada, ao limitar o comprimento de tubulações, o melhor resultado foi o abastecimento de água das unidades de conversão a partir das as unidades de Hidrotratamento e de Separação. Por fim, Anze (2013) conclui que o maior consumo de água no refino é proveniente do sistema de resfriamento e, portanto, o uso de trocadores híbridos e aumento no ciclo de concentração seriam ótimas opções de racionalização de água.

Nogueira (2007) também abordou o tema de racionalização de água em refinarias ao elaborar o balanço hídrico por unidade de processo e global da REPLAN seguido de um levantamento de maus usos e desperdícios. A partir da análise do balanço hídrico global, o autor quantificou que do total de água bruta captada pela refinaria, 49% é

destinada para as torres de resfriamento, 32% para geração de vapor e 13,2% para o sistema de combate a incêndio e o restante para os demais usos da refinaria. A partir do balanço realizado, o autor sugeriu as seguintes técnicas de reuso de água: reutilização de água proveniente de esgoto doméstico para a reposição das torres de resfriamento e reuso de água nas piscinas de coque.

Além disso, Nogueira (2007) concluiu que 1.015,8 m³/h de água, que representa aproximadamente 61,5 % do total de água captada, não chega à estação de tratamento em decorrência de perdas nos processos, principalmente devido a evaporação e arraste nas torres de resfriamento, que representam 77,8% do total de água consumida e os 22,2% restantes foram considerados como perdas em unidades de processos.

Amorim (2005) identificou alternativas para o abastecimento de água da REPLAN que garantam o suprimento necessário para atender as ampliações de carga e a implantação das novas unidades que eram previstas no Planejamento Estratégico da Petrobras no ano de 2004 considerando o cenário de disponibilidade hídrica da região onde a REPLAN se localiza. Para isto, o primeiro passo foi estudar a criticidade hídrica da região em questão. A disponibilidade de água analisada pelo autor considerou apenas o volume de chuva por área no caso de águas superficiais e o volume de reserva das águas subterrâneas de acordo com dados obtidos na literatura. E especificamente para o estado de São Paulo, o autor utilizou o critério de volume de água disponível por habitante por ano para estabelecer um índice de criticidade de água. Não houve análise de crescimento dos consumidores de água que captam este recurso na mesma bacia e, portanto, passíveis de gerar conflitos no futuro (AMORIM, 2005).

Para a projeção futura de consumo de água da refinaria foram utilizados os dados disponibilizados pela própria REPLAN em função das novas unidades de processo planejadas no projeto de ampliação da carteira de diesel e nafta. Como conclusão, Amorim (2005) avaliou as seguintes possibilidades: uso racional dos recursos hídricos; reuso dos efluentes não tratados; uso de esgoto municipal; captação de água superficial; captação de água subterrânea e utilização de água de chuva. Entretanto esta avaliação não estudou os tipos de contaminantes e os tratamentos necessários para que as alternativas propostas fossem viáveis.

Na pesquisa realizada por Pombo (2011), foram apresentadas as principais tecnologias de tratamento de efluentes com a finalidade de reutilização e seus custos. Em seguida, o autor utilizou duas aplicações da técnica de otimização de troca mássica

baseada no ponto mínimo de consumo de água (*water pinch*) que resultaram em redes ótimas de distribuição de água para as refinarias analisadas. Os resultados mais significantes foram a redução da vazão mínima de água obtida com o processo de regeneração e o reuso da unidade de destilação na unidade de hidrodessulfurização.

Por fim, o autor expôs várias experiências realizadas de racionalização do consumo de água em refinarias de petróleo internacionais e nacionais. Dentre as principais técnicas utilizadas para o tratamento de efluentes nas refinarias pesquisadas encontram-se: as membranas, os biorreatores a membrana, a osmose inversa e a eletrodiálise reversa.

Gondim (2014) realizou um trabalho a fim de estudar alternativas de redução do consumo de água em torres de resfriamento associada à redução de perdas nos sistemas de geração de vapor de refinarias brasileiras. Para isto, foi criada uma metodologia de otimização do ciclo de concentração das torres de resfriamento e de economia de água no sistema de purga e recuperação de condensado durante o processo de geração de vapor. O autor analisou 34 torres de resfriamento em 9 diferentes refinarias, para as quais adotou a metodologia de otimização dos ciclos das torres. Para o sistema de geração de vapor foi avaliada uma refinaria de porte médio (24000 m³/d de petróleo processado), com o objetivo de enfatizar a otimização das purgas das caldeiras e a recuperação de condensado. A partir do resultado destas análises, Gondim (2014) concluiu que ao se elevar o ciclo de concentração é possível obter redução no consumo de água de reposição e desta forma reduz-se o volume de água bruta captado pelas refinarias, o volume da purga das torres de resfriamento e, conseqüentemente, o volume de efluentes gerados, além de reduzir os custos anuais da refinaria.

2.5. Principais Alternativas de Reuso de Água em Refinarias

2.5.1. Reuso de água de processo

Medidas para diminuir ou reutilizar água de processo são mais dispendiosas e difíceis porque em muitos processos a água é contaminada devido ao contato com hidrocarbonetos. Isso exige, portanto, processos de tratamento mais complexos e específicos para cada tipo de contaminante assim como para cada tipo de reutilização.

De acordo com Nogueira (2007), o processo que mais gera efluente é a destilação, responsável por 42% de todo o efluente gerado. Isso se deve ao processo de dessalgação do petróleo bruto. É possível a reutilização deste efluente após tratamento complementar com etapas de clarificação por flotação de ar dissolvido, filtração em membranas e osmose reversa. Entretanto, a salmoura das refinarias comumente destina-se diretamente a ETDI.

As torres de resfriamento contribuem com 12% do total de efluentes da refinaria seguida pelas unidades de coqueamento e craqueamento que representam somadas 9% do total. Estas últimas unidades apresentam condensados com contaminação que impedem seu retorno para a geração de vapor.

Para o processo de dessalgação, pode-se utilizar a purga da torre de resfriamento já que esta é um dos efluentes de água mais puros das refinarias por não ter contato com hidrocarbonetos (HWANG; MOORE, 2011)

Alguns autores estudaram alternativas para reduzir o consumo de água nas torres de resfriamento através da reutilização da água de purga ou melhorar a qualidade da água de resfriamento. Altman et al. (2012) usaram osmose reversa para o tratamento da corrente de recirculação de uma torre de resfriamento e deste forma conseguiram uma redução de 16% na reposição de água e 49% na purga de efluentes (ALTMAN et al., 2012).

Com este mesmo objetivo, Limpt e Wal (2014) trataram o fluxo de água de reposição e conseguiram economias de até 85% de insumos químicos, 28% de água de reposição e 48% de efluente descarregado ao utilizar o processo de deionização capacitiva¹² (VAN LIMPT; VAN DER WAL, 2014)

Além disso, em Petrobras (2005) está descrito o projeto ainda a ser implementado do sistema de Reuso de Efluente Tratado com capacidade para tratar 360 m³/h de água a ser utilizada como água de reposição nas torres de resfriamento. Esse sistema é baseado na tecnologia de uma unidade de Eletrodiálise Reversa (EDR) e outras unidades auxiliares destinadas a remoção de sólidos suspensos, carga orgânica e íons do efluente da ETDI. O cálculo de projeto prevê um aproveitamento de 239 m³/h de água de reuso.

¹² É um processo eletroquímico que opera adsorvendo íons na dupla camada elétrica formada na interface eletrodo-solução através da aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos

A água ácida proveniente dos processos de craqueamento catalítico e coqueamento retardado contém, além de H_2S e NH_3 , fenóis e cianetos e, portanto, o seu efluente deve ser segregado do restante de água ácida produzida na refinaria e direcionado para tratamento específico. Depois de tratamento em *strippers*, a água retificada pode ser usada preferencialmente como água de lavagem de dessalgadores. Desta maneira, aproximadamente 90% dos fenóis contidos na água ácida são removidos e resultam na redução da carga de fenóis na ETDI.

2.5.2. Alteração dos ciclos de concentração

Outra forma de diminuir o consumo de água das torres de resfriamento é através do aumento dos ciclos de concentração, que são usados para descrever a relação de fluxo de massa entre a quantidade de água de alimentação do sistema de resfriamento e a quantidade de purga utilizada. Ciclos elevados de concentração estão diretamente relacionados a baixos níveis de perda de água do sistema, ou seja, a água é recirculada por mais tempo (EERE, 2011).

Porém, à medida que a água do sistema é perdida por evaporação, os níveis de minerais dissolvidos se elevam ainda mais com ciclos de concentração mais elevados, e como consequência, incrustações e o potencial de corrosão também aumentam. Desta forma, o fator limitante do ciclo de concentração é o limite de saturação dos minerais dissolvidos que, se excedido, levará à formação de incrustações além de aumentar a tendência da água de ser corrosiva (EERE, 2011).

Programas de tratamento químico e mecânico permitem que os limiares das tendências de incrustação e corrosão sejam aumentados. No entanto, os limites de concentração ainda necessitam de gerenciamento constante dos níveis de minerais dissolvidos (condutividade) (EERE, 2011).

Um adequado ciclo de concentração para um dado sistema é determinado pelo seu projeto, características da água, parâmetros de operação e pelo programa de tratamento adotado. O aumento bastante significativo do número de ciclos está associado necessariamente à adição de substâncias químicas às águas de purga de torres de resfriamento para evitar precipitação de sais, corrosões além de outros riscos relacionados a operação. Apesar de um maior número de ciclos e maior utilização de águas de purga

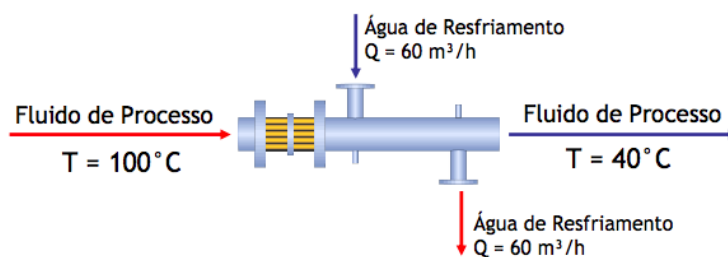
reduzir a utilização de água e seus custos associados, a necessidade de tratamento das águas aumenta os custos de operação do sistema e, portanto, deve-se pesar a ação que trará o melhor custo-benefício.

Gondim (2014) elaborou um estudo com algumas refinarias brasileiras não identificadas e avaliou a redução de água de reposição e de purga ao aumentar o ciclo de concentração. Para o grupo de refinarias com produção maior que 40.000 m³/d, chegou-se a média de ciclo de concentração igual a 5. Algumas refinarias deste grupo apresentaram tendências a incrustações severas ao aumentar o ciclo de concentração. Esta característica, entretanto, não é limitante para que haja alterações no ciclo de reposição de água, porém é preciso que haja conjuntamente um programa de tratamento de água específico. Dos resultados dispostos foi obtida uma média do percentual de redução de água de reposição e de purga de 11,6%, equivalente a aproximadamente 245m³/h de redução de consumo de água de reposição e a mesma grandeza para a redução dos efluentes gerados.

2.5.3. Uso de resfriadores a ar (air coolers)

Trocadores de calor que utilizam o ar como fluido de troca podem ser incluídos em torres de resfriamento formando assim um sistema híbrido. A principal vantagem desse sistema é que a partir do momento em que ocorre a redução da carga térmica total das torres diminui-se a necessidade de reposição de água e de purga, visto que a taxa de perda evaporativa se torna menor.

No exemplo a seguir foi possível alcançar uma redução de 80% de água de reposição em decorrência da utilização de *air coolers*.



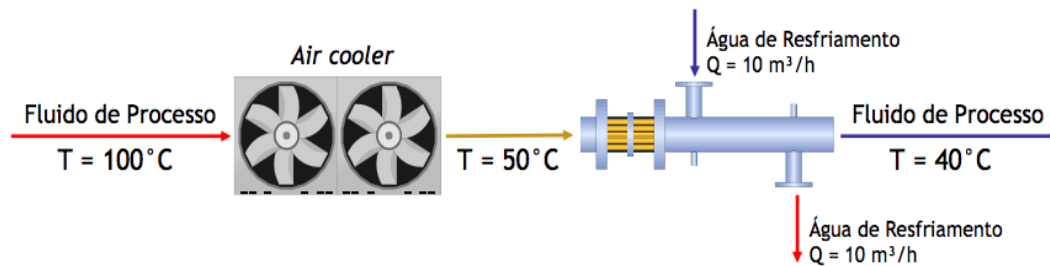


Figura 10: Demonstração da economia de água com a utilização de *air coolers*

Fonte:(JULIÃO; TOUMA, 2015)

O ponto negativo desta tecnologia é o custo operacional que deve ser confrontado com o custo atual da água que deixaria de ser utilizada e também é necessário avaliar se a refinaria existente dispõe de espaço físico suficiente para este tipo de equipamento.

2.5.4. Medidas de Eficiência Energética

Algumas medidas de eficiência energética implicam diretamente na redução do vapor utilizado em processos. Na tabela abaixo estão listadas algumas medidas que reduzem o consumo de vapor.

Tabela 3: Medidas de eficiência energética que reduzem o uso de vapor

Unidade	Medidas	Vapor		Taxa de Penetração	Custo (US\$/GJ)
		Relativo ou Absoluto	Redução		
UDA	Redução do make-up de água da caldeira com tratamento	Relativo	20%	50%	0,47
UDA	Redução do fouling de vapor	Relativo	40%	40%	2,45
UDA	Instalação de bombas de vácuo para substituir ejetores de vapor	Absoluto	57%	90%	3,31
FCC	Instalação de torre regeneradora HRSG Regenerador	Absoluto	306%	70%	5,14
FCC	Substituir drive a vapor por elétricos	Absoluto	33%	50%	4,11
FCC	Instalação de forno-CO na torre regeneradora HRSG	Absoluto	68%	40%	8,22
HDS G	Redução de condensado/Tratamento de água	Relativo	33%	50%	0,47
HDS G	Substituição de drive a vapor por elétrico no compressor	Relativo	64%	40%	4,52
HDT D	Revamp na integração de calor do HDT (lowcost)	Relativo	61%	0%	3,67
HDT Q	Substituição de drive a vapor por elétrico no compressor	Absoluto	49%	40%	4,52
HDT N	Substituição de drive a vapor por elétrico no compressor	Absoluto	64%	40%	4,52
HDT I	Substituição de drive a vapor por elétrico no compressor	Absoluto	57%	40%	4,52

Fonte: Guedes (2015)

2.5.5. Utilização de água pluvial

Outra oportunidade de utilização de água é a captação da água pluvial que após tratamento, pode ser considerada para a make-up da água de incêndio. Alternativamente, pode ser usado para geração de vapor após tratamento em ultrafiltração, nos casos em que é possível segregar a água pluvial captada e utilizar a parcela que não contém contaminantes (HWANG; MOORE, 2011).

A água pluvial também possui uso potencial como água de resfriamento em virtude da baixa salinidade na origem assim como para água de reposição de caldeira. Neste último caso, é preciso que a água pluvial esteja descontaminada e ainda passe pelos processos de tratamento para remoção de sólidos e remoção da dureza.

Entretanto, o contato com o piso das unidades de processo ocasiona a sua contaminação e requer o monitoramento do programa de tratamento químico constante, além da segregação da porção contaminada antes de ser encaminhada para reutilização (HWANG; MOORE, 2011).

2.5.6. Utilização de água de esgoto tratada

Segundo Amorim (2005), no caso da REPLAN, o volume de esgoto doméstico gerado, cerca de 15m³/h, não justifica realizar investimentos para este tipo de reuso. Porém, em casos de extremos, deve-se considerar a hipótese de utilizar esgoto proveniente de cidades como Paulínia ou Campinas.

A utilização de água de esgoto tratada deve ser direcionada para processos que não requerem uma qualidade muito alta da água como por exemplo como água de reposição de torres de resfriamento, como água utilizada para lavagens na refinaria e água de incêndio (Nogueira 2007).

Para o tratamento, além do tratamento biológico, ou secundário, necessita-se remover os sólidos em suspensão, desinfetar o efluente e ainda utilizar o tratamento terciário para a remoção de contaminantes como amônia e fósforo, contaminantes comuns encontrados neste tipo de efluente. O programa de tratamento da água de resfriamento também deve ser alterado, uma vez que o esgoto municipal tem teores de sílica, dureza e alcalinidade são muitas vezes maiores do que da água bruta captada.

3. Recursos Hídricos no Brasil

O território brasileiro devido a sua grande extensão, diversidade geográfica e climatológica, apresenta características diferenciadas em relação ao volume de água disponível para retirada e consumo.

O regime fluvial sofre variações ao longo do ano que estão estreitamente relacionadas ao regime de precipitações e este último se altera em função da ocorrência de anos mais úmidos e anos mais secos. Existe também uma sazonalidade com estações secas e chuvosas bem definidas, que pode ter como consequência vazões muito abaixo das vazões médias e em casos extremos a ausência de água.

Desta forma, a disponibilidade de água está distribuída de forma desigual nas bacias hidrográficas brasileiras e, conseqüentemente, nos estados. Como exemplo, aproximadamente 80% da água superficial disponível do país está localizada na Região Hidrográfica Amazônica que é justamente a região brasileira com o menor índice de urbanização (ANA, 2014).

A demanda por recursos hídricos no país é crescente. Segundo ANA (2015b), estima-se que a utilização de água aumentou cerca de 80% nas últimas duas décadas e além disso, prevê-se que a retirada de água ainda aumente mais 30% até o ano de 2030. Este aumento está ligado diretamente aos processos de urbanização e desenvolvimento econômico do país.

Em relação a utilização de água, é possível classificá-la da seguinte forma:

- Água retirada: é o volume bruto de água que foi captada para um determinado uso.
- Água de Retorno: é a parcela de água retirada que retorna aos corpos hídricos.
- Água Consumida: é a parcela da água retirada que não retorna diretamente aos corpos hídricos, ou seja, é a diferença entre a água que foi retirada e o a quantidade que foi retornada.

3.1. Usos de água

Os principais usos da água no Brasil são para irrigação, abastecimento humano e animal, industrial, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, turismo e lazer.

Os múltiplos usos dos recursos hídricos no país são diversificados e a sua disponibilidade também está relacionada com o desenvolvimento social (densidade populacional e o grau de urbanização), agrícola e industrial. Além disso, para cada uso existe um critério de qualidade de água específico. Para navegação, por exemplo, não é necessária uma água de qualidade, entretanto, para abastecimento urbano este critério torna-se fundamental.

A região Centro-Oeste e Norte do país dispõe de água de boa qualidade para os diversos usos já que a ocupação urbana ainda é muito pequena comparada com as demais regiões brasileiras. Entretanto a presença de áreas de preservação na região amazônica e no Pantanal limitam a disponibilidade hídrica.

Já as regiões Sudeste e Sul do país devido ao alto grau de ocupação urbana e industrial apresentam áreas críticas em relação a disponibilidade de água e sua qualidade, o que limita consideravelmente a possibilidade de uso ou requer um alto investimento para sua viabilidade.

A região Nordeste do país, que apresenta clima semiárido em parte de sua área total, é regida por período de chuvas escassas e ainda agravada pela poluição da água causada principalmente pela falta de saneamento básico nesta região.

Os usos de água mais relevantes no Brasil estão representados na Figura 11 e Figura 12, nas quais apresenta-se o percentual de retirada e de consumo de água no ano de 2016.

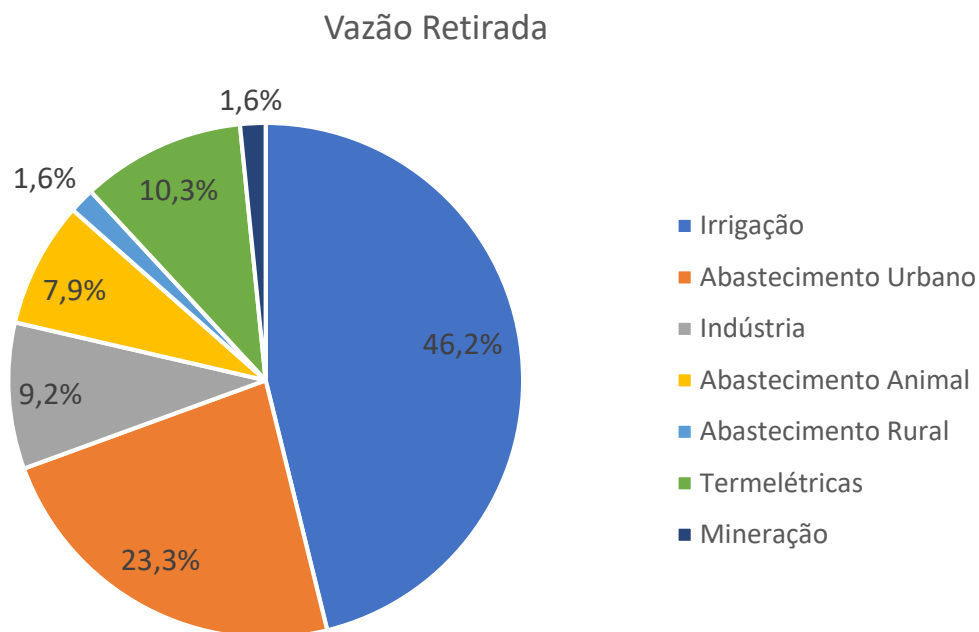


Figura 11: Percentual da vazão de retirada de água no Brasil por tipo de uso

Fonte: (ANA, 2017b)

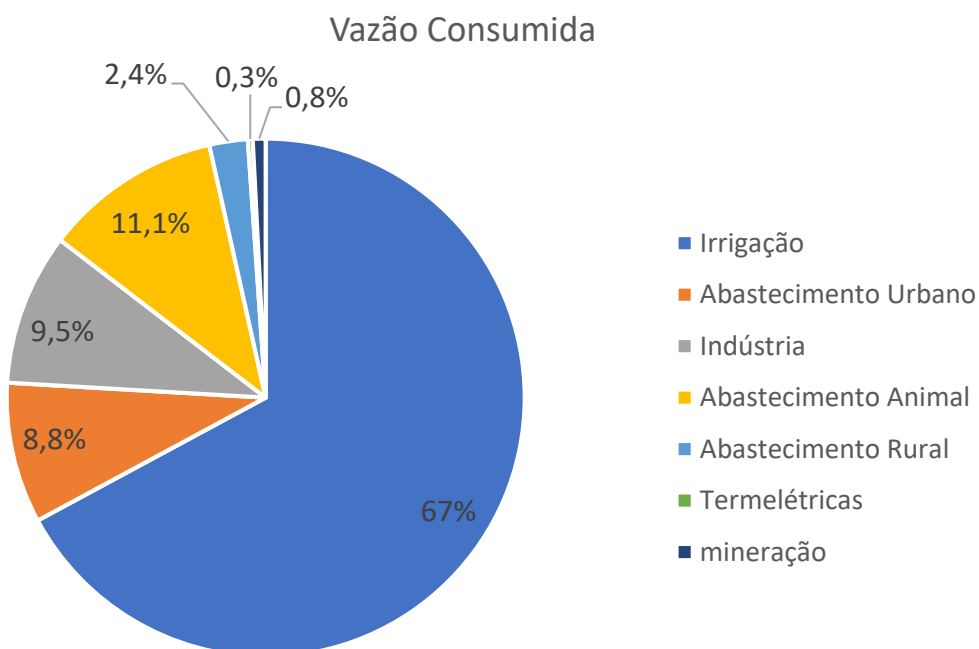


Figura 12: Percentual da vazão de consumo de água no Brasil por tipo de uso

Fonte: (ANA, 2017b)

A vazão de retirada de água total no Brasil é de 2057,8 m³/s e deste valor, 46,2% se deve à irrigação seguido pelo abastecimento urbano que representa uma parcela de 23,3% e o uso industrial e termelétricas que juntas representam 19,2%. Em relação à vazão de água consumida no país, o percentual de irrigação se torna ainda mais significativo, equivalente a 67% do total de 1081,3 m³/s. Isto ocorre devido a água ser retida pelas plantas, evaporada ou infiltrada nos solos de forma que apenas uma pequena parcela de água escoar e atinge um corpo d'água (ANA, 2017b).

Segundo ANA (2017b), as áreas irrigadas no Brasil têm crescido a taxas médias anuais superiores a 4% desde 1960 e os cenários propostos indicam que este crescimento permanecerá até 2030.

A população rural retirou uma vazão de 33,8m³/s em 2016 para seu abastecimento, que é realizado principalmente por meio do uso de poços, captações isoladas ou cisternas. Para o abastecimento urbano retirou-se 488,3m³/s de água em 2016. Já, a parcela de água consumida pelo abastecimento humano urbano é menor devido aos programas de saneamento básico presentes principalmente nos grandes centros urbanos (ANA, 2017b).

Apesar da cobertura elevada de acesso à rede de abastecimento de água no país, que atualmente chega a aproximadamente 93%, isto não garante a disponibilidade hídrica nos mananciais de onde a água é retirada e consequentemente, o atendimento a oferta de água necessária.

Em relação ao uso de água industrial, a mineração é a maior consumidora de água e se concentra nos estados de Minas Gerais e Pará os quais detém 85% da demanda de água total, que corresponde a 32,8 m³/s (ANA, 2017b).

Já nas indústrias de transformação, a demanda de água corresponde a 192,4 m³/s e está diretamente associada aos tipos de processos, produtos fabricados, tecnologia utilizada além de boas práticas de gestão. Estas indústrias estão concentradas principalmente na região sudeste do país (ANA, 2017b).

Outro uso de significativa importância no Brasil é o abastecimento animal. Neste uso está incluído não apenas a dessedentação animal, mas também o uso de água necessário durante a criação e nas instalações. O consumo de água para abastecimento animal varia de acordo com a espécie animal, seu estágio de desenvolvimento fisiológico além das condições ambientais e de manejo. No Brasil, este consumo totaliza 123m³/s sendo grande parte devido a criação de bovinos (ANA, 2017b).

3.2. A Regulamentação da água

A regulamentação da água ocorreu formalmente a partir da instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos¹³ (PNRH).

A PNRH trata-se de um instrumento legal que estabelece alguns princípios como a água sendo um bem público, limitado, mas dotado de um determinado valor econômico. Esta política também estabelece que a gestão hídrica deva prover a água para seus múltiplos usos considerando a diversidade geográfica e socioeconômica das diversas regiões do Brasil e, em situações eminentes de escassez, deve-se priorizar o consumo humano e animal (BRASIL, 1997).

Ainda, apresenta como seu principal objetivo “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos seus respectivos usos”. E para estes fins, institui a bacia hidrográfica como a unidade de gestão de recursos hídricos (BRASIL, 1997).

Atualmente, o Brasil é dividido em 29 Unidades de Gestão de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas de Rios que são de Domínio da União (UGRH) que tem como objetivo principal orientar a priorização na implantação de comitês de bacia e implementação dos instrumentos da PNRH.

O Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) por sua vez são delineados para promover a gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos, atuando no fomento à implementação dos instrumentos de gestão, da negociação de conflitos pelo uso da água e da promoção dos diferentes usos da água na bacia (BRASIL, 1997).

A PNRH institui os seguintes instrumentos:

- Plano de Recursos Hídricos

O plano define regras para o uso da água como prioridades de outorga, condições de operação de reservatórios, diretrizes e critérios de cobrança pelo uso da água e metas de racionalização. Ademais, os estudos de diagnóstico dos recursos hídricos e de

13 Lei Federal nº 9.433/1997, que regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal do Brasil de 1988, que atribui à União a competência para instituir o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SNGRH), ademais, para definir os critérios de outorga de direitos de seu uso (BRASIL, 1988).

disponibilidade também estão inseridos no contexto do plano de recursos hídricos das bacias (BRASIL, 1997).

- Enquadramento dos copos d'água em classe conforme os usos preponderantes

O enquadramento é um recurso de gestão que tem como objetivo garantir que a qualidade da água seja compatível com a sua demanda, considerando os usos mais exigentes a que forem destinadas (BRASIL, 1997).

A classificação possibilita um maior controle de poluição e avaliação da evolução da qualidade dos corpos d'água e desta forma garante que a qualidade da água esteja de acordo com sua utilização (BRASIL, 1997).

Os corpos hídricos nacionais são classificados em nove classes listadas a seguir (BRASIL, 2005):

- Classe Especial: aquelas destinadas ao abastecimento doméstico com desinfecção; à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
- Classe 1: destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento simples; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário (natação, esqui e mergulho); à irrigação de hortaliças consumidas cruas e de frutas que cresçam rentes ao solo e ingeridas sem remoção de película; à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.
- Classe 2: águas destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário; irrigação de hortaliças e frutíferas; à criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana.
- Classe 3: águas destinadas ao consumo humano após tratamento convencional; à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; dessedentação de animais;
- Classe 4: águas destinadas à navegação; harmonia paisagística; e aos usos menos exigentes.

- Classe 5: águas salinas destinadas à recreação de contato primário; proteção das comunidades aquáticas; criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas a alimentação humana.
- Classe 6: águas salinas destinadas à navegação comercial; harmonia paisagística; recreação de contato secundário.
- Classe 7: águas salobras destinadas à recreação de contato primário; proteção das comunidades aquáticas; à criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas a alimentação humana.
- Classe 8: águas salobras destinadas à navegação comercial; harmonia paisagística; recreação de contato secundário.

Para cada classe citada acima existem restrições de uso e lançamento de efluentes de acordo com a resolução CONAMA N°357 (BRASIL, 2005).

No Brasil, a Classe 2 é adotada como referência onde não há enquadramento aprovado. A grande maioria dos corpos hídricos se encaixa nesta situação, pois ainda há poucas propostas de enquadramento aprovadas pelos órgãos competentes.

- Outorga do direito de uso dos recursos hídricos;

A outorga de direitos de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água para os múltiplos usos (BRASIL, 1997).

As outorgas são solicitadas pelo usuário de água e emitidas pelos órgãos gestores estaduais, se a captação for em corpo d'água de domínio estadual, ou pela ANA, se em corpo d'água federal. Além disso, o lançamento de efluentes em corpos d'água também necessita de outorga porque representa um tipo uso, já que pode indisponibilizar o recurso hídrico para outros usos que dependam de água de qualidade mais elevada.

Cada unidade federativa e a União têm autonomia para definir os critérios para a emissão de outorga de direito de uso das águas sob seu domínio. Geralmente, utiliza-se uma vazão de referência¹⁴.

Conforme disposto na Lei Federal n. 9.433/1997, dependem de outorga:

¹⁴ A vazão de referência é o estabelecimento de um valor de vazão que passa a representar o limite superior de utilização da água em um curso d'água.

- A derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo d'água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;
- A extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo
- Lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;
- Uso de recursos hídricos com fins de aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; - Outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

A outorga não proporciona ao usuário a propriedade da água, mas o direito de seu uso. Portanto, a outorga poderá ser suspensa, parcial ou totalmente, em casos extremos de escassez, de não cumprimento pelo outorgado dos termos da outorga, por necessidade premente de se atenderem os usos prioritários e de interesse coletivo, dentre em outras hipóteses previstas na legislação.

- Cobrança pelo uso dos recursos hídricos

A cobrança pela água pode ser entendida como uma compensação a ser paga pelos usuários de recursos hídricos de forma a garantir os padrões tanto de qualidade quanto de quantidade e regime dos recursos hídricos. Esta cobrança também tem como objetivo incentivar o uso racional da água e conseguir recursos para obras e programas estipulados pelos comitês de bacias hidrográficas (CNRH, 2005).

De acordo com a PNRH estão sujeitos a cobrança pelo uso de água para as captações de recursos hídricos que necessitam de outorga e a cobrança é efetuada pela entidade ou órgão gestor de recursos hídricos (CNRH, 2005).

- Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

O Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos é um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão.

3.3. Disponibilidade hídrica

A disponibilidade hídrica de uma região é uma estimativa de um balanço entre o seu potencial de produção de água ofertável e a quantidade demandada pelos múltiplos usos consuntivos.

Esta estimativa é feita a partir da comparação do total de água consumido na região com uma vazão mínima de referência de forma a se estabelecer um percentual de consumo utilizado como parâmetro para definir se a região é abundante ou escassa em água.

Os dois parâmetros utilizados no Brasil são as vazões mínimas com determinado tempo de recorrência ou as vazões determinadas por uma curva de permanência. A primeira abordagem é geralmente definida como a $Q_{7,10}$ (representa os sete dias de menor vazão consecutivos para um período de retorno de 10 anos) que é comumente utilizada pelos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais como critérios para a concessão de outorgas (ANA, 2013).

As vazões determinadas por curvas de permanência são utilizadas como parâmetro para definição de outorgas em trechos de rios federais. Utiliza-se a vazão de estiagem Q_{95} , que representa a vazão que passa um determinado trecho com 95% de garantia. Nos trechos de rio sob influência de reservatórios, devido a alteração de sua vazão natural, a disponibilidade é estimada a partir da vazão mínima defluente¹⁵ do reservatório somada às contribuições de vazões Q_{95} que afluem a partir do trecho de rio analisado (ANA, 2013).

Em relação à demanda de uma região hidrográfica, ela pode ser classificada como consuntiva ou não-consuntiva. A primeira refere-se a demanda de água utilizada para fins de abastecimento humano e animal, para uso industrial e irrigação. A demanda não-consuntiva se refere a qualquer utilização da água em que não ocorra sua retirada como, por exemplo, para a geração hidrelétrica, lazer ou navegação (ANA, 2014).

De acordo com o relatório de conjuntura da ANA (2015c), algumas regiões do Brasil já apresentam situação muito crítica. As bacias da Região Semiárida, por exemplo, apresentam baixa disponibilidade hídrica.

¹⁵ É a vazão mínima liberada pelo reservatório

Nas bacias localizadas na região Sul a situação crítica se deve a alta demanda de água utilizada na irrigação, principalmente do cultivo de arroz. Já as bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí apresentam alta demanda para abastecimento humano urbano em conjunto com a baixa disponibilidade de água nas cabeceiras. O mesmo ocorre na região central do país, principalmente as bacias do rio São Marcos, São Bartolomeu, Preto e Javaés, onde a criticidade ocorre devido ao uso intensivo de água para irrigação associada às áreas de cabeceiras com baixa disponibilidade de água (ANA, 2014).

Cabe ressaltar que em bacias que se caracterizam pelo consumo excessivo de água para irrigação e pecuária acabam por influenciar ainda mais a criticidade já que o desmatamento e a agricultura intensiva, ao mesmo tempo que diminuem a quantidade de água, ainda impactam a qualidade da água dos rios.

Além disso, algumas regiões brasileiras têm baixa cobertura de serviços de saneamento e por mais que não estejam em situações críticas em relação à quantidade de água, apresentam seus corpos d'água deteriorados, o que limita a disponibilidade do recurso hídrico e aumenta os custos de tratamento de água. Alguns municípios chegam a buscar por água em mananciais mais distantes devido a péssima qualidade da água dos pontos de captação mais próximos.

4. Procedimento Metodológico

De modo a investigar a interferência causada pela variação de disponibilidade hídrica em refinarias utilizou-se um procedimento metodológico dividido pelas seguintes etapas:

1. Coleta de informações sobre o parque de refino brasileiro atual, sua localização em função das bacias hidrográficas e sua capacidade produtiva.
2. Cálculo da demanda de água através da simulação do parque de refino brasileiro a partir da ferramenta *Carbon and Energy Strategy Analysis for Refineries* (CAESER)¹⁶, adaptada para incluir o volume de água retirado e consumido em cada refinaria.
3. Avaliação da disponibilidade de água nas bacias hidrográficas onde estão localizadas as refinarias brasileiras de acordo com critérios adotados pela ANA e escolha da área de estudo.
4. Construção de um balanço hídrico de uma refinaria selecionada para estudo através da utilização do *software Water Evaluation and Planning System* (WEAP) para simulação do balanço hídrico e o ArcGIS para desenvolvimento de mapas e estudo dos diferentes usos do solo. Os passos utilizados nesta etapa serão detalhados na Figura 13 a seguir.

¹⁶ Ferramenta desenvolvida pelo Programa de Planejamento Energético (PPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro e utilizada para simular a capacidade de produção de derivados do parque de refino brasileiro. A versão original desta ferramenta do final dos anos 1990 foi descrita em (TOLMASQUIM; SZKLO, 2000), atualizada em Guedes (2014) e aprimorada este ano para incorporação de balanços hídricos.

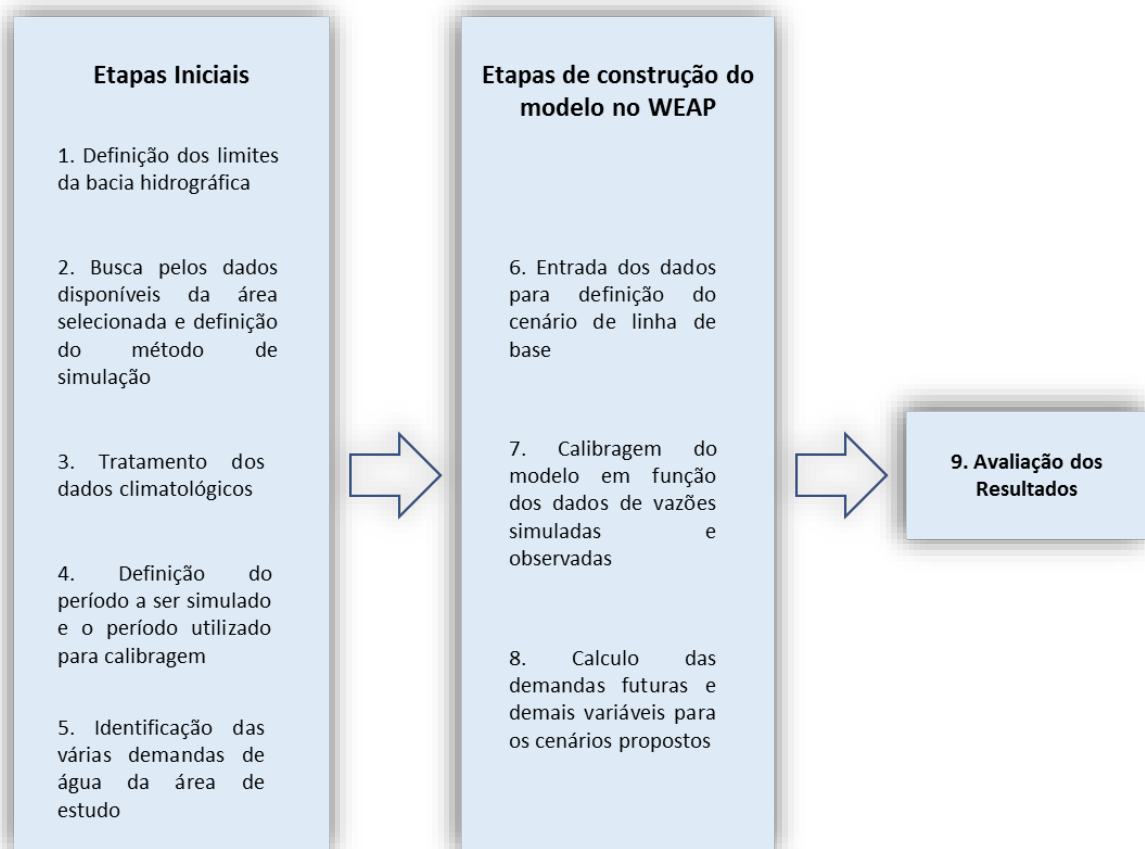


Figura 13: Esquema metodológico do WEAP

Fonte: Elaboração Própria

5. Avaliar as possíveis consequências da deficiência hídrica na produção de derivados da refinaria estudada e propor alternativas para redução do consumo de água.

4.1. Simulação do Parque de Refino

A produção de derivados das refinarias analisadas e o consumo de água dos processos serão simulados através da ferramenta *Carbon and Energy Strategy Analysis for Refineries* (CAESAR) a qual é detalhada em Guedes (2014).

Cada refinaria simulada no CAESAR obedece a um esquema básico de refino definido pelas unidades de processo presentes e seus rendimentos que variam em função da carga e campanha. A Figura 14 representa o esquema de refino geral utilizado pela ferramenta durante

a simulação em todos os períodos. Cada refinaria simulada utiliza partes do esquema apresentado.

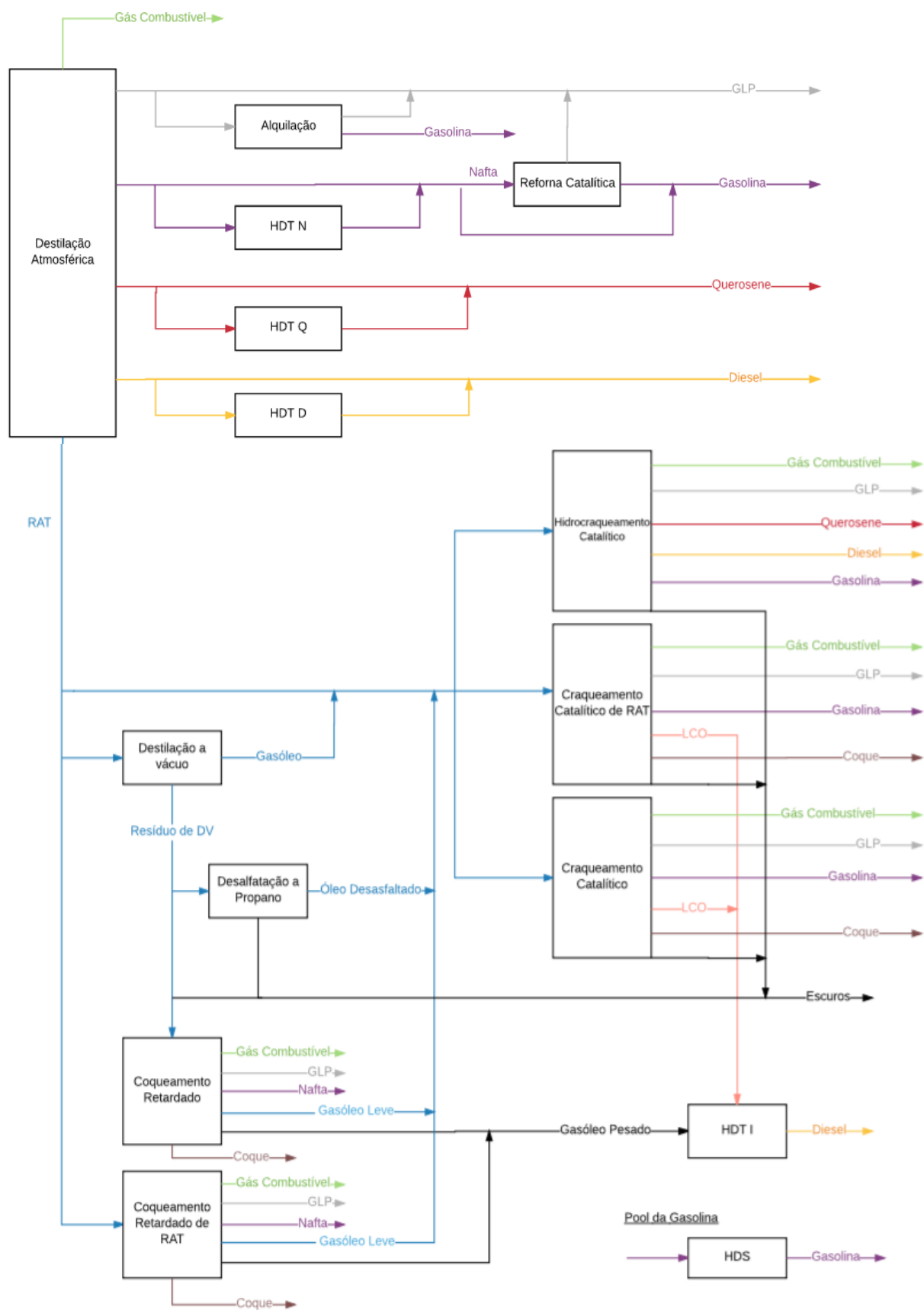


Figura 14: Esquema geral de refino da ferramenta CAESAR

Fonte: Elaboração Própria

Para a simulação do parque de refino é necessário inserir os seguintes dados de entrada no simulador:

I. Capacidades totais e adicionais do parque de refino

Para cada refinaria simulada no CAESAR são inseridas as capacidades de processamento por unidade e por período sendo possível também adicionar novas capacidades nos períodos futuros.

II. Composições das cargas de entrada

Em relação à composição da carga de entrada da refinaria, para cada período simulado é possível definir uma carga específica composta por percentuais de cinco tipos de petróleo diferentes de acordo com a qualidade dos petróleos em produção no Brasil. Para cada tipo de petróleo pode ser definido um grau API e um teor de enxofre, conforme descrito da Tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Tipos de petróleos definidos no CAESAR

Categoria	Nome	° API	Enxofre (ppm)
Petróleo 1	Árabe Leve	33,4	1.8%
Petróleo 2	Bonny Light	37,6	0.13%
Petróleo 3	Leve ¹⁷	40,1	0,18%
Petróleo 4	Mediano RT ¹⁸	24,8	0.61%
Petróleo 5	Pesado ¹⁹	20,3	0.74%
Petróleo 6	Mediano ²⁰	29,3	0.36%

Fonte: Guedes (2015)

III. Campanha

¹⁷ Representado pelo petróleo africano Brass River com 40,1°API, teor de enxofre de 0,18% em massa e rendimentos semelhantes ao do petróleo brasileiro Piranema (ANP, 2013g)

¹⁸ O grupo de petróleos medianos (reservas totais) é representado pelo petróleo brasileiro Barracuda com 24,8°API, teor de enxofre de 0,61% (BARROS, 2014).

¹⁹ Representado pelo petróleo brasileiro Marlim com 20,3°API e teor de enxofre de 0,74% em massa (BARROS, 2014).

²⁰ O grupo mediano adicional é representado pelo petróleo brasileiro Lula, com 29,3°API, teor de enxofre de 0,36% em massa (BARROS, 2014).

É possível definir o tipo de campanha a ser utilizada por cada refinaria dentre as seguintes opções: nafta, diesel ou querosene. Para cada tipo a carga processada difere no percentual de rendimentos dos derivados produzidos na unidade de destilação atmosférica. Nesta unidade, o rendimento também varia de acordo com a composição da carga definida em cada período (GUEDES, 2015).

Na unidade de destilação a vácuo os rendimentos variam apenas com a composição da carga de entrada da refinaria, não importando a campanha escolhida. E as demais unidades consideradas na simulação possuem rendimentos fixos para qualquer campanha escolhida assim como quaisquer composições da carga de entrada (GUEDES, 2015).

IV. Tipo de módulo de UGH

Apesar de algumas unidades de conversão das refinarias produzirem hidrogênio, este não é suficiente para a demanda dos processos de hidrotreatamento. Desta forma torna-se necessária a produção de hidrogênio que é feita através do processo de reforma a vapor nas refinarias brasileiras. Neste processo, os combustíveis possíveis são a nafta ou o gás natural. No CAESAR é possível escolher entre estes dois combustíveis, qual será utilizado para a reforma.

4.1.1. Estimativa de demanda hídrica no CAESAR

Para o cálculo de consumo de água que ocorre em cada refinaria serão utilizados coeficientes de demanda de água por unidade de processo conforme indicados na Tabela 5 e a partir do total obtido é possível calcular a demanda hídrica por refinaria.

Os coeficientes considerados foram o peso de vapor de baixa pressão (VB), vapor de média pressão (VM) e vapor de alta pressão (VA) por barril de petróleo processado que são destinados à demanda de vapor dos processos. Além destes, o volume de água consumido no sistema de resfriamento (CW)²¹ e o volume de água desmineralizada utilizada na caldeira (BFW)²² por barril de petróleo processado, ambos também separados por processo.

²¹ Cooling water (CW)

²² Boiler feedwater (BFW)

Tabela 5: Coeficientes de utilização de água por unidade de processo.

Unidade	CW (m /bbl)	BFW (m /bbl)	VB (kg/bbl)	VM (kg/bbl)	VA (kg/bbl)
UDA	0,3	0,02	-	11,0	-
UDV	0,3	0,05	-	-	-
DSF	1,0	0,05	4,0	-	-
FCC	1,0	0,07	-3,6	20,0	-16,0
RFCC	1,0	0,07	-	-	-18,0
ALQ	7,0	0,05	-	90,0	-
URC	1,7	0,02	-	-	-15,6
CTB	1,0	0,05	-3,6	20,0	-16,0
HCC	5,6	0,02	-	30,0	-
CR	2,0	0,06	-	-18,4	-
HDS G	1,0	0,04	-	-	3,0
HDT N	0,2	0,01	-	-	3,0
HDT Q	0,5	0,18	-	-	4,0
HDT D	0,7	0,04	-	-	4,0
HDT I	0,7	0,05	-	-	5,0
LUB	1,0	0,05	-	-	-
UGH	0,0	0,00	-	-	0,0

Fonte: (VASQUEZ et al., 2016)

Para a adaptação do simulador realizada neste trabalho, não foram incorporadas as demandas de água decorrentes da utilização de água de incêndio e para consumo humano por serem percentuais pequenos em relação à água utilizada para geração de vapor e resfriamento. Entretanto, normas brasileiras para refinarias utilizam periodicamente a água de incêndio durante as simulações do sistema de combate a incêndio, o que pode fazer com que o seu uso aumente sem que haja relação direta com a operação da refinaria assim como sua complexidade (GONDIM, 2014).

A água utilizada durante o processo de dessalgação também foi desconsiderada, pois na maioria das refinarias, a água utilizada neste processo é retificada, proveniente do tratamento de águas ácidas (VANELLI, 2004).

Após a obtenção dos valores de utilização de vapor de água de processo, BFW e CW para cada refinaria, adotaram-se dois valores percentuais para estimativa do volume de água demandado pela refinaria, que é composta pela água de reposição necessária para as torres de

resfriamento, a água de reposição para as caldeiras e a água utilizada em processos. Adotou-se o valor de 3,5% do total de água circulante no sistema de resfriamento das refinarias como a parte que necessita ser reposta, ou seja, que é de fato consumida.

Para a reposição de água das caldeiras utilizou-se o valor de 70% sobre o somatório da quantidade de água utilizada nas caldeiras (BFW) em cada unidade de processo somada ao total de quantidade de vapor consumido nas unidades de processo consideradas na simulação. Define-se como vapor consumido a quantidade de vapor perdido, que não retornou como condensado, cerca de 33% de todo o vapor gerado (VASQUEZ et al., 2016). Desta forma, calculou-se a demanda de água para cada refinaria conforme a equação abaixo:

$$Demanda = \left(0.035 \times \sum CW\right) + \left\{0.7 \times \sum BFW + \left[0.33 \times \sum (VB + VM + VA)\right]\right\}$$

4.2. Análise dos recursos hídricos disponíveis

De acordo com o relatório sobre a crise hídrica da agência nacional de águas o Brasil ainda possui uma grande oferta hídrica. Porém, esta oferta não se dá igualmente por todos os estados. As bacias localizadas em grandes centros urbanos como o sudeste brasileiro atualmente enfrentam baixa disponibilidade de água em conjunto com grandes demandas, o que poderá impor situações de estresse hídrico cada vez mais frequentes (ANA, 2014).

Para a análise de criticidade hídrica das refinarias atuais, utilizou-se o software ArcGIS a fim de localizar as refinarias por bacias hidrográficas (nível I)²³. Dessa forma, foi possível identificar a criticidade hídrica das bacias onde se localizam as refinarias simuladas, de acordo com dois indicadores (Tabela 6).

²³ As bacias hidrográficas correspondem à classificação segundo o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). A base físico-territorial utilizada pelo PNRH segue as diretrizes estabelecidas pela Resolução CNRH nº 30, de 11 de dezembro de 2002 (MMA, 2006a).

Tabela 6: Indicadores de criticidade hídrica.

Tipo de Balanço Hídrico	$\frac{\text{Demanda}}{\text{Disponibilidade}}$ (%)	Enquadramento
	< 5%	Excelente
Demanda Total Anual X	5% a 10%	Confortável
Vazão Média Anual	10% a 20%	Preocupante
Acumulada (Q_m)	20% a 40%	Crítica
	>40%	Muito crítica
	< 5%	Excelente
Demanda Total Anual	5% a 10%	Confortável
X Disponibilidade Mínima	10% a 20%	Preocupante
Anual (Q_{95})	20% a 40%	Crítica
	>40%:	Muito crítica

Fonte: (ANA, 2015b)

O primeiro indicador calcula o balanço hídrico a partir da demanda total função da vazão média anual acumulada e segundo é utilizado pela ANA (2015b) e quantifica em percentual o balanço entre disponibilidade e demanda de recursos hídricos em função da razão entre a vazão de retirada para os usos consuntivos (irrigação, dessedentação, abastecimento urbano e industrial) e a disponibilidade hídrica de cada sub bacia expressa através do valor de vazão com permanência de 95%.

A vazão média anual acumulada refere-se à vazão média (Q_m) da bacia, adicionada à vazão do montante e/ou alguma vazão regularizada pela operação de reservatórios. Entretanto, a vazão média pode não estar disponível em todas as circunstâncias durante um período de tempo. Portanto, a vazão média pode ser substituída por uma relação de vazão com permanência mínima anual de 95% (Q_{95})²⁴. Em rios com regularização a Q_{95} é acrescentada a vazão regularizada.

Esse percentual, ou nível de criticidade, é calculado com base em informações de oferta de água e nas demandas consuntivas em uma determinada sub-bacia. Desta maneira, os indicadores apresentados refletem a situação real de utilização dos recursos hídricos e permite

²⁴ A disponibilidade mínima anual é definida como a vazão alcançada ou excedida 95% do período de tempo.

avaliar quão relevante é a estrutura de gestão requerida na bacia. Quanto maior o índice, maior a complexidade da gestão requerida (ANA, 2015a).

4.3. Simulação da disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas

A disponibilidade hídrica de uma bacia será calculada através da simulação de um balanço hídrico entre as entradas e as saídas de água de uma área de drenagem com o objetivo principal de investigar o grau de comprometimento hídrico de mananciais.

As saídas consideradas neste trabalho são as demandas calculadas para abastecimento público, indústria, irrigação e para criação animal. Essas demandas são extraídas das disponibilidades hídricas da área de estudo e uma parcela é inserida novamente como vazão de retorno. O saldo hídrico restante das demandas retiradas é denominado disponibilidade hídrica bruta, e o saldo hídrico restante ao reconsiderar as vazões de retorno é denominado disponibilidade hídrica líquida.

Para se avaliar a disponibilidade hídrica de uma região define-se uma vazão mínima ecológica que pode ser a $Q_{7,10}$ ou Q_{95} , dependendo do estado onde está localizada a área de drenagem.

Além disso, a simulação do balanço hídrico também permitirá avaliar o comportamento das vazões em pontos de observação ao longo do período simulado entre os anos de 2015 até 2040. Desta forma, pode-se prever a aplicação de políticas públicas de restrição ao uso de água de uma determinada bacia ou sub-bacia hidrográfica.

Neste estudo o balanço hídrico foi simulado com o auxílio do software *Water Evaluation and Planning* (WEAP). Este é uma ferramenta de software para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) desenvolvida pelo Instituto Ambiental de Estocolmo (SEI). O WEAP integra processos físicos hidrológicos com a gestão de demandas e infraestrutura, bem como aspectos ambientais e econômicos do planejamento hídrico. Suas simulações são construídas em função de cenários que podem ser analisados com base em diferentes tendências em hidrologia, uso e demanda de água, demografia, tecnologia, regras de operação e políticas de gestão da água.

O WEAP tem duas funções primárias (SIEBER; PURKEY, 2015):

- Simulação de processos hidrológicos naturais (por exemplo, evapotranspiração, escoamento e infiltração) para permitir a avaliação da disponibilidade de água dentro de uma bacia hidrográfica.

- Simulação de atividades antropogênicas sobrepostas ao sistema natural para influenciar os recursos hídricos e sua alocação (isto é, demanda de água consumidora e não consumidora) para permitir a avaliação do impacto do uso humano da água.

Estas simulações podem ser aplicadas basicamente de três formas: como uma base de dados de abastecimento de um sistema para com o objetivo de gerenciar a distribuição de água; como ferramenta de previsão, o WEAP simula o balanço hídrico e a alocação de recursos; ou como uma ferramenta de análise de políticas de recursos hídricos que avalia opções alternativas de políticas e gerenciamento e contabiliza múltiplos usuários de água concorrentes (SIEBER; PURKEY, 2015).

Para permitir a simulação da alocação de água, os elementos que compõem o sistema de demanda-oferta de água e sua relação espacial são caracterizados para cada bacia considerada. O sistema de oferta é representado em termos das suas várias fontes de água (por exemplo, água de superfície, água subterrânea, dessalinização e elementos de reutilização de água); Retirada, transmissão, reservatórios e instalações de tratamento de águas residuais, enquanto o sistema de demanda abrange basicamente os vários usuários de água de uma bacia. O WEAP define áreas de captação como as áreas nas quais a precipitação ocorrida pode ser utilizada para irrigação ou *runoff* para rios, poços subterrâneos e/ou barragens.

Uma análise WEAP consiste em primeiramente configurar o horizonte temporal, os limites geográficos, os componentes do sistema e a configuração do problema que se deseja avaliar e em seguida o modelo é usado para simular cenários alternativos para avaliar o impacto de diferentes opções de oferta e demanda de água e gestão. O modelo otimiza o uso da água na bacia utilizando um algoritmo de Programação Linear, cujo objetivo é maximizar a água entregue aos locais de demanda, de acordo com um conjunto de prioridades definidas pelo usuário. Todas as demandas recebem uma prioridade entre 1 e 99, sendo 1 a prioridade mais alta e 99 a menor. Quando a água é limitada, o algoritmo é formulado para restringir progressivamente a alocação de água aos locais de demanda que recebem a menor prioridade. Mais detalhes do modelo estão disponíveis em (SIEBER; PURKEY, 2015) e SEI (2001).

Em relação às demandas de água referentes aos diversos usos da terra (áreas agrícolas, pastagens, vegetação, etc.) é possível escolher se todos as demandas dentro de uma mesma

bacia receberão os mesmos dados climáticos ou se cada tipo de demanda pode ter dados climáticos diferentes. Esta segunda opção pode ser necessária se houver uma grande variação na elevação entre os diferentes usos da terra dentro de uma bacia hidrográfica.

Alternativamente, a bacia hidrográfica poderia ser dividida em várias áreas de captação de acordo com a elevação, de modo que o clima dentro de cada bacia não varie pelo uso da terra.

O WEAP disponibiliza cinco métodos para simular processos de captação como evapotranspiração, escoamento, infiltração e demanda de irrigação. Estes métodos incluem (SIEBER; PURKEY, 2015):

- I. *Irrigation Demands Only versions of the Simplified Coefficient Approach*: Este é o método mais simples que utiliza apenas coeficientes de colheita para calcular a evapotranspiração potencial na bacia e, em seguida, determina qualquer demanda de irrigação que possa ser necessária para cumprir a parte da exigência de evapotranspiração que a precipitação não pode atender. Ele não simula processos de escoamento ou infiltração, ou mudanças na umidade do solo.
- II. *Rainfall Runoff Method*: também determina a evapotranspiração para culturas irrigadas utilizando coeficientes de cultura, o mesmo que no método de Demanda de Irrigação somente. O restante da precipitação não consumida pela evapotranspiração é simulado como escoamento para um rio ou para a água subterrânea através de ligações de escoamento / infiltração.
- III. *Soil Moisture Method*: é um método mais complexo que representa a bacia através de duas camadas de solo. Na camada superior do solo, é simulada a evapotranspiração considerando a precipitação e a irrigação em terras agrícolas e não-agrícolas, escoamento superficial e mudanças na umidade do solo. Este método permite caracterizar os impactos do uso da terra e / ou do tipo de solo para esses processos. O encaminhamento do fluxo base para o rio e as alterações de umidade no solo são simuladas na camada inferior do solo. Correspondentemente, o método de umidade do solo requer uma parametrização mais extensa do solo e do clima para simular esses processos.

- IV. *MABIA Method*: é uma simulação diária de transpiração, evaporação, requisitos de irrigação e programação, crescimento e rendimento de culturas e inclui módulos para estimar a evapotranspiração de referência e a capacidade de água no solo. Requer dentre outros dados climatológicos, o valor de coeficiente de cultura (K_c) que é dividido em um coeficiente de cultura "basal" (K_{cb}) e uma componente separada, representando a evaporação da superfície do solo (K_e). O coeficiente de cultura basal representa as condições reais de evapotranspiração quando a superfície do solo está seca, mas existe suficiente umidade da zona da raiz para suportar a transpiração total.
- V. *Plant Growth Method*: simula o crescimento de plantas, uso de água e rendimento usando período de tempo diário. Geralmente é utilizado como um método para estudar os impactos da concentração atmosférica alterada de CO_2 , do estresse de temperatura, da variabilidade do comprimento da estação, e do estresse de água no uso da água da planta e nos rendimentos de colheita. Requer a especificação de parâmetros que controlam a taxa de desenvolvimento da planta e o uso da água.

A escolha do método depende do nível de complexidade desejado para representar os processos de captação e da disponibilidade de dados.

O método de balanço hídrico escolhido foi o *simplified coefficient Method - Rainfall Runoff* no qual os requerimentos de água são calculados a partir de dados de evapotranspiração de referência e precipitação. Esta escolha se deve à disponibilidade dos dados para a área escolhida para o estudo.

4.3.1. Delimitação da área de estudo

A primeira etapa para simulação de um balanço hídrico no WEAP é a definição espacial da área de estudo que é tipicamente uma bacia hidrográfica composta por um conjunto de pontos de demanda definidos por limites políticos ou geográficos.

As áreas de estudo podem ser pensadas como representando bancos de dados separados nos quais diferentes conjuntos de dados de oferta e demanda de água são armazenados, gerenciados e analisados.

Nesta etapa são carregados mapas provenientes de sistemas de informação geográfica (SIG) das áreas a serem estudadas. Estes mapas contêm todos os pontos de interesse a serem analisados no estudo. Isto é, desde as limitações geográficas da área, rios e seus afluentes até pontos de captação de água, localização de reservatórios, estações pluviométricas, estações fluviométricas, além de delimitação da área dos diversos tipos de usos da terra a serem considerados.

Neste trabalho foi utilizado o *software* ArcGIS Desktop 10.3.1, no qual foi possível georreferenciar todos os pontos de interesse utilizados no trabalho assim como delimitar a bacia hidrográfica analisada e seus principais rios. Todos os mapas foram projetados em coordenadas geográficas com *Datum World Geodesic System* 1984 (WGS 84), que é o Datum utilizado pelo WEAP.

Adicionalmente, a delimitação da área das bacias analisadas foi baseada nos mapas de Base Hidrográfica Ottocodificada (BHO) que são utilizados pela ANA na gestão de recursos hídricos e obtidos a partir do Mapeamento Sistemático Brasileiro (ANA, 2007a). A BHO é gerada a partir da cartografia digital da hidrografia do país e organizada de modo a gerar informações hidrológicamente consistentes. Para tanto, a BHO representa a rede hidrográfica em trechos entre os pontos de confluência dos cursos d'água de forma unifilar.

Ottobacias são áreas de contribuição dos trechos da rede hidrográfica codificadas segundo o método de Otto Pfafstetter para classificação de bacias. Este método consiste na codificação numérica de bacias hidrográficas, considerando como insumo principal as áreas de contribuição direta de cada trecho da rede hidrográfica. Quanto maior o nível, maior o número de sub-bacias consideradas na classificação.

Esta delimitação por ottobacia foi escolhida devido a sua representação ser topologicamente consistente, isto é, representar corretamente o fluxo hidrológico dos rios, por meio de trechos conectados com sentido de fluxo.

Os mapas ottocodificados disponibilizados pela ANA estão referenciados no sistema de coordenadas geográficas SAD69 e portanto foram projetados para o WGS84 antes de serem carregados no WEAP.

4.3.2. Dados climatológicos

Os dados climatológicos necessários para o método *Rainfall Runoff* são precipitação, evapotranspiração de referência de culturas e o coeficiente de culturas.

Em relação aos dados de precipitação, tanto para os dados faltantes quanto para os *outliers* foi utilizado o método das médias ponderadas ou método das razões dos valores normais. Este método é baseado na suposição de que o dado de precipitação faltante de uma determinada estação é proporcional aos dados disponíveis para o mesmo dia ou mês de estações vizinhas. Sendo assim, a estimativa de precipitação do dado faltante para um mês é calculada como:

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

Onde:

P_x = Dado faltante de precipitação

n = Número de estações pluviométricas

N = Precipitação média anual do período das séries históricas

N_1, N_x = Precipitação anual das estações usadas como parâmetro de cálculo

P_1, P_n = Precipitação mensal das estações usadas como parâmetro de cálculo

Ademais, os dados climáticos são observações pontuais e precisam ser transformados em dados correspondentes a determinadas áreas de uma bacia antes de serem integrados e utilizados em um modelo hidrológico. Existem vários métodos para calcular os dados de distribuição de chuvas. O método mais simples é a média aritmética que dá a cada estação dentro da bacia um peso igual (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Outro método, conhecido como polígonos de Thiessen, que subdivide a área da bacia em áreas delimitadas por vários polígonos que representam, cada um, apenas um posto de medição e cada estação recebe um peso pela área que representa em relação à área total da bacia (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

E por fim, a terceira opção é a análise através da utilização de isoietas, que são linhas representando áreas de precipitação iguais sobre uma bacia com base nas medições obtidas de cada estação pluviométrica. Em seguida calculam-se as áreas parciais contidas entre duas isoietas sucessivas e a precipitação média em cada área parcial, que é determinada fazendo-se a média dos valores de duas isoietas (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

O método escolhido foi o das isoietas. Para isto, as estações pluviométricas consideradas são primeiramente georreferenciadas através do software ArcGIS e em seguida são incluídas as tabelas de dados de precipitação média anual de cada uma delas para desta forma ser possível construir as curvas de níveis. A precipitação média da bacia é determinada pela equação:

$$P_x = \frac{A_1 \times P_1 + A_2 \times P_2 + \dots + A_n \times P_n}{A}$$

Onde:

A_1 = Área representativa da isoietas

P_1 = Precipitação média da isoietas

A = Área total da bacia

Após a definição das isoietas é necessário escolher uma estação representativa de cada área de captação e compará-la ao valor médio de precipitação obtido na isoietas. Caso ocorram valores distintos, calcula-se a razão entre o valor de precipitação média anual da estação escolhida como representativa e valor da isoietas que é utilizada como fator de correção dos dados de precipitação das estações pluviométricas consideradas no balanço hídrico.

4.3.3. Identificação das demandas de água

As demandas consideradas para simulação do balanço hídrico são:

I. Demanda urbana

O cálculo desta demanda é feito a partir do coeficiente de volume de água consumido por pessoa em um ano.

Para a projeção de crescimento populacional das cidades que utilizam recursos hídricos das bacias inseridas no estudo, utilizaram-se o método logístico e o método de projeção da participação no crescimento com base nos três últimos censos demográficos referentes aos anos de 1991, 2000 e 2010 (IBGE, 1991, 2000, 2013).

No método logístico o crescimento populacional segue uma relação matemática que estabelece uma curva em forma de S definida através da Equação 1, que mostra a taxa percentual de crescimento proporcional à população residual. A população tende assintoticamente a um valor de saturação definido na Equação 2.

$$\frac{dP}{dt} = k \times P \left(\frac{P_s - P}{P} \right)$$

Equação 1: Método logístico

$$P_s = \frac{2 (P_0 \times P_1 \times P_2) - P_1^2 (P_0 + P_2)}{(P_0 \times P_2 - P_1^2)}$$

Equação 2: População de saturação

Onde:

$$k = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \ln \left[\frac{P_0 (P_s - P_1)}{P_1 (P_s - P_0)} \right]$$

P_0 = População no censo de 1991

P_1 = População no censo de 2000

P_2 = População no censo de 2010

P_s = População de Saturação

Para que seja possível aplicar este método, os dados obtidos precisam atender as seguintes condições:

- i. $P_0 < P_1 < P_2$
- ii. $P_0 \times P_2 < P_1^2$

iii. Os dados obtidos devem se referir a épocas equidistantes²⁵

O método de projeção da participação no crescimento, ou método AiBi, foi aplicado para as cidades nas quais as condições acima mencionadas não foram atendidas. Este método é o AiBi é o método utilizado pelo IBGE para projetar a população total dos municípios brasileiros e ambasa-se na premissa de que a população de um município pequeno se comporta de forma linear em relação a população de um município maior ou em relação ao estado o qual está localizado (BRITO; CAVENAGHI; JANNUZZI, 2010).

Seu cálculo se baseia na diferença relativa entre a população dos municípios e a do estado em dois períodos no passado, desta forma é calculada a participação relativa de cada município no crescimento do estado (BRITO; CAVENAGHI; JANNUZZI, 2010).

Esta proporção calculada é multiplicada pelo crescimento absoluto do estado no período que se deseja projetar, resultando no crescimento esperado para cada município, que somado à população do período base, resultará na população projetada. A equação utilizada para projetar a população de um município no período t é a seguinte:

$$P_{i,t+n} = A_i \times P_{j,t+n} + B_i$$

Onde:

$P_{i,t+n}$ = População do município a ser projetada

$P_{j,t+n}$ = População projetada do estado onde se encontra o município no ano t + n

A_i = coeficiente de proporcionalidade entre o crescimento do município e da área maior

$$A_i = \frac{(P_{i,t} - P_{i,0})}{(P_{j,t} - P_{j,0})}$$

B_i = Coeficiente linear de correção

$$B_{i,t} = P_{i,t} - A_i \times P_j$$

²⁵ Neste caso, consideraram-se os dados obtidos no censo de 1991 como referentes ao ano de 1990

Após o cálculo do número de habitantes em cada município, é possível estimar a demanda de água para abastecimento urbano a partir de um valor de consumo de água per capita que varia de acordo com o padrão de consumo de cada região e deve ser observado separadamente, para cada área estudada. O percentual de área é utilizado nos casos em que existam municípios que não pertençam integralmente a área de estudo. Para esta variável atribui-se o valor correspondente ao percentual da área do município que está inserido na região analisada.

Demanda abastecimento urbano

$$= N^{\circ} \text{ habitantes} \times \text{consumo de água per capita} \times \% \text{ Área}$$

II. Demanda Industrial

Os consumos de água industrial mais relevantes devem ser registrados nos órgãos ambientais competentes que concedem outorga para uso de água para este fim. Sendo assim, para a estimativa desta demanda é possível consultar o volume de água outorgado por indústria. No caso das refinarias, o volume a ser utilizado é o volume de demanda de água calculado pela simulação descrita no item 4.1.1.

III. Demanda para irrigação

A demanda de água para irrigação consiste em fornecer água a uma cultura nos casos em que o aporte pluviométrico é insuficiente para atender totalmente às suas necessidades hídricas.

A demanda de irrigação é calculada multiplicando-se a área de cultivo pela diferença entre a necessidade hídrica da cultura e a precipitação ocorrida sobre a área cultivada. Para isto, é necessário o conhecimento da demanda de água requerida pelas culturas que neste trabalho é calculada a partir da evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultura.

A evapotranspiração é definida como sendo o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo, da vegetação úmida e por transpiração das plantas. Ela pode ser classificada como evapotranspiração de referência, potencial e real (FREITAS; BEZERRA; FONTENELE, 1999).

A evapotranspiração de referência representa o valor de evapotranspiração de uma área totalmente coberta por vegetação rasteira, em crescimento ativo e sem restrição hídrica. Nesse caso, depende-se apenas das variáveis meteorológicas que determinam o potencial de evapotranspiração (FREITAS; BEZERRA; FONTENELE, 1999).

A evapotranspiração potencial, ou máxima de uma cultura, representa a máxima perda de água que uma cultura sofre em um determinado estágio de desenvolvimento, quando a mesma não é submetida a qualquer tipo de restrição de água no solo. Ela é definida relacionando-a a evapotranspiração de referência através de um coeficiente de cultura (FREITAS; BEZERRA; FONTENELE, 1999).

A evapotranspiração real é a evapotranspiração nas mesmas condições de contorno que a evapotranspiração potencial, com ou sem restrição hídrica. Desta forma, seu valor pode ser igual ou menor que a evapotranspiração potencial.

Além da evapotranspiração e coeficiente de cultura também é necessário identificar a área de diferentes culturas dentro da área de captação definida.

No WEAP, para calcular a necessidade de água para irrigação, calcula-se primeiramente a precipitação disponível para evapotranspiração assim como a evapotranspiração potencial de cultura, que são calculadas da seguinte forma:

$$P_{evap} = P_{\text{área}} \times \text{Área} \times E_p$$

P_{evap} = Precipitação disponível para evapotranspiração

$P_{\text{área}}$ = Precipitação média na área de captação

Área = Área de captação

E_p = Percentual da precipitação que poderá ser usado para a evapotranspiração

$$ET_p = ET_{ref} \times K_c \times \text{Área}$$

ET_p = Evapotranspiração Potencial de cultura

ET_{ref} = Evaporação de referência de cultura

K_c = Coeficiente de cultura

Área = Área de captação

A necessidade de irrigação é calculada então a partir da diferença entre o valor da evapotranspiração potencial das culturas da área de estudo e da quantidade de precipitação disponível de acordo com a equação a seguir:

$$Demanda\ de\ irrigação = \max(0, ET_p - P_{evap})$$

No método *Rainfall Runoff*, a água que segue como *runoff* para as áreas de captação pode ser descrita pelas equações abaixo, que representam o excesso de água que não foi utilizado pelas culturas. O *runoff* pode ser direcionado para o abastecimento de águas subterrâneas ou águas superficiais. Para isto, utiliza-se um valor percentual.

$$Runoff = \max(0, P_{evap} - ET_p)$$

Runoff = Fração da precipitação que escoar para a área de captação

$$Runoff_{GW} = \sum (Runoff \times Runoff_{\%GW})$$

Runoff_{GW} = Fração de escoamento para abastecimento de águas subterrâneas

Runoff_{%GW} = Percentual escoamento para abastecimento de águas subterrâneas

$$Runoff_{SF} = \sum (Runoff \times Runoff_{\%SF})$$

Runoff_{SF} = Fração de escoamento para abastecimento de águas superficiais

Runoff_{%SF} = Percentual escoamento para abastecimento de águas superficiais

IV. Demanda para dessedentação animal

O consumo de água pode ser calculado a partir de dados de número de animais por cidade disponibilizado pelo IBGE e em seguida calcular o produto do número efetivo dos rebanhos por um coeficiente per capita de consumo de água diário que é denominado como

Bovinos Equivalentes para a Demanda de Água – BEDA. A estimativa da demanda para criação animal foi realizada através da metodologia apresentada no Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil – PLIRHINE desenvolvida pela Superintendência De Desenvolvimento Do Nordeste (SUDENE, 1998).

Esta metodologia utiliza o produto do número efetivo dos rebanhos por um coeficiente per capita diário que é denominado como Bovinos Equivalentes para a Demanda de Água – BEDA, no qual o consumo de água de cada espécie animal é ponderado em relação a demanda de água de um bovino conforme Tabela 7.

Considera-se a demanda de um bovino igual a 50 litros por dia, ou seja, BEDA é igual a 50l/dia.

Tabela 7: Demanda de água por tipo de bovino

Tipo de Rebanho	BEDA	Demanda per capita (l/dia.BEDA)
Bovinos	$\frac{BEDA}{1}$	50
Bubalinos	$\frac{BEDA}{1}$	50
Equinos, Muares e Asininos	$\frac{BEDA}{1,25}$	40
Suínos	$\frac{BEDA}{5}$	10
Ovinos e Caprinos	$\frac{BEDA}{6,25}$	8
Coelhos	$\frac{BEDA}{200}$	0.25
Avinos	$\frac{BEDA}{250}$	0.20

Fonte: Adaptado de (ANA, 2005)

Assim como no cálculo da demanda de água para abastecimento urbano, um percentual de área também foi aplicado. Desta forma, a demanda de água consumida por animal é calculada conforme a equação abaixo:

$$Demanda\ dessedentação\ animal = N^{\circ}\ de\ cabeças \times BEDA_{equivalente} \times \% \ Área$$

4.3.4. Outros pontos de interesse

São reservatórios para abastecimento urbano ou barragens utilizadas como reguladoras de vazão. Para cada um é preciso obter dados sobre vazão regulada a jusante além de sua capacidade, seu ano de construção e quaisquer restrições relacionadas a vazão permitida de saída por um período mensal.

4.3.5. Requisito Mínimo de Fluxo

Este requisito define o fluxo mensal mínimo necessário ao longo de um rio para atender a qualidade da água, peixes e vida selvagem, navegação, recreação, vazões necessárias a jusante do rio, além de outros possíveis requisitos como, por exemplo, vazões limites para adoção de medidas de restrições de demanda de água como uma política de gerenciamento de recursos hídricos. Dependendo da sua prioridade de demanda, uma exigência de fluxo será satisfeita antes, depois ou ao mesmo tempo que outras exigências sobre o rio.

4.3.6. Calibragem do cenário de linha de base

No WEAP é possível inserir os dados de vazões observadas nas estações fluviométricas. Desta forma, o mapa com as estações georreferenciadas é inserido no modelo para que seja possível identificar corretamente a altura das medições. Após todos parâmetros climáticos, dados sobre uso da terra e demandas de água serem inseridos no modelo, são feitas rodadas nas quais se comparam os valores observados das estações fluviométricas com os dados de vazão modelados pelo WEAP.

A partir dos dados de vazões observadas e simuladas são calculados dois índices de calibragem conforme sugerido pelo manual do programa WEAP. Estes índices são o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe e o índice BIAS.

O coeficiente de eficiência do modelo de *Nash-Sutcliffe* é comumente utilizado para avaliar o poder preditivo dos modelos hidrológicos e é definido pela equação:

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

Onde:

E = Coeficiente de Nash-Sutcliffe

$Q_{s,i}$ = Vazão simulada em um período

$Q_{o,i}$ = Vazão observada em um período

$\bar{Q}_o$ = Média da vazão observada no período considerado

n = número de anos analisados

i = número de anos analisados

De acordo (PEREIRA et al., 2016) o valor de $E = 1$ significa ajuste perfeito dos dados preditos pelo modelo; $E > 0,75$ (modelo é adequado e bom); $0,36 < E < 0,75$ o modelo é considerado satisfatório e $E < 0,36$ o modelo não é satisfatório. O coeficiente de eficiência é sensível a valores extremos e pode resultar em resultados sub-ótimos quando o conjunto de dados contém grandes outliers nela.

O índice BIAS é definido pela equação:

$$P_{BIAS} = 100 \times \left[\frac{(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o)}{\bar{Q}_o} \right]$$

Onde:

P_{BIAS} = Valor percentual do índice BIAS

$\bar{Q}_s$ = Média das vazões simuladas no período considerado

$\bar{Q}_o$ = Média das vazões observadas no período considerado

O P_{BIAS} é o valor percentual de viés das vazões simuladas em relação às vazões observadas. Quanto mais próximo de zero for este valor, melhor o modelo representará a realidade, isto é, menor a tendência nas estimativas. Para valores de $|P_{BIAS}| < 10\%$, o modelo é considerado muito bom; entre valores de $10\% < |P_{BIAS}| < 15\%$, o modelo é bom; $15\% < |P_{BIAS}| < 25\%$, o modelo é satisfatório e $|P_{BIAS}| > 25\%$, o modelo é inadequado (MORIASI et al., 2007).

5. Premissas, Estudo de Caso e Resultados

5.1. Simulação no CAESAR

A análise foi realizada para as refinarias brasileiras com capacidade de processamento primário acima de 20 mil barris por dia, excluindo-se, portanto, as refinarias Riograndense, Manguinhos, Dax Oil e Univen assim como as refinarias ou trens de refino destinados prioritariamente à produção de lubrificantes (LUBNOR e o trem de lubrificantes da REDUC).

A Simulação foi realizada utilizando-se o período entre 2010, como ano base, e 2050, com intervalos de 10 anos, representados por P01, P02, P03, P04 e P05. Os dados de entrada inseridos são:

I. Capacidades totais e adicionais do parque de refino

A Tabela 8 apresenta as capacidades utilizadas por unidade de processo de cada refinaria.

Tabela 8: Capacidade Total (m³/d) por refinaria e unidade de processamento

Refinarias	UDA	UDV	DSF	FCC	RFCC	ALQ	CR	CTB	HCC	URC	HDS G	HDT N	HDT Q	HDT D	HDT I	LUB	UGH
RPCC	6,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RPBC	27,500	12,900		10,000		1,000.0	2,500			4,200	6,000	2,600			16,000		2,870,000
RNEST	18,300									11,900		3,000			13,000		300000
RLAM	44,500	20,000		6,000	14,000						10,200				11,000	800	1,360,000
REVAP	40,000	20,000	6,800	14,000						5,000	6,000	6,500					280,000
REPLAN	66,000	31,000		16,000			3,000			12,500	8,800	6,600			22,000		3,750,000
REPAR	33,000	15,000	5,100	10,500			1,000			5,000	5,000	3,000		6,000	6,000		1,870,000
REMAN	7,600	1,100			600		800	1,500			1,500				2,500		400,000
REGAP	24,000	14,000		6,800						3,800			3,600	2,600	8,300		1,790,000
REFAP	32,000	6,000		3,400	7,400					2,600	5,000			6,000	11,500		1,800,000
REDUC	38,500	18,200	6,800	7,500			1,900			5,000	5,000	2,000	1,800	3,000	12,000	5,600	2,267,000
RECAP	8,500				3,100						2,000				4,000		550,000

Fonte: Guedes (2015)

UDA: Unidade de Destilação Atmosférica; UDV: Unidade de destilação a vácuo; DSF: Unidade de Desasfaltação à propano; FCC: Fluid Catalytic Cracking (Unidade de Craqueamento Catalítico); RFCC: Resid Fluid Catalytic Cracking (Unidade de Craqueamento Catalítico de Resíduos); ALQ: Unidade de Alquilação; CR: Unidade de Coqueamento Retardado; CTB: Craqueamento Térmico Brando; HCC: Unidade de Hidrocaqueamento; UCR: Unidade de Reforma Catalítica; HDS G: Unidade de Dessulfurização de Gasolina; HDT N: Unidade de Hidrotratamento de Nafta; HDT Q: Unidade de Hidrotratamento de Querosene; HDT D: Unidade de Hidrotratamento de Diesel; HDT I: Unidade de Hidrotratamento de Instáveis; LUB: Lubrificantes; UGH: Unidade de Geração de Hidrogênio

II. Composições das cargas de entrada

A composição escolhida para a simulação seguiu a análise feita por Guedes 2014 (Tabela 9) na qual para o primeiro período foi composta majoritariamente por correntes medianas e pesadas e a partir do segundo período a composição da carga utilizada para a simulação das refinarias foi uma composição das correntes Mediano, Mediano RT, Pesado e Bonny Light. Esta escolha está de acordo com a tendência da produção brasileira influenciada pelas correntes de pré-sal e diminuição do refino de petróleo importado (ANP, 2017). De acordo com Goldemberg (2014), a média esperada do grau API processado no Brasil deve variar entre 25 e 30 até 2030 (GOLDEMBERG et al., 2014).

Em 2016, 31% da produção nacional foi do petróleo Lula com 31° API, teor de enxofre de 0,324%, (representada pela corrente mediana) cuja produção cresceu 7% em relação ao ano anterior.

Tabela 9: Composição de cargas da simulação do CAESAR (% em base mássica)

Petróleo	P01	P02	P03	P04	P05
Árabe Leve	5	5	5	5	5
Bonny Light	0	0	0	0	0
Leve	0	5	5	5	5
Mediano RT	44	30	30	30	30
Pesado	51	18	17	17	17
Mediano	0	42	43	43	43

Fonte: Guedes (2015)

III. Campanha

O Diesel foi escolhido para ser a campanha do segundo período até o quinto período, a gasolina (Nafta) foi o combustível escolhido para a campanha do primeiro período apenas. Isto se deve a tendência de aumento da demanda do Diesel, principalmente no setor de transportes e diminuição da demanda da gasolina, de acordo com o Plano Decenal de Energia de 2026 (MME/EPE, 2017).

IV. Tipo de UGH

Nesta simulação o gás natural foi escolhido como fonte de geração de hidrogênio em todos os períodos por ser o combustível mais comum utilizado pelas refinarias brasileiras. Entretanto, para os cálculos de consumo de água não existe variação entre estas duas opções no simulador.

Os resultados da simulação foram, então, cotejados aos dados reais disponíveis de balanços hídricos da REPLAN, RLAM, RPBC, REVAP, REGAP, REDUC, REPAR e REFAP (VANELLI, 2004; LAZZARINI CONSULTORIA AMBIENTAL, 2005; NOGUEIRA, 2007; CETESB, 2011; ANZE, 2013). Devido à falta de dados específicos por refinaria, utilizou-se a premissa de que todas as plantas utilizam a tecnologia de resfriamento fechado com torre úmida, sem ventilação artificial. Desta forma, estimou-se a demanda hídrica por refinaria para cada um dos períodos analisados.

Com base na simulação realizada no CAESAR para as refinarias em operação foram encontrados os indicadores específicos para cada planta. Eles encontram-se na Tabela 10 a seguir e apresentam uma média de 118 kg água/bbl de petróleo processado. A RPBC possui o maior coeficiente, com 180 kg água/bbl de petróleo processado. Já a RPCC possui o menor coeficiente, com 25 kg água/bbl de petróleo processado devido a sua baixa complexidade.

Tabela 10: Demanda de água por refinaria

Refinaria	UDA (kbbbl/d)	Coeficiente hídrico (kg/bbl)	Demanda de água (m ³ /s)	Demanda segundo referências bibliográficas (m ³ /s)	Desvio %
REPLAN	415	135	0,65	0.60	8%
RLAM	280	71	0,23	0.28	-17%
REVAP	255	118	0,35	0.38	-9%
REDUC	245	153	0,44	0.47	-8%
REPAR	210	146	0,36	0.33	7%
REFAP	205	132	0,31	0.36	-14%
RPBC	170	174	0,34	0.39	-13%
REGAP	155	133	0,24	0.24	-2%
RECAP	55	109	0,07	n/a	-
REMAN	50	74	0,04	n/a	-
RPCC	40	25	0,01	n/a	-
RNEST	115	58	0,08	n/a	-

Fonte: Elaboração Própria

Os resultados de demanda de água obtidos na simulação foram em seguida utilizados como um dos parâmetros de entrada do balanço hídrico realizado no estudo de caso.

5.2. Avaliação da Disponibilidade Hídrica

Para o cálculo de ambos os indicadores, os dados a respeito das vazões médias anuais acumuladas das sub bacias de interesse foram obtidos através de em cadernos específicos sobre as regiões hidrográficas brasileiras disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d, 2006e, 2006f, 2006g). Na Tabela 11 se encontram os resultados dos indicadores I e II assim como suas classificações.

Tabela 11: Criticidade hídrica das bacias onde se localizam as refinarias brasileiras

Refinaria	Região hidrográfica (RH)	Bacia (Nível I)	$\frac{\text{Demanda Anual}}{Q_m}$ (%)	Classificação indicador (1)	$\frac{\text{Demanda Anual}}{Q_{95}}$	Classificação indicador (2)
REPLAN	Paraná	Tietê	25	Preocupante	64	Muito Crítico
RECAP						
REPAR		Iguaçu	1	Excelente	5	Confortável
RLAM	Atlântico Leste	Itapecuru-Paraguaçu	10	Preocupante	23	Crítico
REMAN	Amazônica	Negro	<0,1	Excelente	--	--
REFAP	Atlântico Sul	Guaíba	2	Excelente	15	Preocupante
REVAP	Atlântico Sudeste	Paraíba do Sul	2	Excelente	13	Preocupante
REDUC		Litoral RJ	18	Preocupante	101	Muito crítico
RPBC		Litoral SP	10	Preocupante	110	Muito crítico
RPCC	Atlântico Nordeste Oriental	Litoral RN – PB	21	Crítico	--	--
RNEST		Litoral AL-PE-PB	64	Muito crítico	--	--
REGAP	São Francisco	São Francisco Alto	5	Confortável	14	Preocupante

Fonte: Elaboração Própria, baseado em (MMA, 2006a, 2006b, 2006c, 2006d, 2006e, 2006f, 2006g)

Conforme ilustrado na Figura 15 e Figura 16, a grande maioria das refinarias estão localizadas em bacias hidrográficas que já apresentam situação crítica de disponibilidade de recursos hídricos.

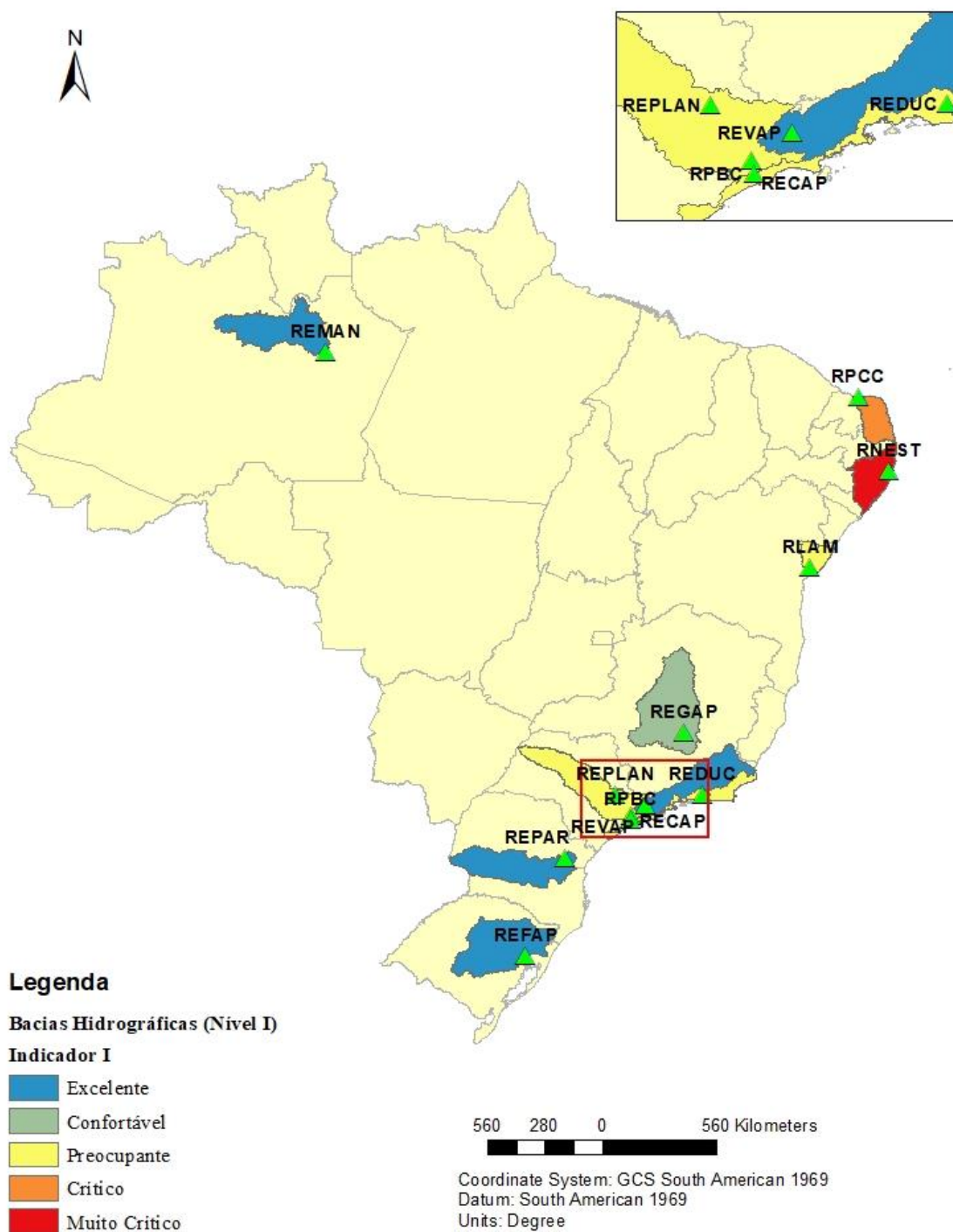


Figura 15: Localização das refinarias em função da disponibilidade hídrica (Indicador I)

Fonte: Elaboração Própria

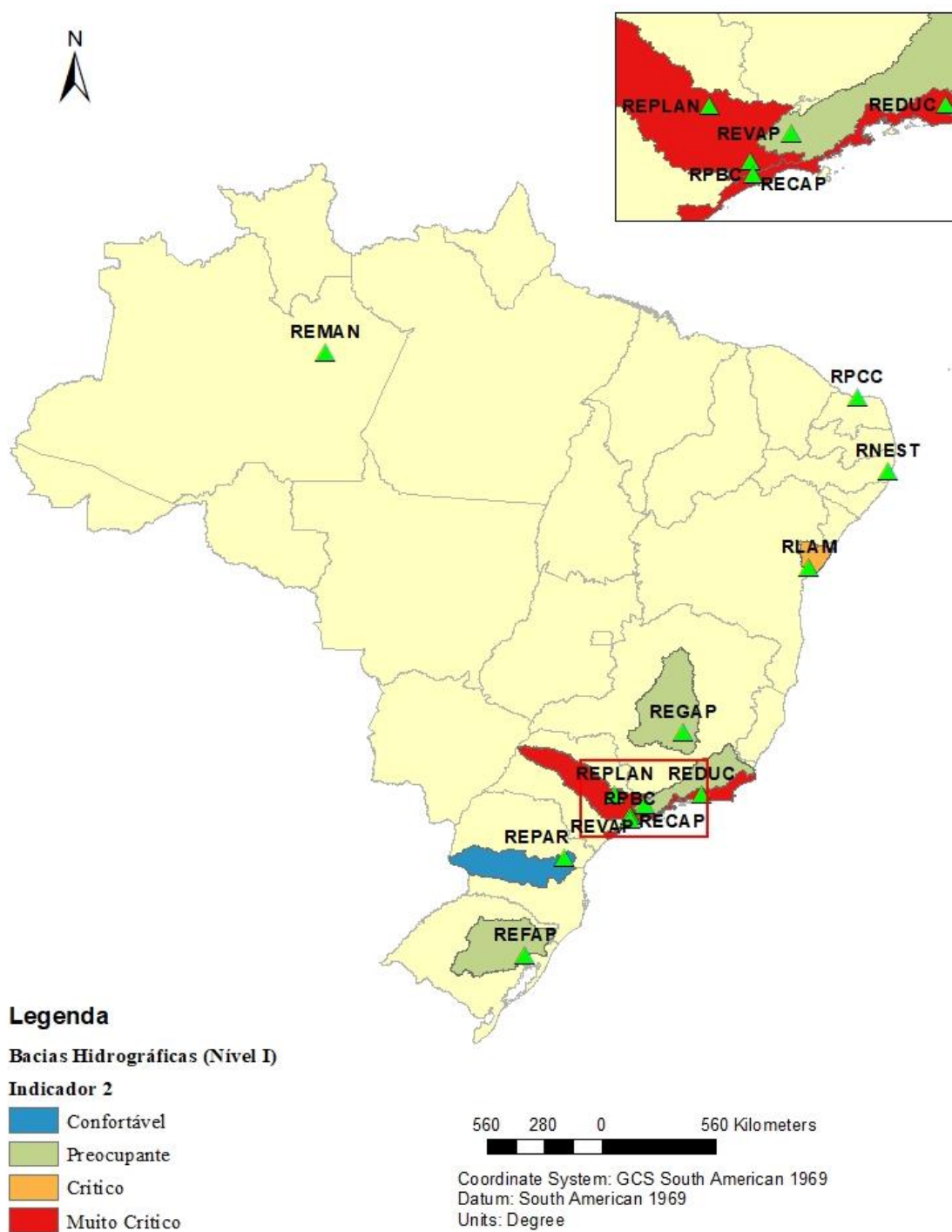


Figura 16: Localização das refinarias em função da disponibilidade hídrica (Indicador II)

Fonte: Elaboração Própria

As plantas da REPAR, REMAN, REFAP e REVAP indicam uma situação “Excelente” no indicador (1), e a REGAP, uma situação “Confortável”. Já essas mesmas plantas encontram-se em uma situação “Preocupante”, de acordo com o indicador (2). Ademais, a classificação do indicador (1) sugere que as bacias de Tietê (REPLAN e REPAR), Litoral RJ (REDUC), Litoral SP (RPBC) e Itapecuru-Paraguaçu (RLAM) estão em situação “Preocupante”. Já em relação ao indicador (2), as bacias encontram-se em situação “Muito Crítica”, à exceção do Itapecuru-Paraguaçu que possui uma situação “Crítica”.

As bacias de Litoral RN – PB (RPCC) e Litoral AL-PE-PB (RNEST), ambas localizadas na RH Nordeste Oriental, possuem o indicador (1) com situação de “Crítica” e “Muito Crítica”, respectivamente. Esse nível de criticidade deve-se à pouca disponibilidade natural dos rios, e não pela pressão na demanda. Esta RH é caracterizada por ter baixa precipitação concentrada, altas temperaturas e evaporação durante o ano, parte importante da região com subsolo com pouca capacidade de armazenamento de água e, quando existe, muitas vezes, é salino (MMA, 2006b).

A RECAP, localizada na bacia do alto tietê, está inserida em uma região que abriga mais de 15 milhões de habitantes e um grande complexo industrial. Esta bacia foi classificada em relação a criticidade hídrica como preocupante e muito crítica nos indicadores I e II, respectivamente. De acordo com o relatório de situação da bacia do alto tietê, esta região é a mais crítica do estado de São Paulo, sua vazão superficial necessita ser complementada por reversões e os aquíferos já apresentam exploração com outorgas que superam o limite ideal estabelecido em 50% da $Q_{7,10}$ (HESPANHOL, 2002; FABHAT, 2017).

A mesma situação ocorre com a RPBC, situada na bacia da Baixada Santista, apresenta disponibilidade de 48,4% da $Q_{7,10}$, conforme calculado nos indicadores I e II desta dissertação e, portanto, a classificam igualmente em situação preocupante e muito crítica.

A REPLAN, localizada na bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), também apresentou classificações preocupante e muito crítica em relação a disponibilidade de água.

A REDUC capta água dos rios Guandu e Saracuruna, inseridos na região hidrográfica da baía da Guanabara. Devido a retirada de água intensiva para abastecimento urbano somada ao lançamento de efluentes sem tratamento, esta região se encontra em nível avançado de degradação da qualidade de água como também de sua disponibilidade (SCHOR, 2006). Os indicadores de criticidade apresentaram classificação preocupante (indicador I) e muito crítica (indicador II) para esta refinaria.

Já a REGAP apresentou classificação confortável no indicador I, porém preocupante no indicador II, a refinaria está localizada na bacia do rio Paraopeba, a qual encontra-se em situação de escassez hídrica devido principalmente a captação de água para abastecimento urbano (IGAM, 2015).

5.3. Estudo de Caso: A Refinaria de Paulínia

A REPLAN foi escolhida por ser a maior refinaria brasileira em capacidade de processamento, cerca de 415 mil barris por dia, e sua produção de combustíveis energéticos ser de significativa importância para o abastecimento do país. A produção de gasolina A corresponde a 20,3% de toda a produção brasileira, a de óleo diesel corresponde a 21,6% e QAV 17,1% conforme Figura 17.

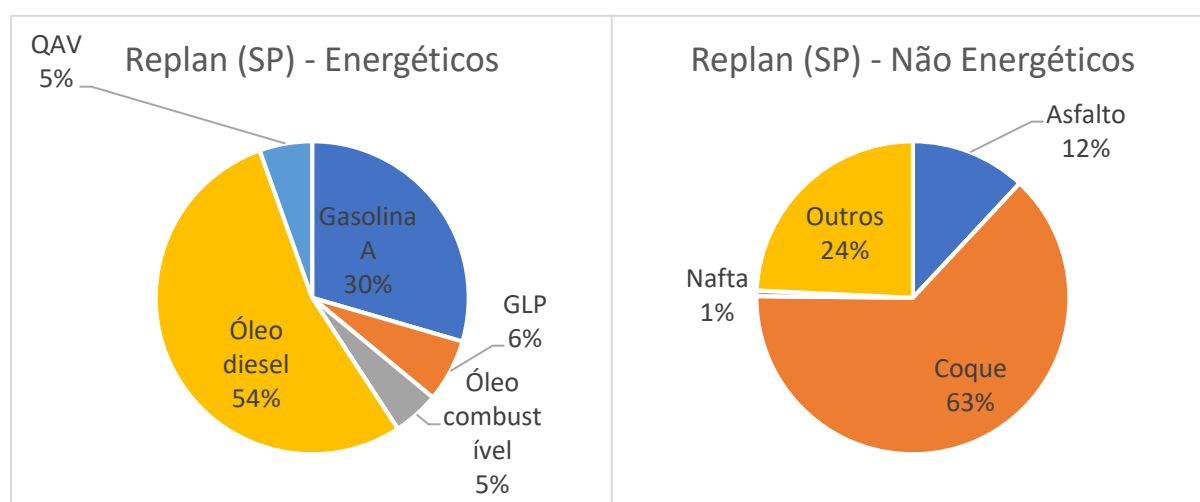


Figura 17: Produção de derivados da REPLAN em 2016

Fonte: (ANP, 2017)

Além disso, a REPLAN se localiza no município de Paulínia no estado de São Paulo, está inserida na Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), uma bacia hidrográfica considerada crítica em relação a disponibilidade de água de acordo com a análise realizada no item 5.2.

A cidade de Paulínia tem como principais afluentes os Rios Atibaia, Corumbataí, Jaguari e Camanducaia e compreende os aquíferos Cristalino, Tubarão e Guarani. A REPLAN

heterogênea, com algumas regiões tipicamente voltadas para o setor industrial e outras para o setor agrícola, com produção intensiva (COBRAPE, 2010).

Em relação a dinâmica demográfica da bacia, o ritmo de crescimento da população atualmente é maior do que do Estado de São Paulo, a taxa geométrica de crescimento anual estimada entre os anos de 2000 a 2010 no conjunto das Bacias PCJ foi de 1,7% ao ano (COBRAPE, 2010).

Entre as bacias, as taxas de crescimento estimadas para o mesmo período correspondem a 1,2% a.a. na bacia Capivari, 1,5% a.a. na bacia Jundiaí e 1,2% a.a. na bacia Piracicaba. Entre as sub-bacias, a maior taxa é registrada na sub-bacia Jaguari (1,6% a.a.) enquanto as menores são registradas nas sub-bacias Corumbataí (0,97% a.a.) e Camanducaia (1,0% a.a.) (COBRAPE, 2010).

Na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, as culturas de cana-de-açúcar, citros e as pastagens são as atividades agrícolas mais significativas em termos econômicos e em extensão. A maior parcela do solo das bacias PCJ é ocupada com pastos e campos nativos. Esta área representa aproximadamente um quarto de toda a extensão das bacias e está diretamente ligada a produção pecuária. Além disso, as áreas ocupadas com cultivo de cana-de-açúcar representam 19,01% do total das Bacias PCJ (COBRAPE, 2010).

As áreas urbanizadas recobrem apenas 12,11% da área total das Bacias PCJ, porém sua ocupação é heterogênea, aproximadamente metade desta área está concentrada nos 20 municípios da Região Metropolitana de Campinas. Além de Campinas, que concentra 14,66% das áreas urbanizadas das Bacias PCJ, também se destacam os municípios de Piracicaba (6,62%), Jundiaí (5,95%), Limeira (5,19%) e Bragança Paulista (5,15%) (COBRAPE, 2010).

Por último, as formações de mata nativa recobrem 20,35% da área das Bacias PCJ. Essa classe por ser encontrada em toda a extensão das bacias, mas está mais concentrada nas áreas mais elevadas.

A Tabela 12 abaixo apresenta a relação dos municípios que pertencem a cada sub-bacia da bacia PCJ.

Tabela 12: Localização dos municípios em cada sub-bacia hidrográfica da UGRHI-5

Sub-bacia	Municípios
Camanducaia	Amparo, Extrema, Holambra, Jaguariúna, Monte Alegre do Sul, Pedra Bela, Pedreira, Pinhalzinho, Socorro, Santo Antônio de Posse, Toledo, Tuiuti, Serra Negra
Jaguari	Americana, Amparo, Artur Nogueira, Bragança Paulista, Camanducaia, Campinas, Cordeirópolis, Cosmópolis, Extrema, Holambra, Itapeva, Jaguariúna, Joanópolis, Limeira, Mogi-Mirim, Morungaba, Nova Odessa, Paulínia, Pedra Bela, Pedreira, Pinhalzinho, Piracaia, Santo Antônio de Posse, Tuiuti, Vargem
Atibaia	Americana, Atibaia, Bragança Paulista, Camanducaia, Campinas, Campo Limpo Paulista, Cosmópolis, Extrema, Itatiba, Jaguariúna, Jarinu, Joanópolis, Jundiaí, Louveira, Morungaba, Nazaré Paulista, Nova Odessa, Paulínia, Piracaia, Valinhos, Vinhedo
Corumbataí	Analândia, Charqueada, Cordeirópolis, Corumbataí, Ipeúna, Iracemápolis, Itirapina, Piracicaba, Rio Claro, Santa Gertrudes, São Pedro
Piracicaba	Águas de São Pedro, Americana, Campinas, Charqueada, Hortolândia, Iracemápolis, Limeira, Monte Mor, Nova Odessa, Paulínia, Piracicaba, Rio das Pedras, Saltinho, Santa Bárbara d'Oeste, Santa Maria da Serra, São Pedro e Sumaré
Capivari	Campinas, Capivari, Elias Fausto, Hortolândia, Indaiatuba, Itatiba, Itupeva, Jundiaí, Louveira, Mombuca, Monte Mor, Rafard, Rio das Pedras, Santa Bárbara d'Oeste, Valinhos, Vinhedo
Jundiaí	Atibaia, Cabreúva, Campo Limpo Paulista, Indaiatuba, Itupeva, Jarinu, Jundiaí, Mairiporã, Salto, Várzea Paulista

Fonte: (COBRAPE, 2010)

As bacias PCJ apresentam grande demanda para abastecimento urbano, principalmente devido a transferência de vazões nas áreas de cabeceiras (ANA, 2014). Por meio do Sistema Cantareira, é efetuada a transferência de 31 m³/s da bacia do Piracicaba para o Alto Tietê, influenciando as vazões dos mananciais. Grande parte deles apresenta problemas de qualidade das águas, particularmente agravados nos períodos de estiagem, necessitando de grandes investimentos em coleta e tratamento de esgotos.

Nos meses chuvosos da região, entre os meses de outubro a fevereiro, normalmente ocorre o acúmulo de água nos reservatórios, o que garante volume suficiente para os usos ao longo do período de estiagem. Entretanto, entre outubro de 2013 e novembro de 2015 houve uma redução significativa no volume de precipitação, o que reduziu as vazões afluentes aos reservatórios (ANA, 2014).

Em relação à outorga nas bacias PCJ, para as captações superficiais feitas no estado de Minas Gerais o total de água captada não poderá exceder o valor de 30% da Q_{7,10} e no estado de São Paulo este percentual sobre para 50% da Q_{7,10}. Nos casos de outorga em rios federais dentro das bacias PCJ, a ANA deliberou a resolução ANA nº 429 que delegou a competência a ambos os Estados de outorga de uso dos recursos hídricos que são de domínio da União (CBH-PCJ, 2010; IGAM, 2016).

5.3.1. Regras de Uso de água na bacia PCJ

Por causa do nível baixo dos rios, a ANA, o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e a Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD-MG) estabeleceram regras de uso da água. As regras determinam estados de Alerta e de Restrição para os usuários que retiram água diretamente dos rios Camanducaia, Jaguari, Atibaia, Cachoeira, Atibainha e afluentes.

Foram definidos dois estados para mudança de regras de uso na bacia PCJ. O estado de Alerta não restringe o uso de água, mas chama a atenção dos usuários para a proximidade de uma restrição. E já no estado de restrição as seguintes reduções são determinadas conforme resolução conjunta ANA/DAEE N°50, de 21 de janeiro de 2015 (ANA; DAEE, 2015):

- Os usos que demandam menos que 10 litros por segundo possuem a alternativa de suspender a retirada de água das 7h às 13h (usos industriais) e das 12h às 18h (irrigação ou dessedentação animal).
- Para abastecimento público e para dessedentação animal a redução do volume diário outorgado é de 20%
- Para irrigação e uso industrial a redução do volume diário outorgado é de 30%
- Todos os demais usos deverão ser paralisados, exceto os que não consomem água.

O Estado de alerta para a sub-bacia do rio Camanducaia ocorre quando o posto fluviométrico Dal Bo (Posto fluviométrico fazenda barra) apresentar média dos 3 últimos dias consecutivos menor ou igual a $1,5\text{m}^3/\text{s}$ e o estado de alerta do rio Jaguari ocorre quando o posto fluviométrico Foz do Jaguari apresentar médias dos 3 últimos dias menor ou igual a $2\text{m}^3/\text{s}$. Além disso, o posto fluviométrico Pires também é um ponto de referência para estado de restrição devido a sua contribuição para o sistema de abastecimento Cantareira.

Neste posto, a média de vazão diária segue a mesma regra do posto Foz de Jaguari, entretanto em casos de restrição a área definida como montante Cantareira fica submetida as regras citadas acima e não a bacia do Rio Jaguari completa (apesar desta área ser pertencente a sub-bacia do Rio Jaguari).

5.3.2. Delimitação da área estudada

Foi escolhida a bacia do Rio Jaguari devido a captação da Petrobras estar localizada no neste rio. Além disso, foi integrada ao estudo de caso a bacia do Rio Camanducaia, pois este rio é um afluente do Rio Jaguari localizado a montante do ponto de captação da REPLAN.

As áreas de contribuição foram determinadas a partir do *shapefile* disponibilizado pela ANA, onde as bacias brasileiras são divididas de acordo com a classificação de Ottobacias nível 4. Consideraram-se os trechos de cursos d'água que a REPLAN utiliza para captação de água, localização de postos fluviométricos e disponibilidade de dados contendo uma série histórica adequada para a realização do balanço hídrico atual e disponibilidade futura (ANA, 2017a).

Embora as sub-bacias consideradas tenham sido a bacia do Rio Jaguari e do Rio Camanducaia, optou-se por as dividir em três áreas de captação em função da variação apresentada nos dados de precipitação anual dos principais rios afluentes do Rio Jaguari, que são Ribeirão do Pinhal e Ribeirão Pirapitingui, ambos pertencentes a área de captação nomeada neste trabalho como Pinhal. Apesar de a captação da REPLAN ser feita em um trecho de Rio a montante da afluição dos rios Ribeirão do Pinhal e Ribeirão Pirapitingui, a análise dos mesmos é necessária em função do ponto de observação da foz do Rio Jaguari, pois este trecho é usado como referência para programas de restrição de água na bacia nos casos em que a vazão medida é menor do que a vazão mínima definida.

Após a delimitação da área, os rios citados acima foram desenhados no programa WEAP e em seguida foram adicionadas as camadas em *shapefile* com os pontos de interesse: postos fluviométricos, postos pluviométricos, pontos dos municípios pertencentes a área de estudo em função de seus centroides e reservatórios.

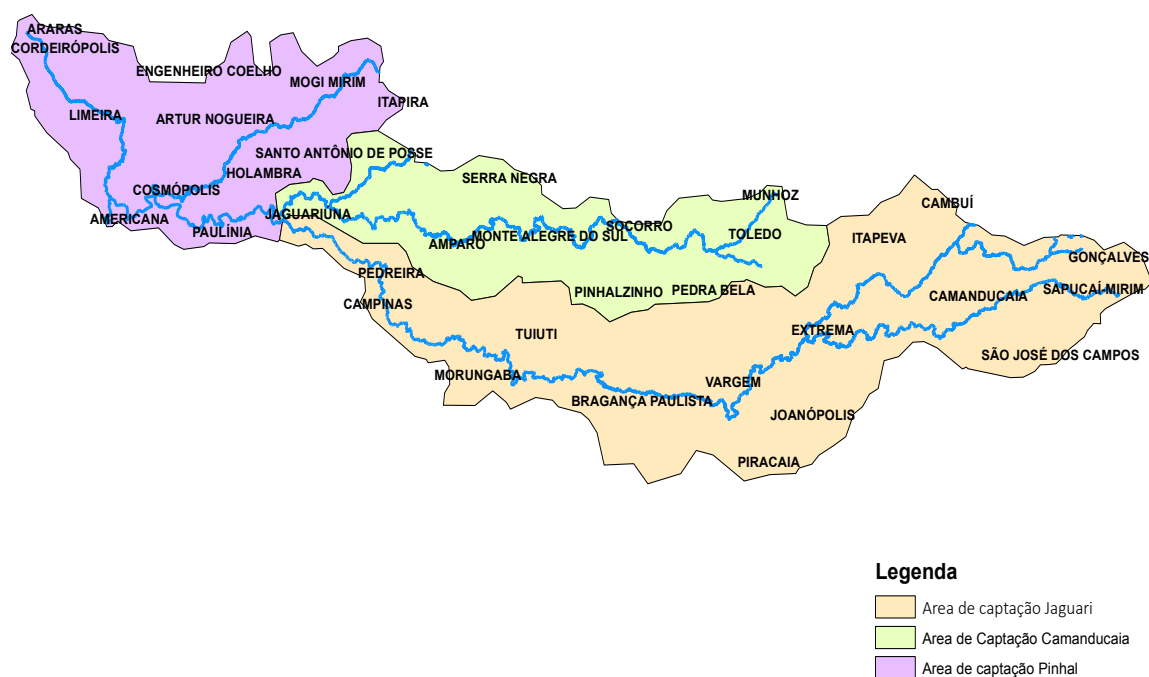


Figura 19: Divisão das áreas de captação

Fonte: Elaboração própria (*Software WEAP*)

5.3.3. Variáveis climáticas utilizadas

A etapa seguinte para a simulação no WEAP é carregar o modelo com dados climáticos e definir o período a ser modelado.

Os dados de precipitação foram obtidos através das estações pluviométricas do DAEE (DAEE,). Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** encontram-se todas as estações da DAEE localizadas dentro da área de estudo e na Figura 19 está a localização espacial das estações. Os dados carregados foram as médias mensais das estações após tratamento dos dados faltantes e *outliers*.

Tabela 13: Postos Pluviométricos inseridos nas sub-bacias Jaguari e Camanducaia

Prefixo	Nome	Altitude	Latitude	Longitude	Precipitação anual média (mm)
D3-001	Usina jaguari (cpfl)	700	22° 49' 00"	46° 53' 00"	1349,65
D3-004	Usina esmeralda	650	22° 33' 00"	46° 58' 00"	1328,21
D3-005	Doutor carlos norberto	830	22° 42' 00"	46° 38' 00"	1562,50
D3-009	Martim francisco	590	22° 31' 46"	46° 57' 11"	1360,71
D3-010	Posse da ressaca	600	22° 36' 00"	46° 57' 00"	828,79
D3-011	Jaguariuna (cmef)	570	22° 42' 00"	46° 59' 00"	839,03
D3-018	Vargem	940	22° 52' 35"	46° 24' 40"	1649,10
D3-023	Arcadas	660	22° 42' 55"	46° 50' 38"	1672,35
D3-027	Monte alegre do sul	750	22° 41' 45"	46° 40' 18"	1659,39
D3-029	Amparo (cmef)	660	22° 43' 00"	46° 46' 00"	1318,68
D3-031	Fazenda chapadao	760	22° 37' 27"	46° 50' 22"	1410,36
D3-035	Pedra bela	1.090	22° 47' 43"	46° 26' 26"	1451,30
D3-036	Pinhalzinho	880	22° 47' 18"	46° 34' 35"	1544,35
D3-042	Fazenda barra	570	22° 42' 03"	46° 58' 55"	1203,09
D3-046	Morungaba	750	22° 52' 23"	46° 47' 31"	1530,92
D3-052	Pedreira	575	22° 44' 34"	46° 56' 18"	1344,24
D3-054	Joanopolis	920	22° 55' 56"	46° 16' 04"	1432,78
D3-063	Braganca paulista	800	22° 55' 32"	46° 32' 03"	1498,46
D3-064	Mae dos homens	800	22° 53' 00"	46° 35' 00"	1480,33
D3-065	Tuiuti	770	22° 49' 00"	46° 41' 00"	1213,45
D3-068	Formiga	1.080	22° 44' 00"	46° 26' 00"	1530,71
D3-072	Braganca paulista	860	22° 57' 00"	46° 32' 00"	1846,18
D4-038	Cordeiropolis (emsa)	730	22° 28' 00"	47° 24' 00"	1580,22
D4-052	Usina ester	544	22° 39' 39"	47° 13' 05"	1372,38
D4-082	Holambra	600	22° 37' 58"	47° 03' 07"	1363,80
D4-099	Artur nogueira	667	22° 34' 24"	47° 09' 17"	1377,68

Fonte: Elaboração própria

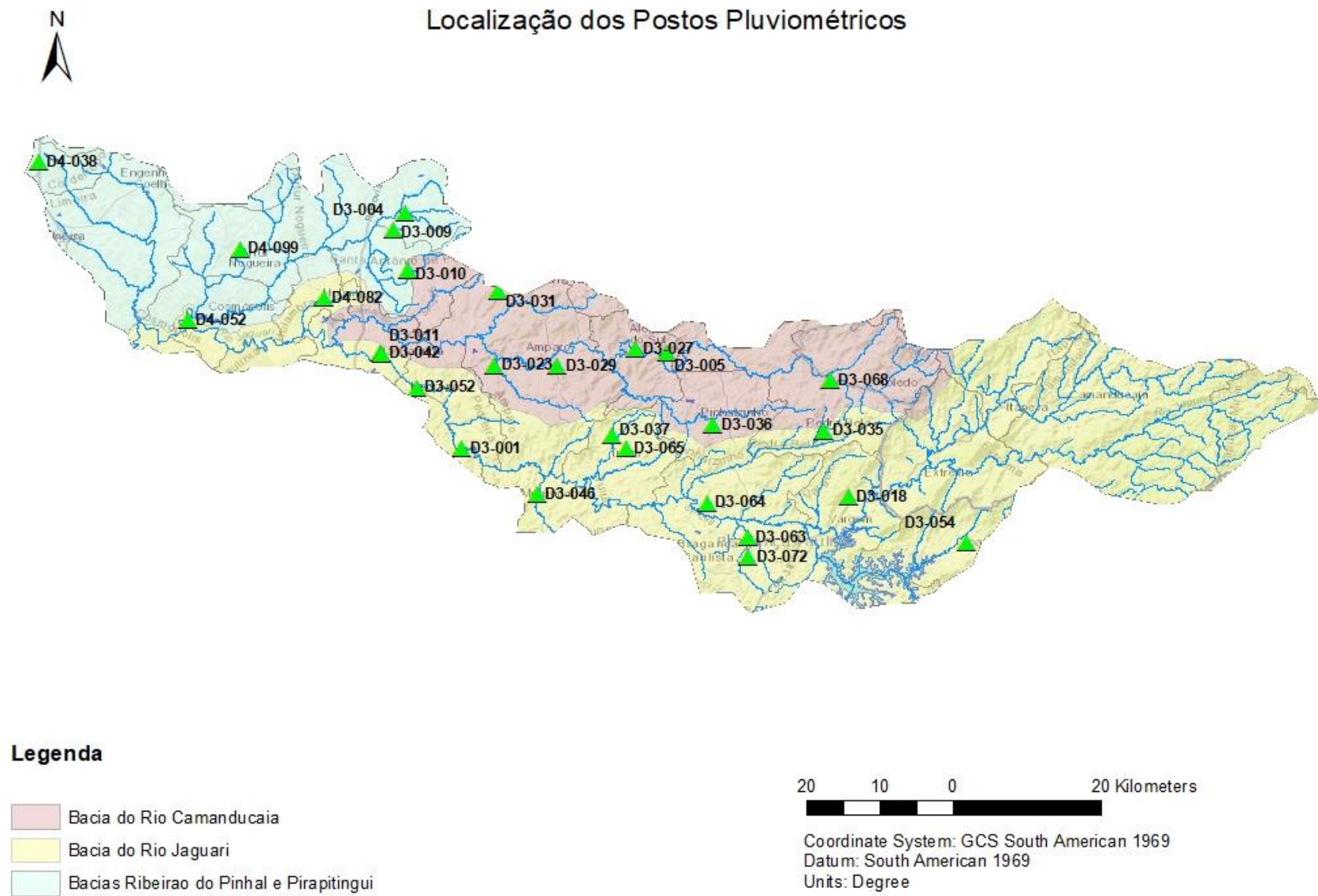


Figura 20: Localização dos postos pluviométricos

Fonte: Elaboração própria (Software ArcGIS)

O período foi determinado considerando que as estações escolhidas devem ter um intervalo longo o suficiente para conseguir representar o comportamento da bacia e minimizar eventos atípicos.

Assim, o critério de corte foi de estações que apresentem pelo menos 80% de dados disponíveis dentro período de tempo selecionado: entre 1943 e 2015. Na tabela a seguir estão as estações escolhidas para o estudo de caso e a área de captação a qual pertencem. A distribuição do número de dados disponíveis por ano encontra-se no anexo I desta dissertação.

Tabela 14: Postos Pluviométricos selecionados para o estudo de caso

Sub bacia	Código DAEE	Nome	Percentual de dados preenchidos
Jaguari	D3-046	Morungaba	89,1%
	D3-052	Pedreira	96,3%
	D3-018	Vargem	98,2%
	D3-054	Joanópolis	86,7%
	D3-027	Monte Alegre do Sul	99,1%
Camanducaia	D3-031	Fazenda Chapadão	97,8%
	D3-035	Pedra Bela	91,2%
	D3-036	Pinhalzinho	90,1%
	D3-042	Fazenda Barra	92,8%
Pinhal	D3-009	Martim Francisco	97,3%
	D4-082	Holambra	83,9%
	D4-052	Usina Ester	98,1%

A média de chuva anual para cada uma destas áreas foi feita a partir do valor de precipitação médio das curvas de nível mais próximas de cada área de captação. Entretanto, durante as primeiras rodadas do modelo, os valores dos coeficientes da modelagem Bias e Nash

foram inadequados. Desta forma, optou-se por calcular uma média de chuva mensal de cada estação pluviométrica separadas pelas áreas de captação onde estão localizadas.

A simulação de precipitação para o período entre 2016-2040 foi feita em relação à série histórica de precipitação destas mesmas estações, compreendendo o período em que todas apresentam dados, isto é, entre os anos de 1947 a 2015. O ano base foi definido como 1987, porque apresentou a melhor semelhança em termos de volume de chuva com o ano 2015, ano base do estudo.

i. Área de captação Jaguari

Na figura 21 está o resultado para a precipitação média mensal, que foi baseada nos dados das estações pluviométricas Morungaba, Pedreira, Vargem, Joanópolis e Monte Alegre do Sul.

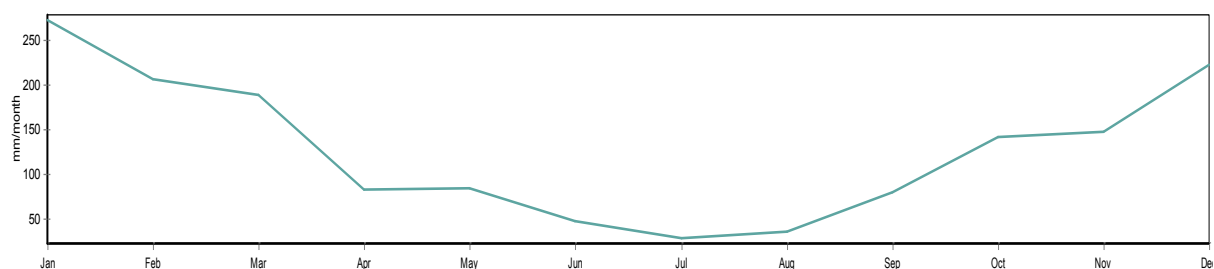


Figura 21: Precipitação Média Mensal para o ano base de 2015 na área de captação Jaguari

Fonte: Elaboração Própria (*Software* WEAP)

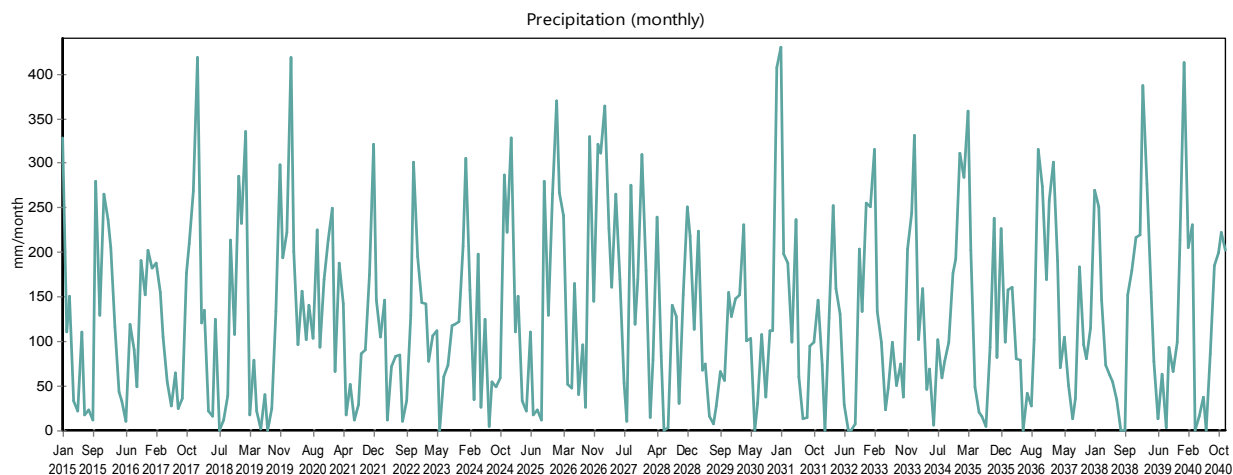


Figura 22: Modelagem da precipitação média anual para o período 2016-2040 da área de captação Jaguari

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

ii. Camanducaia

Na figura 22 está o resultado para a precipitação média mensal foi baseada nos dados das estações pluviométricas Fazenda Chapadão, Pedra Bela, Pinhalzinho e Fazenda Barra.

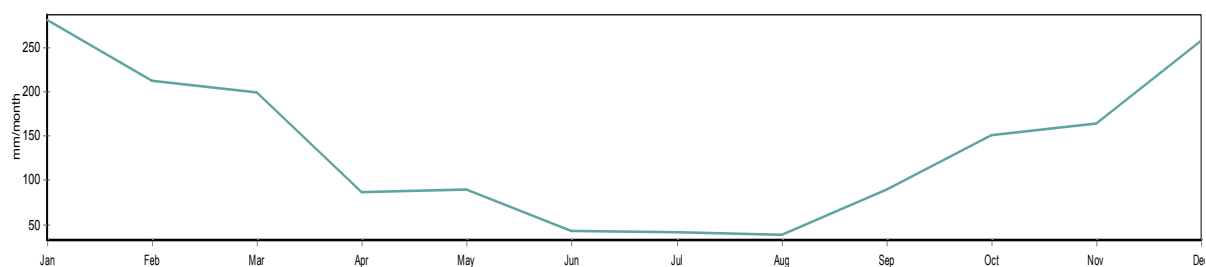


Figura 23: Precipitação Média Mensal para o ano base de 2015 na área de captação Camanducaia

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

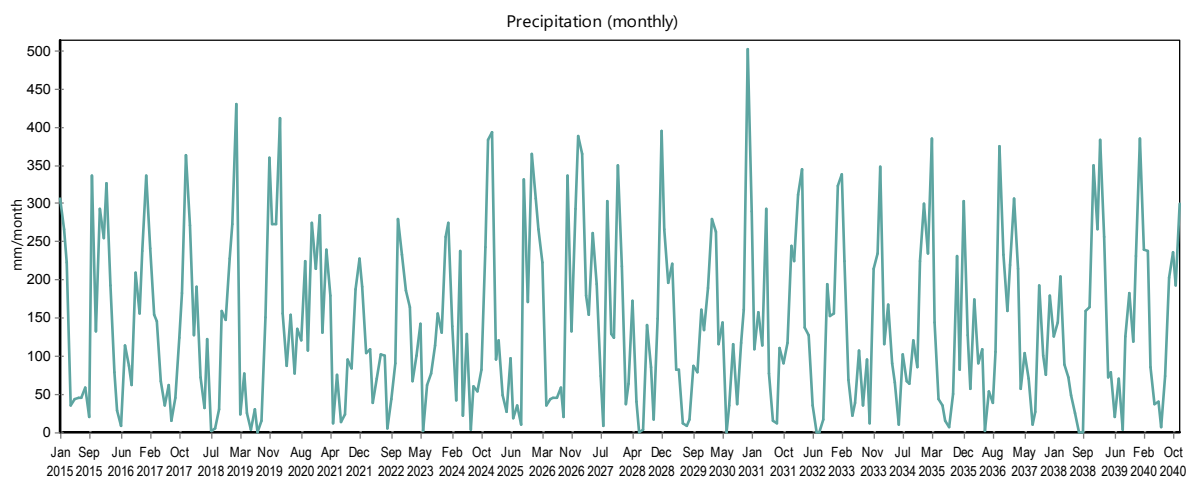


Figura 24: Modelagem da precipitação média anual para o período 2016-2040 da área de captação Camanducaia

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

iii. Pinhal

Na figura 23 está o resultado para a precipitação média apresentada no gráfico abaixo foi derivada das estações base Martim Francisco, Holambra e Usina Ester.

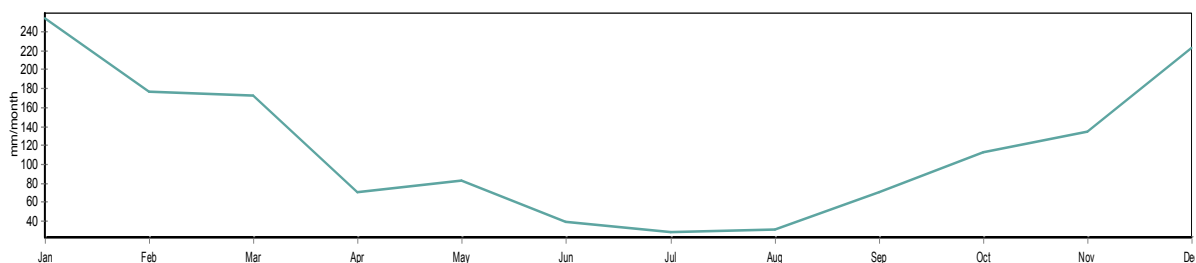


Figura 25: Precipitação Média Mensal para o ano base de 2015 na área de captação Pinhal

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

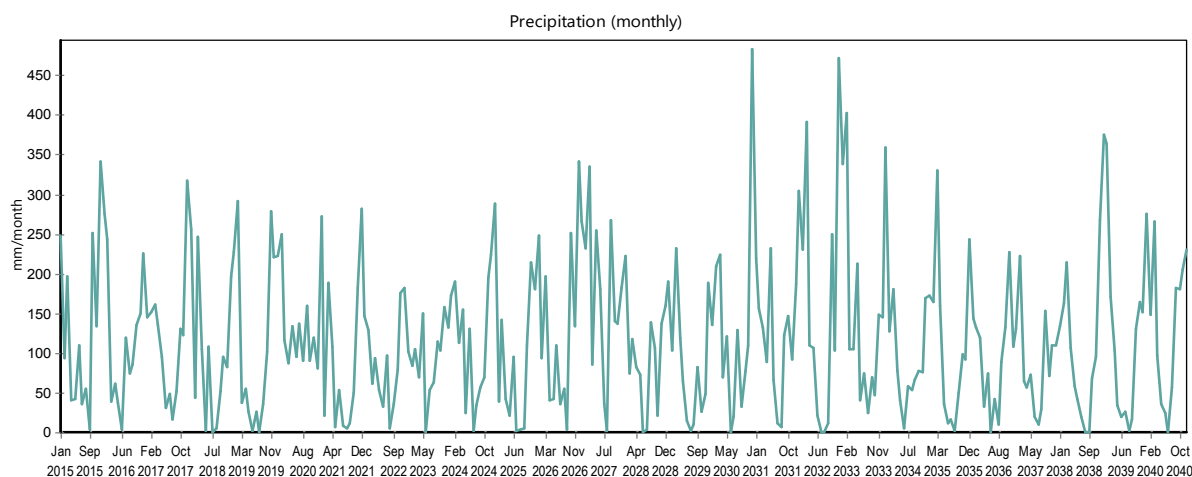


Figura 26: Modelagem da precipitação média anual para o período 2016-2040 da área de captação Pinhal

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

Os dados de evapotranspiração de referência de cada área de captação foram estipulados a partir dos dados de evapotranspiração de referência disponibilizados pelo CIIAGRO (Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas) para cada município. Os pontos de medição disponibilizados pelo CIIAGRO não possuem coordenadas geográficas: sabe-se apenas a cidade na qual se localiza o posto de medição. Por este motivo, para chegar ao valor médio de evapotranspiração para cada área de captação foi calculada a média mensal de todos os municípios inseridos em cada área.

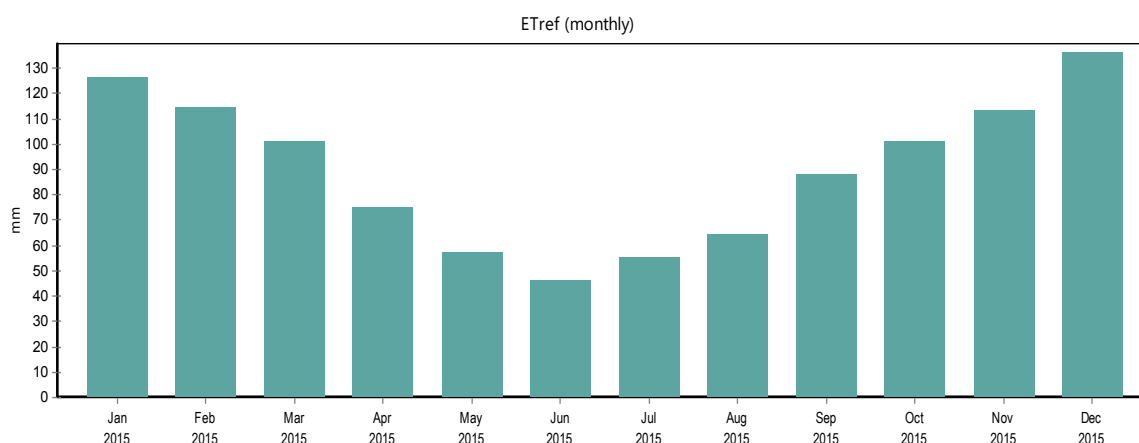


Figura 27: Evapotranspiração de Referência da área de captação Pinhal no ano base

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

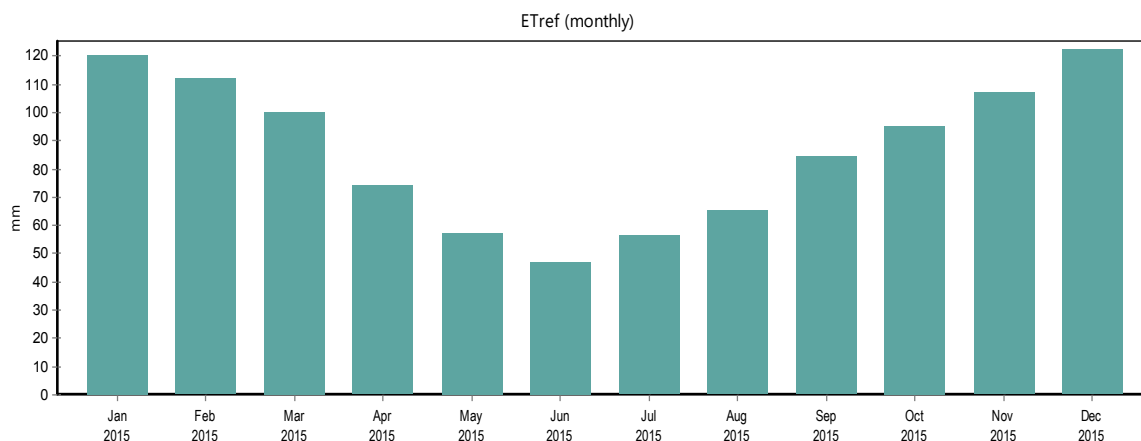


Figura 28: Evapotranspiração de Referência da área de captação Camanducaia no ano base

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

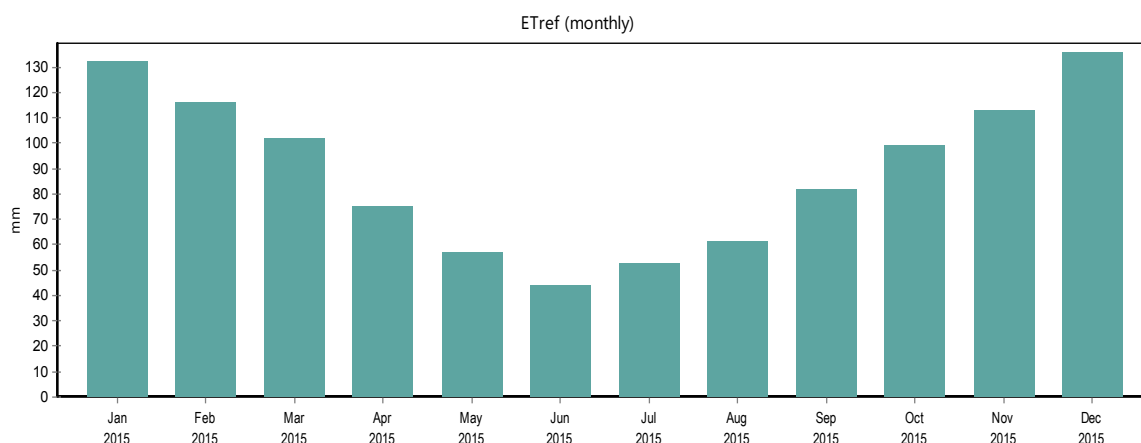


Figura 29: Evapotranspiração de Referência da área de captação Jaguari no ano base

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

5.3.4. Cálculo das Demandas por tipo de uso

Nos itens abaixo encontram-se os cálculos de demanda de água por tipo de uso. Os coeficientes de retorno usados no presente trabalho são aqueles adotados em ONS (2004a) e CBH PCJ (2008), conforme tabela abaixo:

Tabela 15: Coeficientes de retorno por tipo de uso

Tipo de Uso	Coeficiente
Abastecimento Urbano	0,8 ^a
Abastecimento Rural	0,5 ^a
Industrial	0,7 ^a
Irrigação	0,2 ^{a, b}
Criação de animais	0,2 ^a

Fonte: ^a (ONS, 2004a) ^b (CBH-PCJ, 2008)

I. Demanda de água para abastecimento urbano

A demanda de água para abastecimento urbano para a bacia do Rio Jaguari e do Rio Camanducaia foi estimada a partir do cálculo da demanda de água per capita. Para isto foram listados os municípios contidos na área de estudo, assim como os seus municípios vizinhos, através da ferramenta GIS e, em seguida, foi verificado o sistema produtor de água que atende os municípios listados no Atlas de Abastecimento urbano da ANA. Para aqueles cujo sistema de produção está inserido na bacia de estudo, utilizaram-se os dados de vazão da água captada no município e, em seguida, esta vazão foi dividida pelo número de habitantes disponibilizado também no Atlas de Abastecimento Urbano (ANA, 2007b).

Com estes dados foi possível calcular um coeficiente de demanda de água por habitante por dia que foram, em seguida, corrigidos com as perdas de água na distribuição por estado obtido no Diagnóstico de Serviços de água e esgoto – 2014 (SNIS, 2014). Para São Paulo, o índice de perdas é de 33,0% e para Minas Gerais é de 33,7%, conforme Tabela 16.

Tabela 16: Demanda de água para abastecimento urbano per capita

Município	Demanda per capita (l/hab.dia)	Índice de perdas	Demanda per capita AJUSTADA (l/hab.dia)
Amparo	226,47	0,33	301,21
Artur Nogueira	227,90	0,33	303,11
Bragança Paulista	225,22	0,33	299,55
Camanducaia	203,79	0,34	272,47
Cosmópolis	224,20	0,33	298,19
Extrema	182,82	0,34	244,43
Holambra	187,29	0,33	249,10
Itapeva	108,64	0,34	145,26
Jaguariúna	174,82	0,33	232,50
Joanópolis	190,11	0,33	252,85
Limeira	252,95	0,33	336,42
Monte Alegre do Sul	175,73	0,33	233,72
Morungaba	242,48	0,33	322,50
Paulínia	154,90	0,33	206,01
Hortolândia	140,92	0,33	187,42
Monte mor	159,37	0,33	211,96
Pedra bela	172,16	0,33	228,98
Pedreira	225,58	0,33	300,02
Pinhalzinho	194,57	0,33	258,78
Santo Antônio de posse	190,39	0,33	253,22
Toledo	221,77	0,34	296,51
Tuiuti	211,31	0,33	281,04
Vargem	226,92	0,33	301,81

Fonte: Elaboração Própria

Para a projeção de demanda de água para abastecimento urbano futura utilizaram-se os métodos²⁶ descritos no item 4.3.3, a fim de estimar a população de cada município em conjunto com o coeficiente de demanda de água per capita indicado na Tabela 16. Além disso, foi preciso distinguir entre o percentual de água captada superficialmente e o percentual da água captada de poços subterrâneos. Para tanto, consultou-se o Atlas Brasil da ANA sobre abastecimento urbano de água (ANA, 2007b), onde é indicado, por município, o manancial de captação de água e o percentual de participação de abastecimento em cada município.

²⁶ O método logístico foi utilizado para os municípios: Camanducaia, Toledo, Americana, Amparo, Cordeirópolis, Joanópolis, Limeira, Monte Alegre do Sul, Monte Mor, Morungaba, Pedra Bela, Pedreira, Pinhalzinho, Piracaia, Santo Antônio de Posse. Os habitantes dos municípios restantes foram estimados a partir do método da participação no crescimento.

Este valor percentual foi multiplicado pelo número de habitantes de cada município e a demanda de água per cápita para se chegar ao valor de demanda de água apenas referente a captação superficial. Na Figura 30 abaixo está o resultado da projeção até o ano de 2040 para cada área estudada.

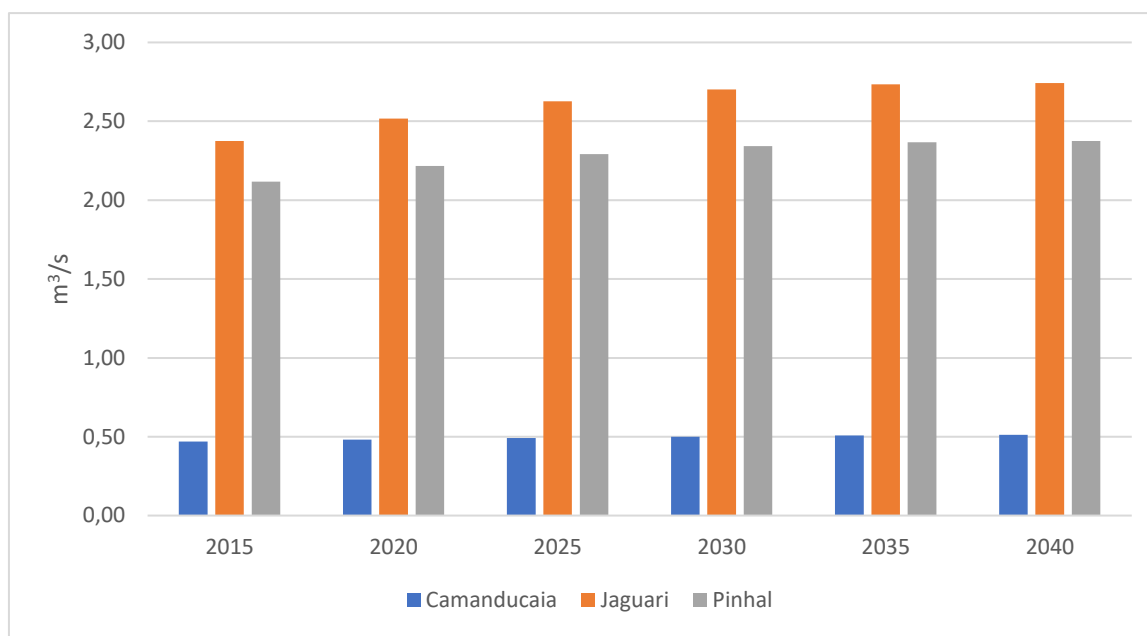


Figura 30: Projeção da demanda de água para abastecimento público em m³/s

Fonte: Elaboração Própria

II. Demanda para dessedentação animal

Os dados de efetivo de rebanhos por município para o ano de 2015 foram obtidos no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) (SIDRA, 2015). A demanda animal foi calculada para os municípios que apresentam um percentual de sua área inseridos na área de estudo maior que 10%. Utilizou-se para isso o critério de proporcionalidade da área dos municípios localizados na área de drenagem considerada.

As projeções de carnes para o Brasil indicam um crescimento nos próximos anos de acordo com estudo sobre o Brasil da OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) (OECD-FAO, 2015). As carnes que apresentam as maiores taxas de crescimento no período entre 2015 e 2025 são a carne de frango, que apresenta estimativa de crescimento

anual de 3,0%, a suína, cujo crescimento projetado para esse período é de 2,7% ao ano, e a carne bovina tem um crescimento projetado de 2,4% ao ano.

Estes percentuais foram utilizados no cálculo da projeção do crescimento da criação de animais até do ano de 2025. Os anos seguintes utilizaram valores constantes a partir deste mesmo ano. A Figura 30 apresenta os resultados da projeção de demanda de água para dessedentação animal.

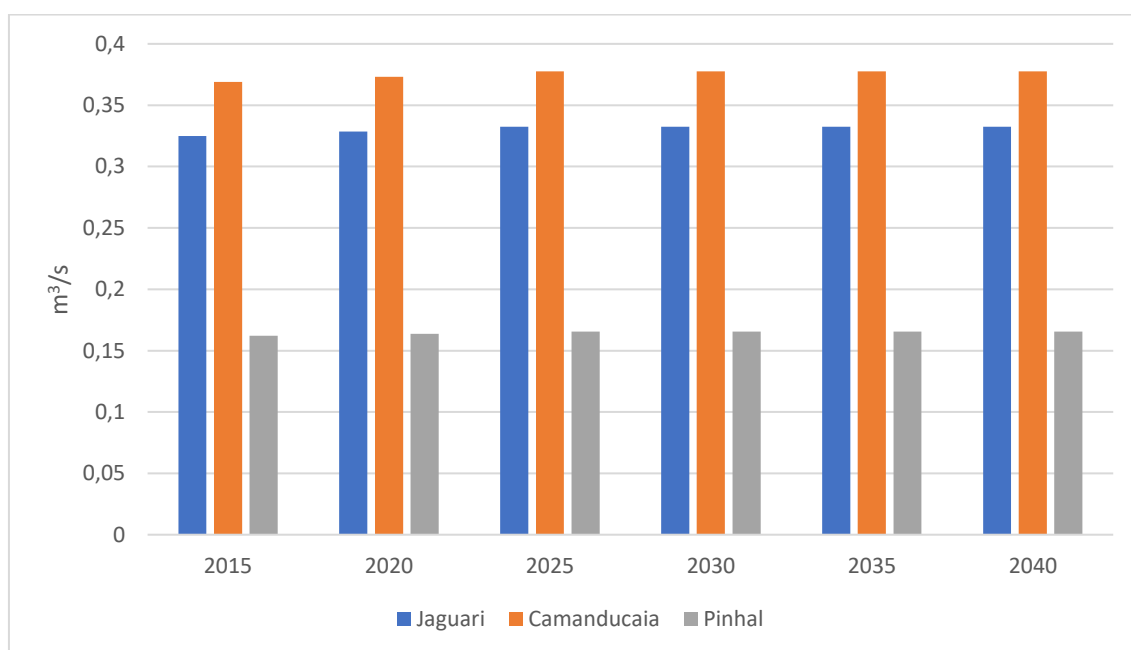


Figura 31: Projeção da demanda de água para dessedentação animal em m³/s

Fonte: Elaboração Própria

III. Demanda Industrial

Para calcular a demanda de água para uso industrial dos municípios paulistas e mineiros foram utilizados dados de outorgas estaduais e federais de indústrias disponibilizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do estado de São Paulo. Os pontos de captação outorgados foram confrontados com os dados de outorga georreferenciadas pela ANA no *software* ArcGIS e em seguida foram selecionados aqueles inseridos na área de estudo (ANA, 2007a; DAEE, 2017). Os lançamentos também foram contabilizados a partir dos dados de outorga fornecidos por ambas as instituições. Os dados encontrados estão apresentados na Tabela 17 abaixo.

Tabela 17: Outorgas para captação e lançamento de efluentes industriais

Área	Tipo de outorga	Número de outorgas	Vazão outorgada (m ³ /s)
Jaguari	captação	142	1,78050482
	lançamento	43	0,594970827
Camanducaia	captação	55	0,26223998
	lançamento	16	0,15242897
Pinhal	captação	13	0,050101471
	lançamento	1	0,017820903

Fonte: Elaboração Própria

IV. Demanda para Irrigação

A demanda de irrigação calculada para o ano base foi obtida a partir de dados de uso e cobertura da terra em formato *shapefile*²⁷ da secretaria do meio ambiente de São Paulo para os municípios do estado de São Paulo (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO,). O arquivo foi cortado para conter apenas a área de estudo e, em seguida, foram classificados os diferentes tipos de uso da terra (Tabela 18) conforme necessário para utilização no WEAP.

²⁷ *Shapefile* é um formato popular de arquivo contendo dados geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas.

Tabela 18: Classificação do uso do solo no software WEAP

Classificação			Classificação WEAP
Nível I	Nível II	Nível III	
Áreas Agrosilvopastoris	Cultura Perene	Café	Agricultura
		Citrus	
	Cultura Semiperene	Cana de Açúcar	
	Cultura Temporária	Milho	
	Pastagem	Pasto Limpo	Pastagem
		Pasto Sujo	
Superfícies Naturais	Reflorestamento		Floresta
	Campo Natural		
	Mata		

Fonte: Elaboração Própria

Os dados obtidos no *shapefile* de uso e cobertura da terra da secretaria do meio ambiente de São Paulo não consideram os municípios mineiros inseridos na bacia do rio Piracicaba.

Para os municípios mineiros não foi possível encontrar *shapefiles* com identificação de uso da terra com atributos similares aos encontrados para os municípios de São Paulo. Portanto, a área de cultivo de cada cultura utilizada baseou-se na base de dados de produção agrícola municipal que apresenta a área plantada por tipo de cultura, sendo disponibilizada pelo Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) para o ano de 2015 (SIDRA, 2015).

As culturas mais relevantes para o estudo foram selecionadas a partir das informações sobre área plantada calculada no ArcGIS para os municípios de São Paulo. Optou-se por selecionar aquelas culturas que apresentaram um percentual de área plantada dentro da área de captação superior à 3 %. Desta forma, as culturas relevantes nas áreas de captação são a cana-de-açúcar, soja, milho, café e citrus. As áreas de cada tipo de uso do solo estão apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 19: Área total por tipo de cultura

Tipo de Cultura	Áreas de Captação (ha)		
	Pinhal	Camanducaia	Jaguari
Mata	11602,9	26406,2	30636,2
Pasto	11462,1	39237	51892,9
Cana	26204	2062,5	3908
Citrus	15977,5	1208,5	1141,2
Café	129,8	3239,5	1343,3
Soja	1141,1	36,1	332,3
Milho	6269,9	4065,2	6632,8

Fonte: Elaboração Própria

As figuras a seguir apresentam o percentual de uso do solo por tipo de cultura para cada uma das áreas de captação.

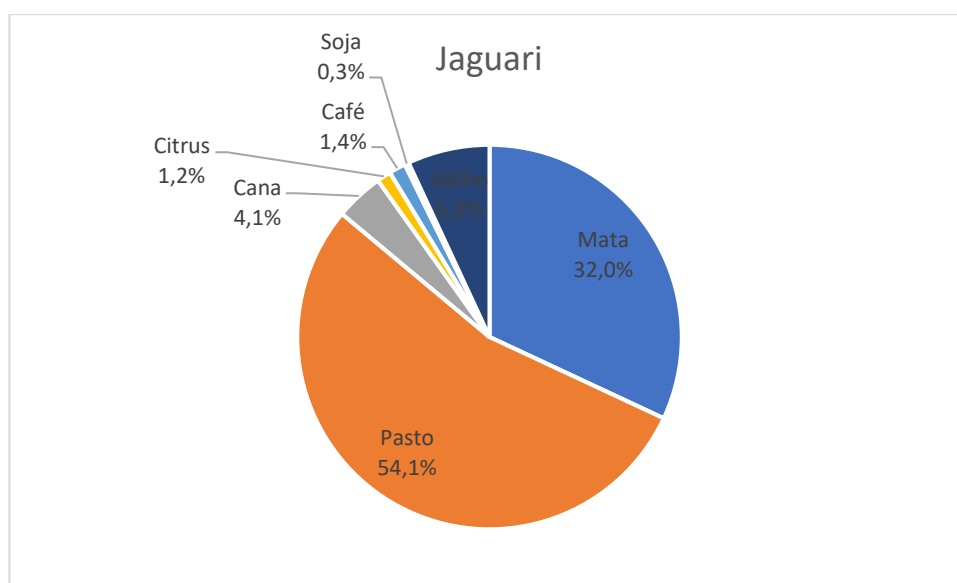


Figura 32: Uso do solo em percentual da área Jaguari

Fonte: Elaboração Própria

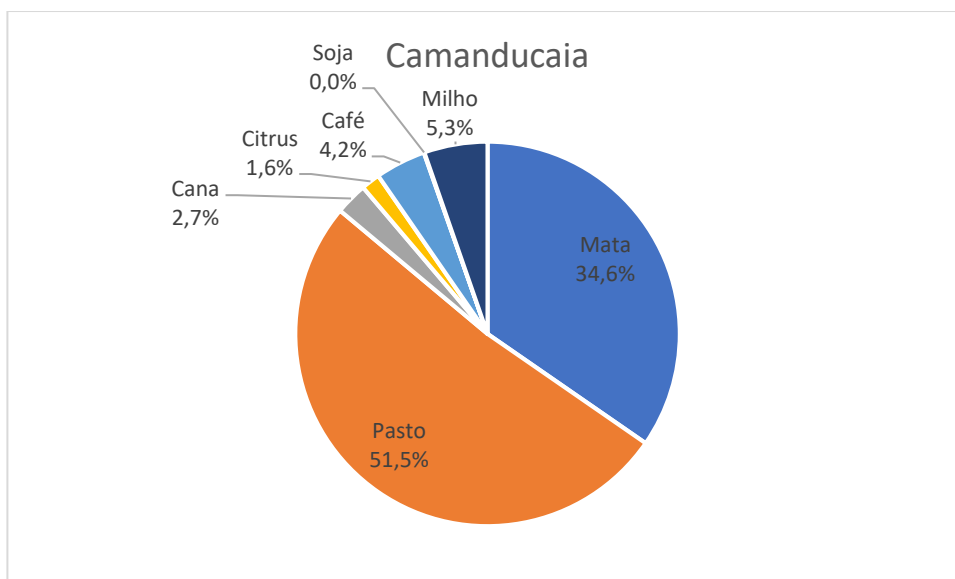


Figura 33: Uso do solo em percentual da área Camanducaia

Fonte: Elaboração Própria

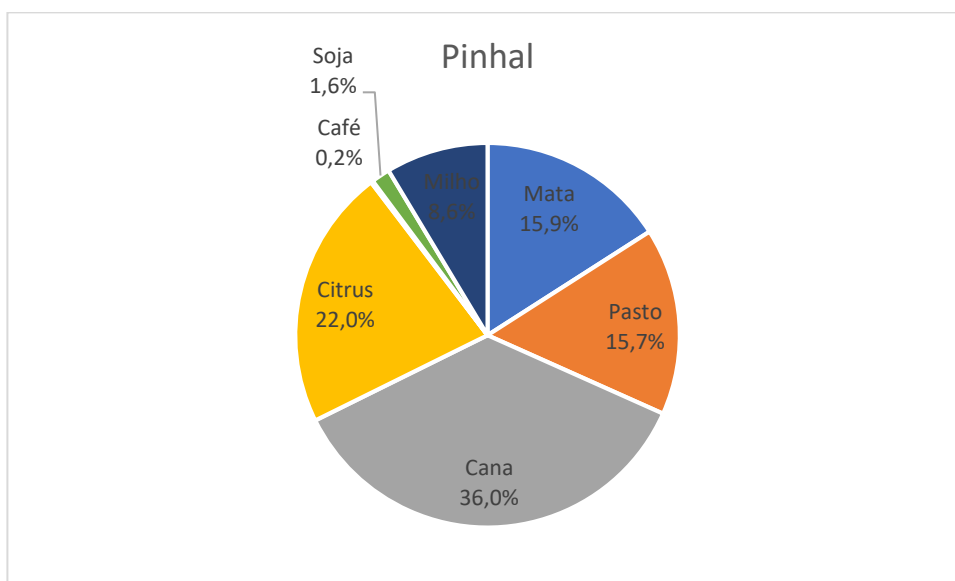


Figura 34: Uso do solo em percentual da área Pinhal

Fonte: Elaboração Própria

Os dados de evapotranspiração de referência utilizados foram obtidos pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO). Os valores considerados para as áreas de captação do estudo derivam da média aritmética dos dados de cada município inserido dentro de cada uma das áreas (CIIAGRO,).

Os dados de coeficiente de cultura (Kc) obtidos são distinguidos em função do período de cultivo (inicial, médio, final). Como não é possível prever em qual estágio se encontra uma determinada cultura apenas com dados de área de plantio, os Kcs considerados no modelo são as médias dos valores de Kc apresentados na tabela abaixo.

Tabela 20: Valores de coeficiente de cultura

Tipo de Cultivo	Kc Inicial	Kc médio	Kc Final	Média
Pasto	0,4	0,95	0,85	0,73
Café	0,9	0,95	0,95	0,93
Citrus	0,75	0,7	0,75	0,73
Soja	-	1,15	0,5	0,83
Milho	-	1,2	0,45	0,83
Cana de Açúcar	0,4	1,25	0,75	0,80

Fonte: (ONS, 2004a)

Segundo OECD-FAO (2015), é esperado para os próximos dez anos um crescimento contínuo do setor agrícola brasileiro, especialmente para as culturas de oleaginosas, arroz, trigo, cana-de-açúcar e algodão. O uso da terra para a agricultura deverá atingir 69,4 milhões de hectares (Mha), 20% superior à média da área utilizada durante o período de 2012-14, representando uma taxa de crescimento de 1,5% ao ano. Este crescimento é impulsionado principalmente pelo aumento previsto de terras destinadas à produção de cana-de-açúcar, que representa aproximadamente 37% do crescimento projetado para o ano de 2024. Ainda, estima-se que a soja continuará a dominar o uso da terra no Brasil nos próximos dez anos, ocupando quase metade da área de cultivo adicional em 2024 (OECD-FAO, 2015).

A estimativa de demanda para irrigação entre o período 2016-2040 baseou-se na taxa de crescimento de 1,5% da área de cultivo para cana-de-açúcar e soja. Obedeceu-se ao limite territorial de cada município presente no estudo da seguinte maneira: conforme a área de plantio aumenta, a área de pasto diminui de forma a manter o total da área estabelecida no ano base. Na Figura 34 está o resultado da projeção de demanda de irrigação para cada área.

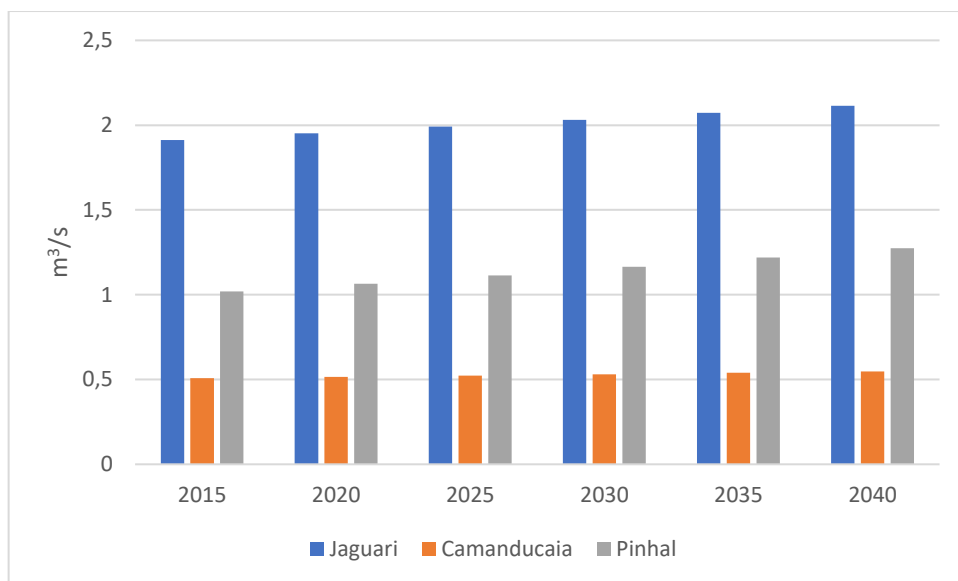


Figura 35: Projeção da demanda de água para irrigação em m³/s

Fonte: Elaboração própria

5.3.5. Infraestrutura Física, Importações e Exportações de água

As águas superficiais da bacia PCJ não estão em sua totalidade à disposição para o uso na própria região, porque uma parcela expressiva é direcionada para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) através do sistema Cantareira

Na Figura 36 encontra-se o esquema de funcionamento do sistema Cantareira com suas vazões medias afluentes, vazões mínimas defluentes e as vazões medias transpostas.

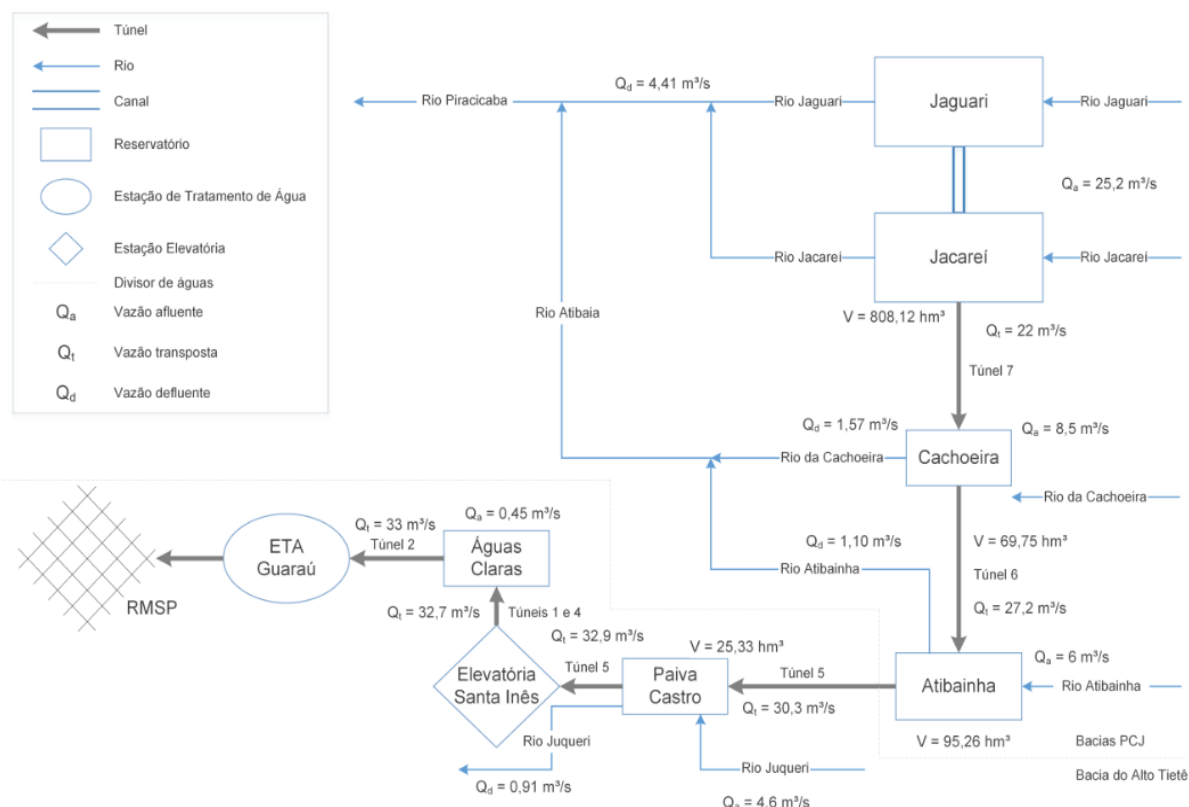


Figura 36: Funcionamento do Sistema Cantareira

Fonte:(COBRAPE, 2010)

O Sistema Cantareira é composto por um grupo de reservatórios localizados nas cabeceiras dos Rios Atibaia, Atibainha, Cachoeira e Jaguari. Neste complexo, há uma transposição de até $31 \text{ m}^3/\text{s}$ ²⁸ da PCJ para a bacia do Alto Tietê através do túnel que interliga o Reservatório do Rio Atibainha em Nazaré Paulista para o Reservatório Paiva Castro, na Bacia do Rio Juqueri em Mairiporã e Franco da Rocha. Deste último, as águas são bombeadas para a Estação de Tratamento de Água - ETA Guaraú, na zona norte do Município de São Paulo (COBRAPE, 2010).

O Sistema Equivalente do Sistema Cantareira é composto pelos reservatórios de Jaguari-Jacareí, que são conectados por um canal de ligação, Cachoeira e Atibainha.

Os dados necessários para a modelagem de um reservatório no WEAP são: Capacidade máxima de armazenamento; Volume inicial; curva cota-volume. Estes dados foram obtidos em (DAEE, 2016) sendo que o volume inicial considerado foi o valor do volume no primeiro dia de janeiro de 2015 conforme dados de monitoramento do sistema Cantareira (SABESP,).

²⁸ A demanda primária da RMSP foi estipulada em $24,8 \text{ m}^3/\text{s}$ e a secundária em $6,2 \text{ m}^3/\text{s}$, totalizando $31 \text{ m}^3/\text{s}$.

Neste modelo as perdas evaporativas foram baseadas no relatório de perdas por evaporações líquidas de usinas hidroelétricas da ONS (ONS 2004b) referente à usina hidrelétrica Jaguari. A partir das informações disponíveis no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), foram obtidas informações históricas dos volumes armazenados, áreas inundadas e níveis dos reservatórios (ANA,). A Tabela 21 apresenta as evaporações medias mensais utilizadas na simulação do balanço hídrico.

Tabela 21: Evaporação média mensal

Evaporação (mm)	
Janeiro	9
Fevereiro	17
Março	29
Abril	43
Maio	52
Junho	52
Julho	40
Agosto	28
Setembro	29
Outubro	17
Novembro	3
Dezembro	12
Total	331

Fonte: (ONS, 2004b)

Para estimar a parcela da vazão afluente do reservatório Jaguari-Jacareí, foi imposto no modelo um valor de vazão defluência média do Rio Jaguari referente ao período de 2011-2015 para o reservatório a partir dos dados das vazões de afluência do reservatório Jaguari-Jacareí disponíveis no SAR (ANA,). A Tabela 22 a seguir apresenta os dados do reservatório Jaguari-Jacareí utilizados na simulação do balanço hídrico.

Tabela 22: Dados do reservatório Jaguari-Jacareí do Sistema Cantareira

Cota mínima operacional (m)	Cota máxima operacional (m)	Volume mínimo operacional (hm3)	Volume máximo operacional (hm3)	Área mínima inundada (km2)	Área máxima inundada (km2)
820,8	844	239,45	1047,49	21,15	49,91

Fonte: (DAEE, 2016)

Após a emissão da Portaria DAEE nº 1213/04 (Renovação da Outorga), os valores a serem revertidos para a RMSP foram estipulados em ordem de prioridade, sendo de prioridade primária a vazão de 24,8 m /s e prioridade secundária a vazão de 6,2 m /s, o que totaliza a possibilidade de reversão de 31 m /s para a RMSP. Para as Bacias PCJ, a vazão total de descarregamento foi estipulada em 5 m /s, sendo na ordem de prioridade a vazão primária de 3 m /s e secundária de 2 m /s (CBH-PCJ, 2011).

Neste trabalho considerou-se a vazão primária como sendo o valor descarregado no período seco, e as vazões primária e secundária durante o período úmido.

As vazões de restrição de descarga para jusante²⁹ consideradas foram 40 m /s no período de maio até novembro (período seco) e 100 m /s entre os meses de dezembro até abril (período úmido) conforme a Nota Técnica DAEE/DPO nº 01/2010 de 28/10/2010.

O sistema Cantareira trabalha com 5 faixas de operação³⁰ em função do percentual de volume de água acumulados nos reservatórios que definem a vazão de retirada do sistema para o abastecimento urbano. Para as bacias PCJ, além destas 5 faixas também foram estabelecidos os períodos seco e úmido que também apresentam regras definidas de metas de vazão defluente.

As vazões meta a serem atingidas são medidas nos seguintes postos fluviométricos:

- Captação de Valinhos (Código DAEE: 3D-007T / Código ANA: 62678150)
- Atibaia (Código DAEE: 3E-063T / Código ANA: 62669900)

²⁹ É o limite de descarga do reservatório para jusante, com o objetivo de evitar inundações e impactos indesejáveis, definido em função da capacidade de escoamento da calha do rio e de suas várzeas

³⁰ Faixa 1 é a normal (volume dos reservatórios em até 60%), Faixa 2 é a de atenção (volume varia entre 40% a 60%), Faixa 3 é Alerta (volume entre 30% a 40%), Faixa 4 é a de restrição (volume entre 20% a 30%) e a Faixa 5 é a especial (volume menor que 20%).

- Buenópolis (Código DAEE: 3D-009T / Código ANA: 62605000)

Para o posto de Buenópolis, único inserido na área de estudo, as vazões mínimas médias de 15 dias consecutivos são 2,5 m³/s para as faixas 1 e 2, e 2,0 m³/s, para as faixas 3 e 4, durante o período úmido. Durante o período seco a vazão mínima média diária é de 10m³/s, exceto na faixa 5, a faixa mais crítica, na qual a vazão mínima passa a ser 2m³/s. Estes valores foram utilizados como premissas em um ponto de requerimento de vazão mínimo que foi inserido no modelo elaborado neste estudo na mesma localização que a estação de Buenópolis. Nele, considerou-se a vazão mínima de 2m³/s.

Além da reversão de água para a RMSP, existem as seguintes reversões consideradas no modelo (COBRAPE, 2010):

- I. Rio Jaguari é responsável por parte do abastecimento urbano das cidades de Paulínia, Hortolândia e Monte Mor através do sistema integrado da SABESP que reverte aproximadamente 0,9 m³/s para as bacias dos rios Atibaia e Capivari.
- II. A Bacia do Rio Mogi-Guaçu recebe 0,1 m /s, provenientes do rio Camanducaia, captadas pelo município de Serra Negra, que lança os efluentes na Bacia do Rio Mogi-Guaçu.

5.3.6. Ordens de Prioridade

As ordens de prioridade têm como principal objetivo seguir com as normas de preferência de abastecimento de água para os fins de abastecimento urbano e dessedentação animal, portanto, para estes usos foram atribuídos o valor 1, como primeira prioridade.

Como segunda prioridade estão os outros usos (indústria e irrigação). Em terceiro lugar estão os pontos adicionados ao modelo para requerimento mínimo de vazão e como última prioridade está o enchimento dos reservatórios (Tabela 23).

Tabela 23: Ordem de Prioridade das demandas modeladas no WEAP

Demandas	Prioridade
Abastecimento Urbano	1
Dessedentação animal	1
Indústria	2
Irrigação	2
Requerimento de vazão (reservatórios)	3
Enchimento dos Reservatórios	4

Fonte: Elaboração Própria

Como os reservatórios foram criados como uma alternativa para a regularização das vazões dos rios modelados, optou-se por colocar a prioridade em 99, que significa que o direcionamento da água será em primeiro lugar para atender as demais demandas da bacia, que quando totalmente atendidas, permitem o enchimento do reservatório.

5.3.7. Regularização de Vazões

A regularização de vazões consiste em armazenar as reservas hídricas durante o período chuvoso para utilizá-las, gradativamente, na complementação das demandas hídricas durante o período de estiagem.

Devido ao modelo simplificado escolhido para a simulação do balanço hídrico, a vazão dos rios varia apenas de acordo a quantidade de precipitação disponível para *runoff* e o percentual de retorno de água em cada uma das áreas de captação e desta forma não é possível atender a demanda hídrica nos meses mais secos.

Sendo assim, na tentativa de tornar o modelo mais realista, foram criados 5 reservatórios com base na localização dos reservatórios de PCHs (Pequenas Centrais Hidroelétricas) e CGHs (Centrais Geradoras Hidroelétricas) já existentes nas bacias do Rio Jaguari e Camanducaia (Figura 37). Os reservatórios foram primeiramente localizados a partir do shapefile disponibilizado pela ANA (ANA, 2007a) e em seguida adicionados ao modelo hidrológico do WEAP.

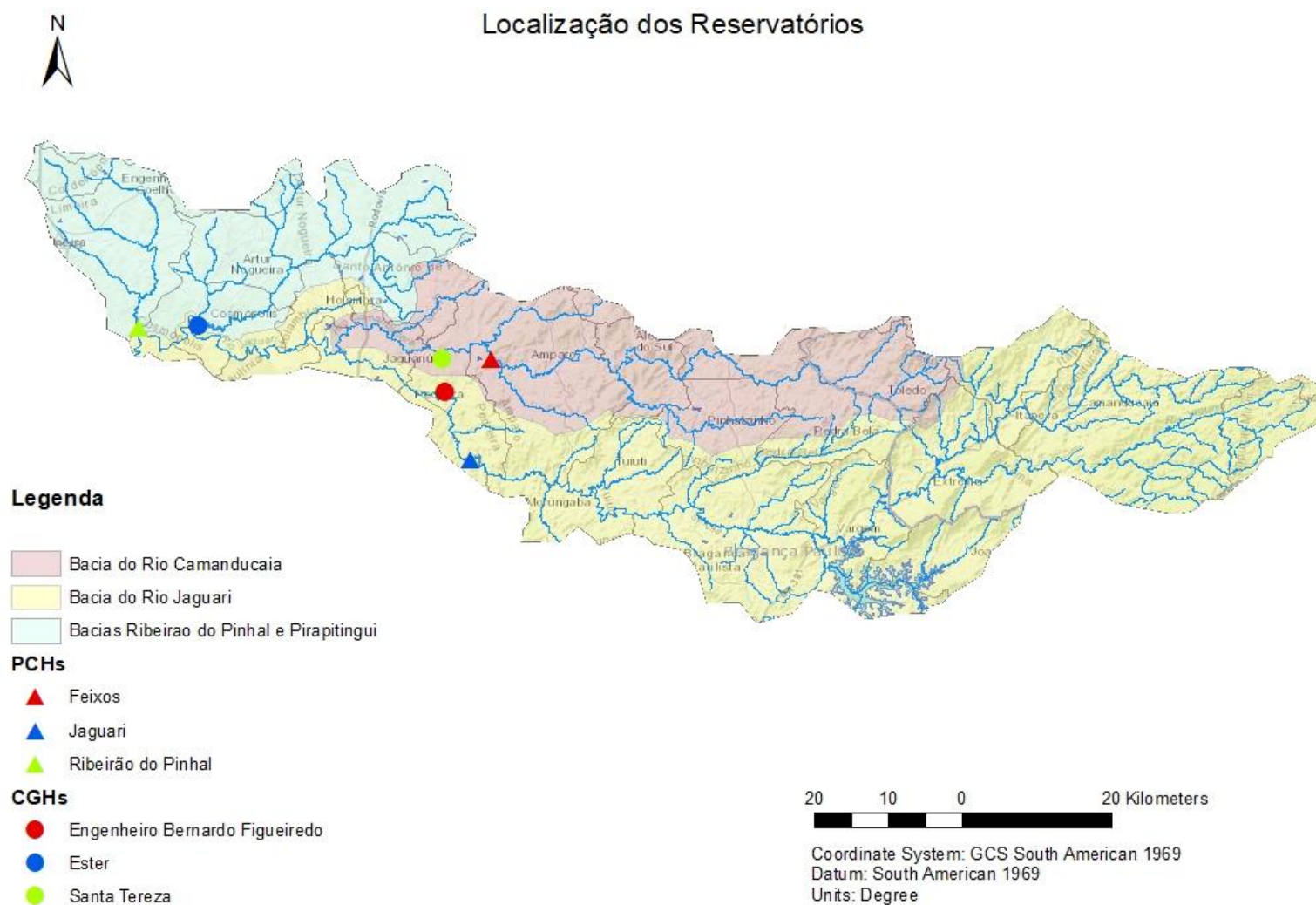


Figura 37: Localização dos Reservatórios Modelados no WEAP

Fonte: Elaboração Própria (Software ArcGIS)

Devido à falta de informações operacionais a respeito da capacidade de armazenamento dentre outros dados, os reservatórios criados seguiram o mesmo padrão do reservatório da PCH Ribeirão do Pinhal, que utiliza a água da represa do tatu para geração elétrica. Esta PCH possui 0,5758 km² de área e sua capacidade de armazenamento de água é de 1.005.063,818 m³.

Ademais, como os reservatórios tem como finalidade principal garantir a demanda nos períodos de seca e calibrar o modelo, todos os reservatórios criados começaram a simulação vazios. Na tabela a seguir estão os dados disponíveis dos reservatórios que foram utilizados na simulação do modelo hidrológico.

Tabela 24: Empreendimentos Hidroelétricos localizados nas bacias dos Rios Jaguari e Camanducaia

Nome	Município	Rio	Vazão de Defluência (m ³ /s)	Área do reservatório (km ²)
CGH Engenheiro Bernardo Figueiredo	Pedreira	Jaguari	-	-
CGH Ester	Cosmópolis	Ribeirão Pirapitingui	-	1,2
CGH Santa Tereza	Amparo e Pedreira	Camanducaia	28	-
PCH Feixos	Amparo	Camanducaia	10,4	-
PCH Ribeirão do Pinhal	Limeira e Cosmópolis	Ribeirão do Pinhal	20	0,5
PCH Jaguari	Pedreira e Campinas	Jaguari	65,1	0,4

Fonte: Elaboração Própria

Os reservatórios modelados foram designados para regular a vazão de saída de acordo com a vazão média de defluência. Para isto foi necessário criar pontos de requerimento de vazão localizados à jusante dos reservatórios criados. Nos casos em que este dado não foi encontrado, optou-se por utilizar a vazão média mensal das estações fluviométricas localizadas a jusante dos reservatórios que tenham a maior proximidade. Sendo assim, para a CGH Ester, os dados de vazão defluente utilizados foram a média das vazões mensais do posto fluviométrico Usina Ester e para a CGH Engenheiro Bernardo Figueiredo os dados foram referentes a estação fluviométrica Jaguariuna_Antartica.

5.3.8. Calibragem do Modelo

A calibração envolveu mudanças nos parâmetros do modelo para simular melhor o cenário histórico. Isso envolveu alterações de prioridades da demanda conforme item 5.3.6 e inclusão de requisitos mínimos de vazão para melhorar o ajuste entre as vazões simuladas e observados.

As calibrações do modelo hidrológico foram realizadas a partir de dados observados das estações fluviométricas descritas na Tabela 25 e localizadas na área de estudo conforme Figura 38.

Tabela 25: Estações Fluviométricas utilizadas no estudo de caso

Estação	Rio	Bias	Nash
Jaguariúna Antartica	Jaguari	9,49	0,38
Fazenda Barra	Camanducaia	10,08	0,42
Foz do Jaguari	Jaguari	27,72	0,49
Usina Ester	Ribeirão Pirapitingui	2,49	0,31
Buenópolis	Jaguari	25,56	-1,80
Monte Alegre do Sul	Camanducaia	-14,13	0,27

Fonte: Elaboração Própria

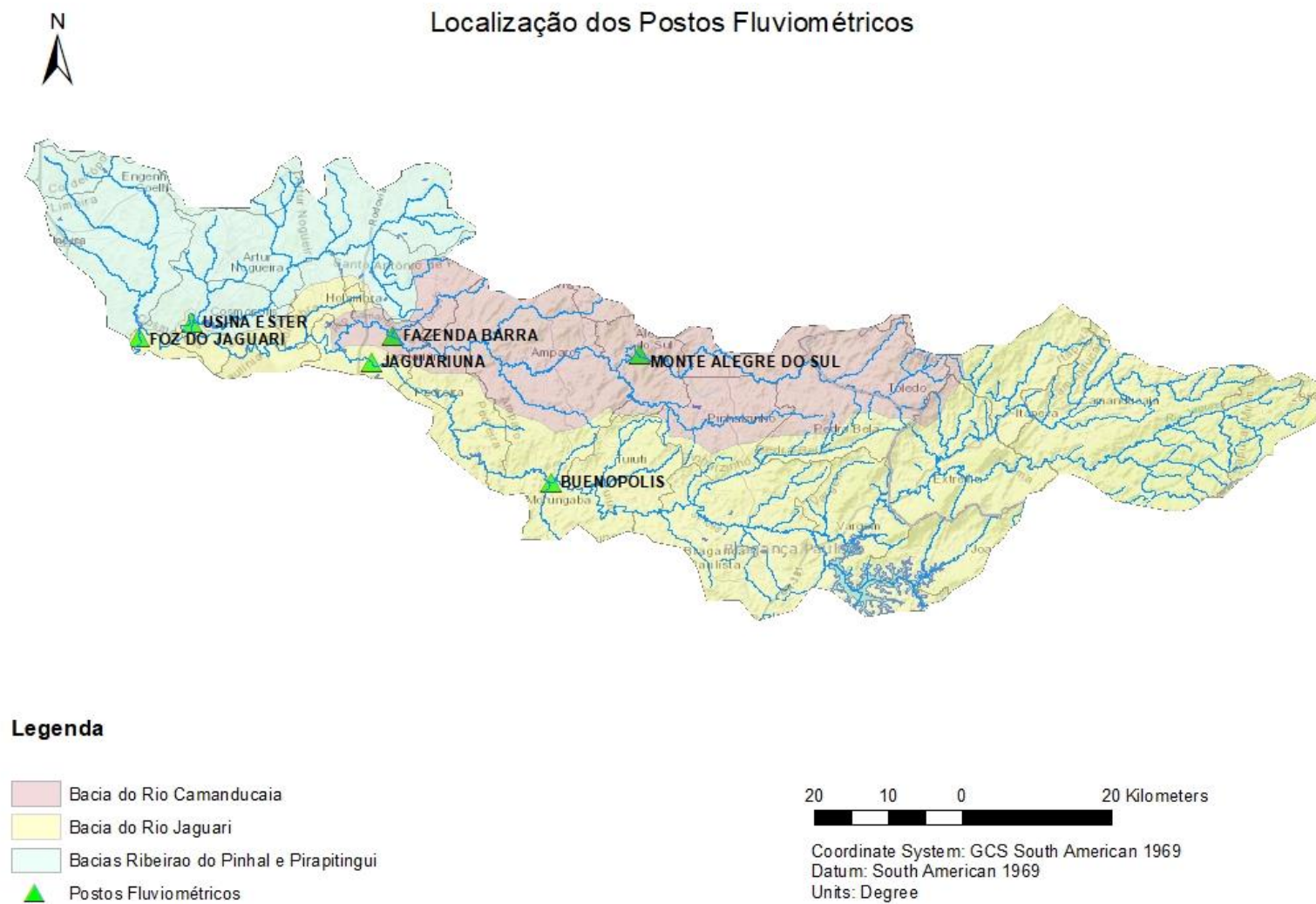


Figura 38: Localização dos Postos Fluviométricos

Fonte: Elaboração Própria (Software ArcGIS)

A vazão anual média de cada uma destas estações foi comparada aos valores simulados pelo WEAP e calculados os parâmetros de eficiência de Nash-Sutcliffe e BIAS apresentados nos gráficos a seguir.

As estações Jaguariúna Antártica, Buenópolis, Fazenda Barra e Monte Alegre do Sul estão situadas a montante do ponto de captação da REPLAN e apresentaram valores para a eficiência de Nash considerados satisfatórios para o modelo, exceto a estação Buenópolis. Porém, como sua localização é a montante das estações Jaguariúna-Antártica e Foz do Jaguar e ainda, o modelo não apresentou restrições de demanda durante todo o período modelado, optou-se por manter as variáveis do modelo. Abaixo estão os gráficos de cada estação observada durante a calibragem do balanço hídrico.

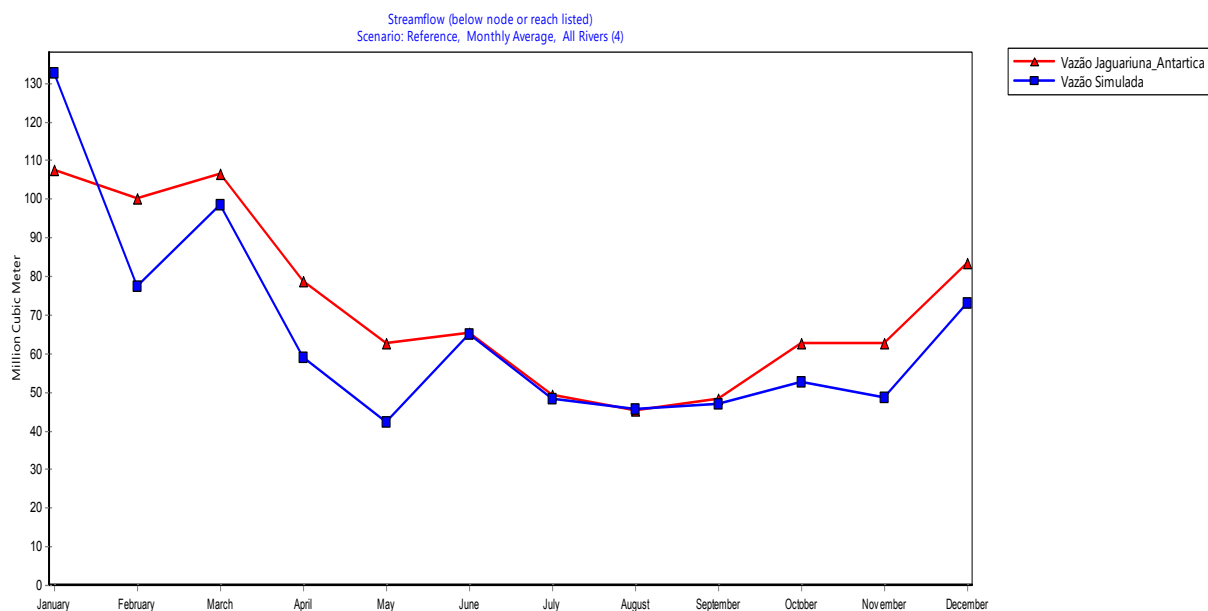


Figura 39: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Jaguariuna-Antártica

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

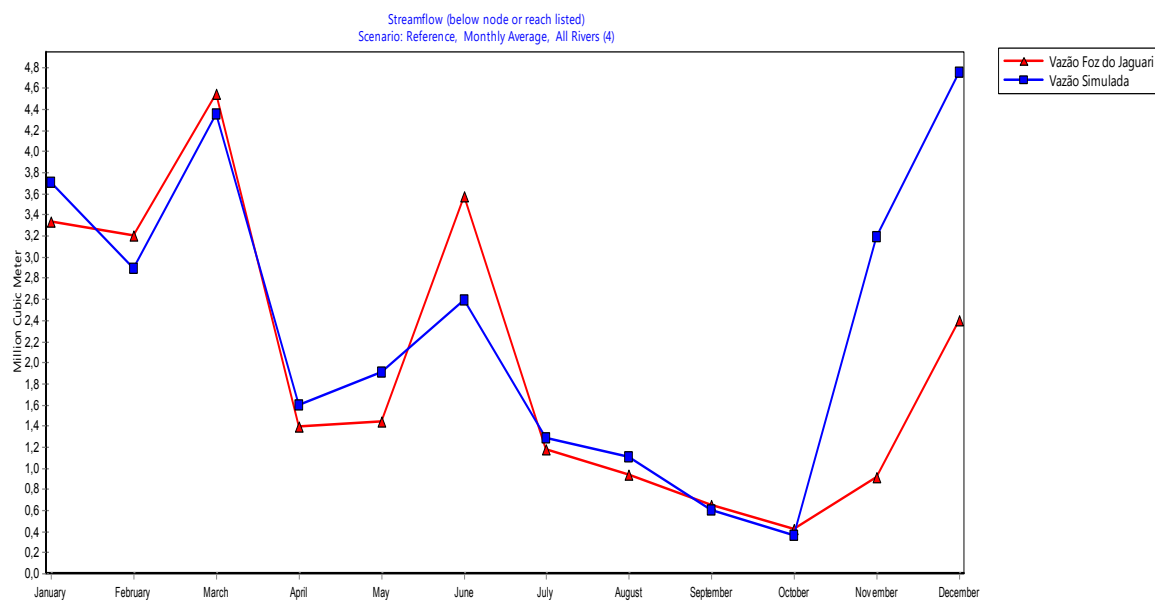


Figura 40: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Foz do Jaguari

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

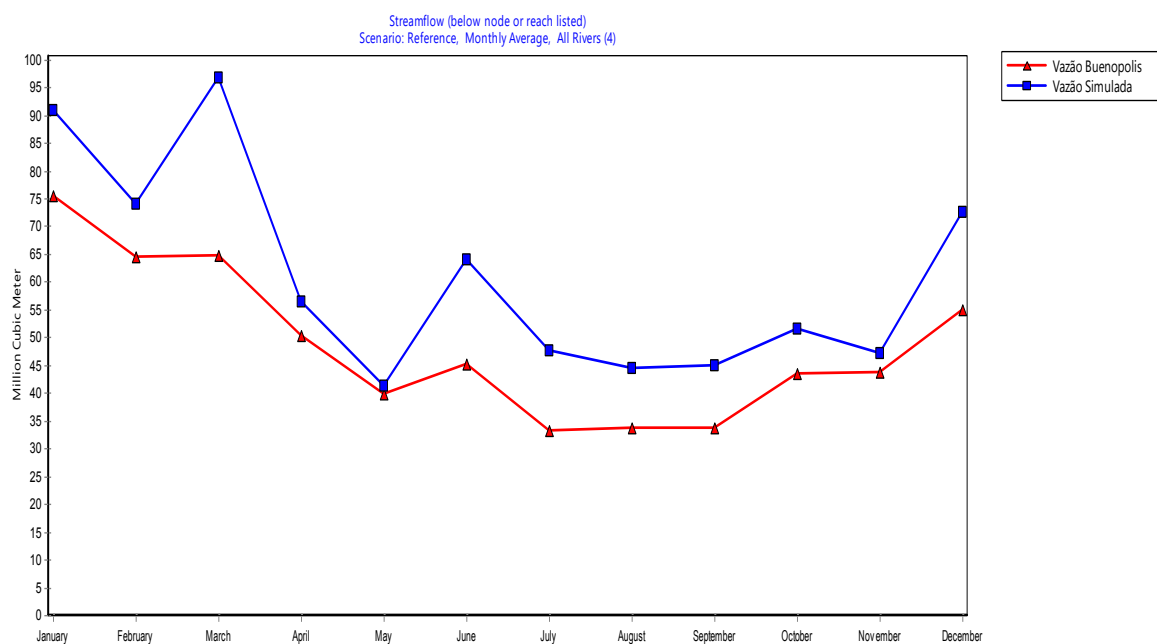


Figura 41: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Buenópolis

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

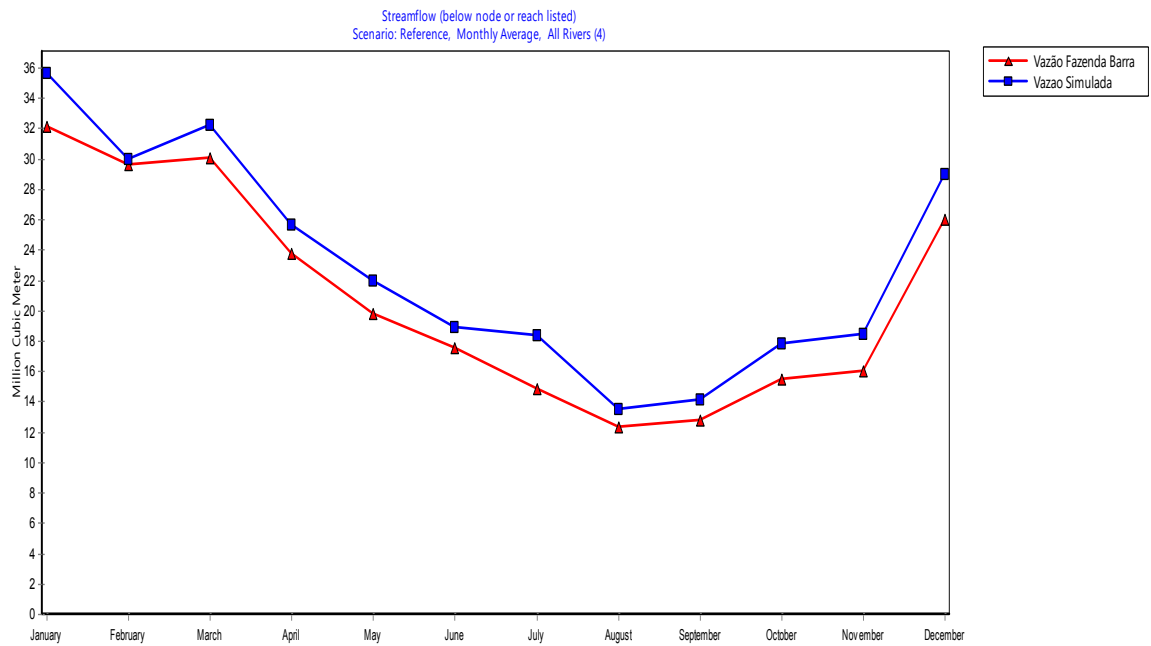


Figura 42: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Fazenda Barra

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

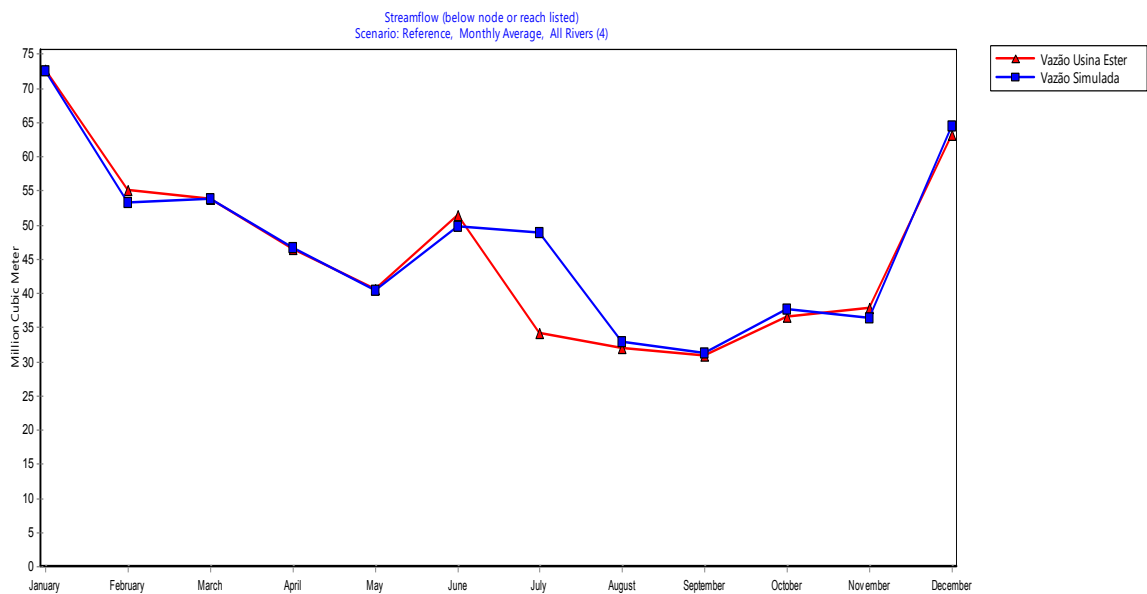


Figura 43: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Usina Ester

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

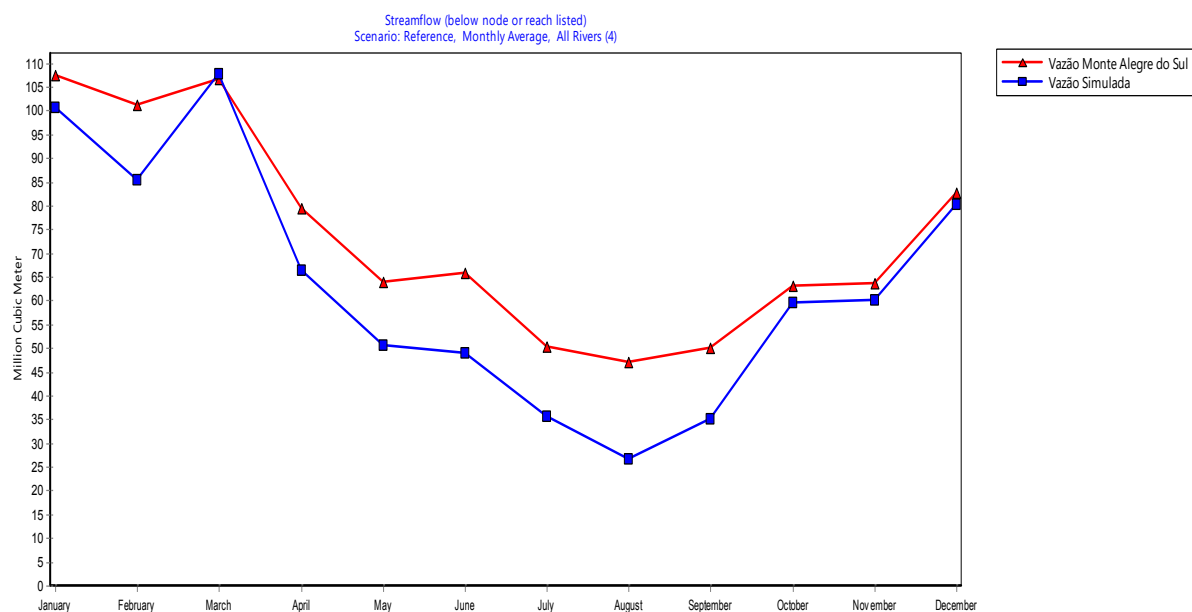


Figura 44: Calibragem do modelo hidrológico proposto na estação Monte Alegre do Sul

Fonte: Elaboração Própria (*Software WEAP*)

5.3.9. Resultados

Na Tabela 26 encontram-se os valores das demandas totais das três áreas estudadas assim como as vazões de retorno e consumidas para cada período estudado.

Tabela 26: Vazões de retirada, retorno e consumo das áreas simuladas

Retirada (m³/s)																								
Área	Abastecimento Urbano						Dessedentação Animal						Indústria						Irrigação					
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Jaguari	2,37	2,52	2,63	2,70	2,73	2,74	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07	2,11
Camanducaia	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,51	0,52	0,52	0,53	0,54	0,55
Pinhal	2,12	2,22	2,29	2,34	2,37	2,37	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	1,02	1,07	1,11	1,17	1,22	1,27

Retorno (m³/s)																								
Área	Abastecimento Urbano						Dessedentação Animal						Indústria						Irrigação					
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Jaguari	1,90	2,01	2,10	2,16	2,19	2,19	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,38	0,39	0,40	0,41	0,41	0,42
Camanducaia	0,37	0,39	0,39	0,40	0,41	0,41	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11
Pinhal	1,69	1,77	1,83	1,87	1,89	1,90	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25

Consumo (m³/s)																								
Área	Abastecimento Urbano						Dessedentação Animal						Indústria						Irrigação					
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Jaguari	0,47	0,50	0,53	0,54	0,55	0,55	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,19	1,53	1,56	1,59	1,62	1,66	1,69
Camanducaia	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,41	0,41	0,42	0,43	0,43	0,44
Pinhal	0,42	0,44	0,46	0,47	0,47	0,47	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,82	0,85	0,89	0,93	0,98	1,02

Fonte: Elaboração Própria

Para o cálculo da disponibilidade hídrica real, as demandas de água consumida das três áreas foram somadas, já que o excedente hídrico da sub-bacia de Camanducaia e de Pinhal são transmitidos a jusante para Jaguari.

Como parâmetro de oferta foram utilizadas as vazões $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_m conforme calculadas no plano de bacia das bacias PCJ (CBH-PCJ, 2011). O resultado do balanço para todos os períodos encontra-se na tabela abaixo, indicando o percentual da vazão que é consumido na área de estudo.

Tabela 27: Percentual de água consumido das vazões de referência

Vazões (m^3/s)		2015	2020	2025	2030	2035	2040
$Q_{7,10}$	12,62	45,6%	46,7%	47,6%	48,5%	49,2%	49,9%
Q_{95}	25,78	22,3%	22,8%	23,3%	23,7%	24,1%	24,4%
Q_m	57,5	10,0%	10,2%	10,5%	10,6%	10,8%	11,0%

Fonte: Elaboração Própria

De acordo com a metodologia da ANA para avaliar a disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas (item 4.2) a situação da área de estudo é considerada crítica ao utilizar a Q_{95} e se torna preocupante com o decorrer dos anos ao se utilizar a Q_m . De acordo com o relatório de situação dos recursos hídricos do comitê PCJ (CBH-PCJ, 2000), são consideradas áreas críticas aquelas em que a demanda total de água superar 50% da disponibilidade mínima $Q_{7,10}$, portanto, a situação da área estudada é preocupante já que está muito próxima ao limiar crítico.

Em relação às regras de restrição de uso de água definidas pela DAEE para a bacia do rio Jaguari (item 5.3.1), o posto fluviométrico analisado foi o Foz do Jaguari. Como a simulação do WEAP foi feita com dados mensais, o estado de restrição considerou os meses em que a média da vazão foi inferior às médias limites.

Conforme representado na Figura 45 abaixo, a partir do ano 2029 a vazão de água da foz do rio Jaguari se torna inferior ao limite de $2m^3/s$, principalmente nos períodos secos. Os dados de vazão mensais estão listados no ANEXO I.

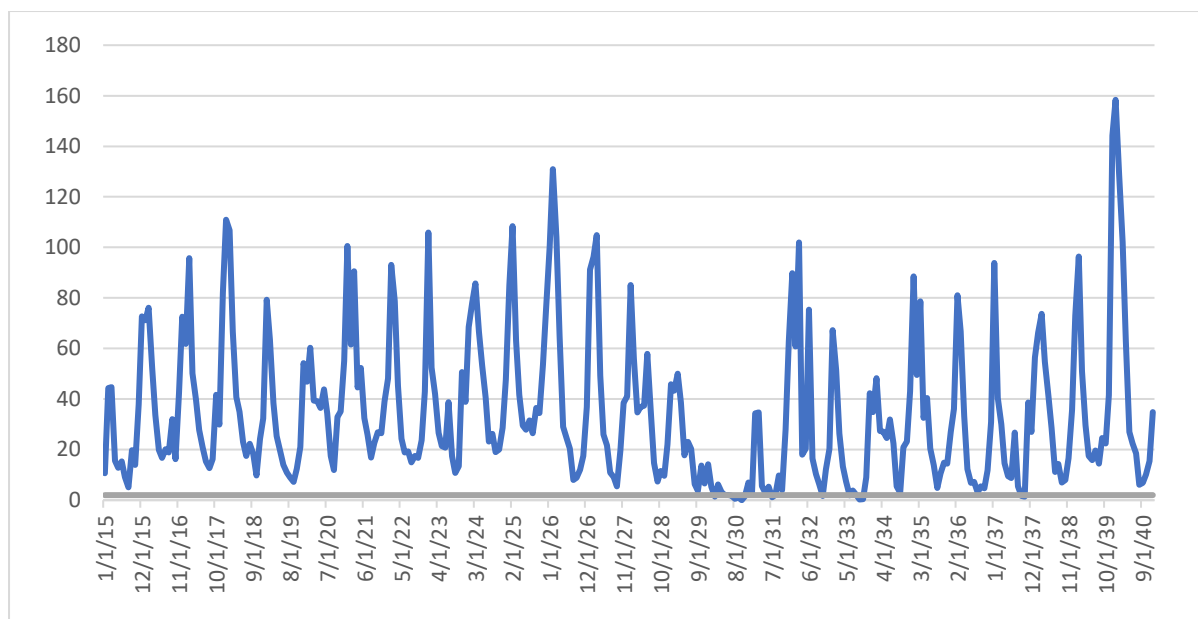


Figura 45: Vazão simulada da foz do rio Jaguarí em m³/s

Fonte: Elaboração Própria

Apesar de a demanda da REPLAN ser atendida durante todo o período simulado, as vazões nos trechos do Rio Jaguarí e Camanducaia, em alguns momentos, são menores do que o limite mínimo permitido. Nestes casos, conforme dito anteriormente, o trecho da bacia em que se localiza a REPLAN é sujeita a um período de restrição no qual indústrias são obrigadas a reduzir a captação de água em 30%, ação que influenciaria diretamente a produção da refinaria.

5.4. Discussão

A simulação realizada do parque de refino mostrou que a REPLAN, REDUC, REPAR e RPBC são as refinarias que mais consomem água. A REPLAN, apesar de ser a refinaria com a maior capacidade de processamento da unidade de destilação atmosférica, possui um coeficiente hídrico menor do que a REDUC, REPAR e RPBC. Ao analisar a capacidade de processamento das unidades e a demanda de água individualmente destas refinarias percebe-se que os processos de coqueamento retardado e alquilação possuem um peso maior em relação ao consumo de água do que os processos de hidrotratamento devido a necessidade maior de água utilizada para resfriamento.

Tratando-se especificamente do processo de coqueamento retardado, este é também conhecido como um processo de fundo de barril³¹, e é fundamental para a sobrevivência de refinarias que possuem margens cada vez menores. Além disso, este processo possibilita o refino de petróleos mais pesados e portanto, mais baratos, e ainda aumenta a produção de diesel em função do aumento no rendimento de gásóleo leve.

Com a atual tendência de aumento da demanda de diesel no país, o coqueamento retardado em conjunto com os processos de hidrotratamento são de extrema relevância (MME/EPE, 2017). Porém uma possível estratégia de aumento do processamento destas unidades nas refinarias atuais pode torná-las ainda mais suscetíveis a problemas ocasionados pela escassez de água e dependentes de processos de tratamento de água avançados. Ainda mais ao se tratar de refinarias como a REDUC, REPAR e RPBC que já se localizam em bacias que apresentam conflitos pelo uso de água.

Em relação a avaliação de disponibilidade hídrica das refinarias através dos indicadores na metodologia proposta, os dados de vazões utilizados para o cálculo referem-se à água superficial de mananciais. Todavia, as refinarias podem captar água de diferentes fontes, seja de água superficial doce, água subterrânea ou salina de forma que o resultado da análise de criticidade hídrica obtido se limita apenas a uma forma de captação. Além disso, o nível de criticidade refere-se ao aspecto quantitativo, e não qualitativo, o que exclui análises referentes ao aumento da necessidade de água e custos de tratamento em virtude da carga elevada de poluentes de um determinado manacial.

Outra questão importante da análise de disponibilidade hídrica é a localização de novas refinarias, de acordo com os resultados apresentados é possível observar que as regiões menos sujeitas a futuros conflitos em relação a água são também aquelas que estão mais distantes dos grandes centros urbanos, como no caso da REMAN. Portanto, um investimento em novos projetos de refino deve avaliar o custo-benefício da disponibilidade de água em relação aos custos decorrentes do transporte de matérias-primas e produtos.

No que concerne o balanço hídrico realizado no estudo de caso, de acordo com os resultados apresentados, a REPLAN se encontra em uma bacia hidrográfica em estado crítico. A tendência futura é que em períodos mais secos, somados a demanda crescente de água na região, não seja possível captar o volume atual utilizado pela refinaria. Desta forma, a adoção

³¹ Estes processos objetivam converter as frações residuais do processo de destilação a vácuo em frações mais leves e de maior valor agregado.

de medidas que diminuam a captação de água bruta do rio Jaguari se tornam indispensáveis para que a refinaria não corra riscos operacionais decorrentes da falta de água.

Possíveis medidas para redução ou reuso de água na REPLAN foram amplamente discutidos na literatura.

Em Nogueira (2007), durante o processo de tratamento de água bruta na estação de tratamento de água ocorre a reutilização da água removida do lodo gerado durante processo de clarificação que após tratamento com polímero é enviada para o início do processo da ETA (NOGUEIRA, 2007).

Além disso, o sistema de resfriamento utiliza água de reuso como uma parte da água necessária. Esta água é proveniente dos processos de regeneração de troca iônica, durante a primeira etapa da osmose reversa, retrolavagens da ultrafiltração e também a utilização de purgas das caldeiras. A vazão de água de reuso utilizada no sistema de resfriamento é de 59,5m³/h, equivalente a 49% do total de água utilizada pelo sistema (NOGUEIRA, 2007).

Por fim, no estudo de Lazzari Consultoria Ambiental (2005), no sistema de esgotamento de águas ácidas, o efluente é tratado para que haja a diminuição de H₂S e NH₃ e em seguida é utilizado como água fria nas unidades de coqueamento ou como água quente das dessalgadoras nas unidades de destilação. Segundo Petrobras (2005), cerca de 6,5% da água ácida tratada é enviada para as dessalgadoras (LAZZARINI CONSULTORIA AMBIENTAL, 2005).

Algumas opções adicionais às acima descritas são possíveis para a REPLAN, que podem ser divididas entre oportunidades de reuso de correntes internas e minimização de necessidade de água em processos ou, então, pela busca de outras formas de abastecimento de água. Entretanto, uma possibilidade não discutida na literatura analisada é a diminuição do consumo de água a partir de uma mudança no *blend* da carga de petróleo refinado.

Com petróleos mais leves, ou que apresentam grau API mais elevados, é possível extrair uma proporção maior de hidrocarbonetos de menor densidade e como consequência o rendimento para combustíveis como óleo diesel e gasolina é maior, sem que sejam necessários outros processos de separação como a destilação a vácuo e o coqueamento retardado e desta forma o consumo de água e a geração de efluentes é menor. Com um *blend* de carga mais doce, com menor quantidade de enxofre, diminui-se a necessidade de tratamento para a sua remoção e, portanto, também contribuem com o menor consumo de água.

Realizou-se uma simulação com a ferramenta CAESAR da REPLAN com o objetivo de verificar a variação no consumo de água ao processar óleos com características diferentes. Para isto foram feitas seis rodadas do simulador contendo em cada rodada 100% de um tipo de petróleo diferente, apresentados anteriormente na Tabela 4 com a campanha direcionada para o Diesel. A produção de derivados de cada óleo processado e a composição de óleos (*blend*) utilizada no estudo de caso estão demonstradas na Tabela 28 e o consumo de água na Tabela 29.

Tabela 28: Produção de Derivados por tipo de petróleo (Mm /ano)

Combustível	Arabe Leve	Bonny Light	Leve	Mediano RT	Pesado	Mediano	<i>Blend</i>
GLP	1.77	1.34	1.70	1.77	1.69	2.09	1.74
Gasolina	6.34	7.09	10.21	5.59	4.75	6.38	5.23
Diesel	12.72	14.61	13.80	12.52	12.19	11.48	12.37
Óleo Combustível	3.38	0.76	0.45	5.56	6.24	5.13	5.76
Coque	0.60	0.58	0.45	0.65	0.65	0.64	0.65

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 29: Consumo de água em m³/h por tipo de petróleo

Fonte de consumo de água	Árabe Leve	Bonny Light	Leve	Mediano RT	Pesado	Mediano	<i>Blend</i>
BFW	1741	1608	1487.54	1873	1860	1870	1867.6
CW	25558	24852	23386.00	25024	23766	26137	24477.0
Vapor	845	837	809.98	852	841	861	847.3
Total	2309	2189	2046.89	2384	2328	2423	2359.8

Fonte: Elaboração Própria

O óleo que mais obteve redução no consumo de água foi o leve, que apresentou uma redução total de 13,3% de água comparado com o *blend* utilizado para a simulação das refinarias neste trabalho. Este óleo tem o maior grau API e uma concentração muito baixa de enxofre em sua composição, o que justifica este resultado.

Os óleos Árabe leve e *Bonny light* também apresentaram redução no consumo de água total, porém consumiram um volume de água de resfriamento maior do que o *blend*. Este resultado se deve a característica parafínica de ambos os óleos que necessitam ser direcionados à unidade de reforma catalítica para que ocorra o aumento da octanagem da nafta proveniente da unidade de destilação.

O óleo pesado também resultou em uma diminuição do consumo de água apesar de ser levemente mais ácido que o blend e mais pesado. Isto ocorre porque o rendimento para os derivados GLP, gasolina e diesel são menores e, portanto, a carga direcionada para unidades que consomem mais água é menor.

Os óleos Mediano e Mediano RT apresentaram um consumo de água maior do que o blend apesar de apresentarem grau API maiores e menor concentração de enxofre. Este resultado também se justifica devido ao maior rendimento de gasolina.

Na Figura abaixo estão representados os resultados em percentual de redução ou aumento no consumo de água por cada tipo de petróleo analisado.

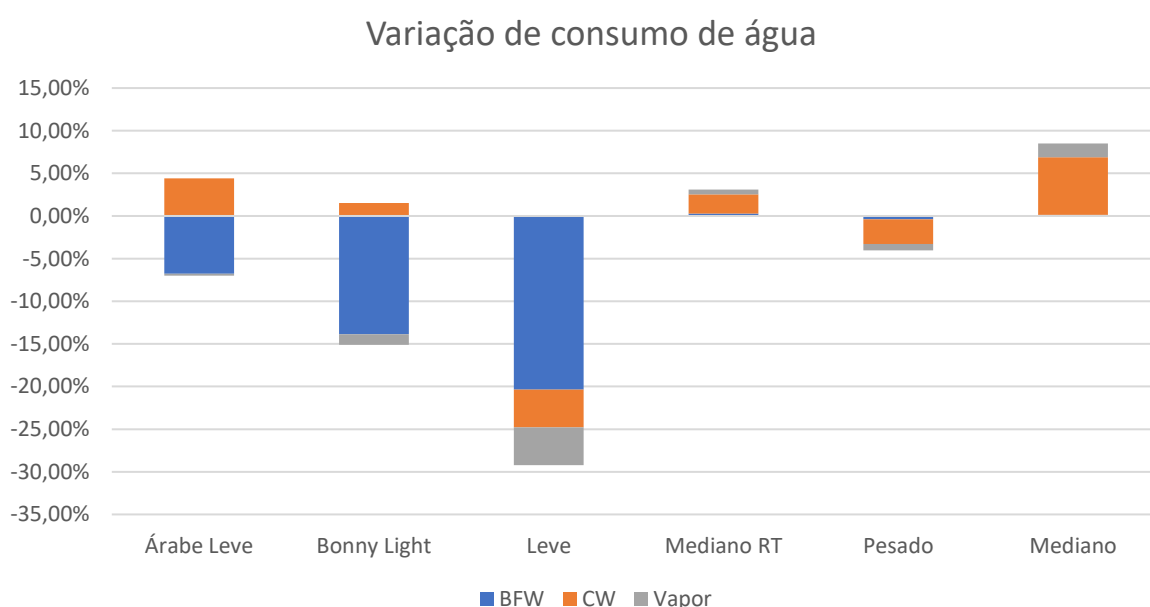


Figura 46: Variação do consumo de água por tipo de óleo processado em percentual

Fonte: Elaboração Própria

6. Considerações Finais

A água é um recurso essencial e limitado e seu uso é priorizado para o consumo animal e humano. No Brasil, apesar da abundância em água, esta não é distribuída de forma igual e os grandes centros urbanos são uns dos locais que já estão sofrendo déficit no abastecimento de água além de intensa deterioração de seus mananciais.

São nos mesmos centros urbanos em que a demanda por combustíveis é maior, o que justifica a localização de refinarias nas proximidades. Somado a isso está a especificação dos combustíveis que por questões ambientais, devem se enquadrar em padrões cada vez mais restritivos em relação concentração de contaminantes. Isto faz com que a utilização de água nas refinarias aumente consideravelmente gerando um conflito em relação ao uso de água, cada vez mais necessário nos processos de tratamento, porém cada vez mais escassa nestas localidades.

Sob esta ótica, o presente trabalho procurou avaliar a criticidade das refinarias brasileiras e discutir possibilidades para aquelas que já apresentam situações críticas de conflito em detrimento aos múltiplos usos da água na bacia em que se localizam. Para este fim, elaborou-se um estudo de caso no qual é detalhado e projetado o consumo de água de uma bacia hidrográfica crítica de forma a investigar em que medida os múltiplos usos afetam de forma direta ou indireta a operação da refinaria.

Esta dissertação foi dividida em 6 capítulos que serão descritos a seguir.

No capítulo 1 fez-se uma introdução sobre a problemática dos recursos hídricos e sua necessidade para a atividade de refino, que apresenta demanda crescente de água devido principalmente a processos de tratamento necessários para atender a especificação cada vez mais restritiva dos combustíveis. Ainda neste capítulo, foram apresentadas pesquisas que expuseram como ocorre o uso de água durante o processo de refino e buscaram possibilidades para reuso de água através de novas rotas tecnológicas ou a partir do aproveitamento de correntes de dentro das refinarias.

No capítulo 2 apresentou-se o histórico do parque de refino brasileiro, sua capacidade atual e a localização das refinarias. A seguir, detalhou-se as unidades de processo mais comuns e os processos auxiliares relacionados ao tratamento de água.

No capítulo 3 apresentou-se brevemente os diversos usos de água, a diferença entre retirada de água e seu consumo e também as principais características de cada região brasileira em relação a disponibilidade de água. Neste mesmo capítulo foi descrita a política nacional de recursos hídricos (PNRH), seus princípios e instrumentos e definiu-se o que é a disponibilidade hídrica em uma área de drenagem e as possíveis formas de calculá-la.

No capítulo 4 apresentou-se a metodologia utilizada nesta pesquisa que foi definida em três partes principais:

- I. Simulação do parque de refino;
- II. Análise das condições das bacias hidrográficas em que há infraestrutura de refino;
- III. Estudo de caso aplicado à uma refinaria específica, a REPLAN

Na primeira parte realizou-se uma simulação do parque de refino brasileiro entre os períodos de 2010 e 2040 através da utilização da ferramenta *Carbon and Energy Strategy Analysis for Refineries* (CAESAR). Esta ferramenta foi adaptada para calcular a demanda de água em função dos dados de capacidade de produção, composição da carga processada e campanha. Foram inseridos no CAESAR coeficientes de utilização de água nas torres de resfriamento e nas caldeiras, separados por unidade de processo, e, para se obter o valor de demanda de água na refinaria, utilizou-se o valor de 70% em relação ao total de água utilizada nas caldeiras, 3,5% da água utilizada para as torres de resfriamento e 33% para a quantidade de vapor consumido nas unidades de processo.

Na segunda parte realizou-se uma análise das condições atuais das bacias hidrográficas as quais estão inseridas as refinarias. O primeiro passo foi identificar quais são estas bacias hidrográficas através do georreferenciamento das refinarias sobre o shapefile das bacias hidrográficas brasileiras de nível I. Após a identificação, utilizaram-se dois indicadores conforme metodologia aplicada pela Agência Nacional de Águas (ANA) em que se calcula a criticidade de uma bacia em relação a um valor percentual que é resultado do uso de uma vazão referência em relação a demanda total da bacia em questão. As vazões de referência utilizadas foram as vazões com 95% de permanência (Q_{95}) para o indicador I e as vazões médias para o indicador II (Q_m). Desta forma obtiveram-se os valores percentuais de criticidade das bacias e, conseqüentemente, a situação a qual inserem-se as refinarias brasileiras em relação a disponibilidade de água.

Na terceira parte optou-se pela realização de um estudo de caso para que o conflito entre os múltiplos usos de água e sua consequência para a refinaria pudessem ser analisados de forma mais detalhada. Para este fim, a ferramenta Water Evaluation and Planning (WEAP) foi utilizada para a realização de um balanço hídrico na região de estudo. Ainda nesta parte foi feito um detalhamento dos dados de entrada e considerações a serem feitas no modelo hidrológico e também descritas as metodologias de cálculo utilizadas para a projeção futura das demandas para abastecimento urbano, dessedentação animal, irrigação e industrial no período compreendido entre 2015 e 2040. Por fim, demonstrou-se a metodologia utilizada para calibrar o modelo que são o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe e o índice BIAS.

No capítulo 5 fez-se a apresentação dos resultados desta dissertação. Em relação ao estudo de caso para a refinaria de Paulínia, localizada na bacia PCJ, bacia que apresentou índices de disponibilidade de água críticos. Primeiramente, descreveu-se a área de captação que influencia a disponibilidade de água na refinaria, representada pelas sub-bacias dos rios Jaguari e Camanducaia, ambas inseridas na bacia do rio Piracicaba. Para a utilização do WEAP, a metodologia do programa foi a simplified coefficient Method - Rainfall Runoff, cujos dados necessários para a arranjo do modelo são os dados pluviométricos, obtidos no departamento de água e energia elétrica e São Paulo (DAEE) e valores de evapotranspiração, fornecidos pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) e para a calibração, os dados fluviométricos, também obtidos na DAEE.

Ainda neste capítulo, apresentam-se as premissas utilizadas para a simulação do parque de refino, avaliação da disponibilidade hídrica e a construção do balanço hídrico, como o cálculo das demandas de água na área de estudo e seus resultados, os requisitos mínimos de fluxo adotados, as importações e exportações de água dentro da bacia e a ordenação de prioridade para o uso da água. Como a metodologia utilizada no modelo é simplificada, necessitou-se da adição de reservatório para simular o armazenamento de água na bacia e proporcionar um comportamento da bacia mais próximo da realidade.

Em seguida, são apresentados os resultados da calibragem do modelo no qual foram comparados os dados de seis estações fluviométricas com as vazões dos trechos de rio modelados na mesma localidade. A estação de Buenópolis apresentou um índice de eficiência de Nash-Sutcliffe ligeiramente abaixo do valor satisfatório, porém optou-se por manter o modelo hidrológico simulado já que esta estação está localizada a montante das estações Jaguariúna-Antártica e Foz do Jaguari, ambas obtiveram um bom resultado na calibração e a

região próxima à estação de Buenópolis não apresentou problemas relacionados ao não atendimento da demanda de água.

Por fim, apresentam-se os resultados do balanço hídrico no qual conclui-se que a análise somente em relação a demanda da REPLAN, o trecho do rio Jaguari onde ocorre a captação não atinge a vazão ecológica, por conseguinte, a refinaria tem sua demanda atendida até o fim do período estudado. Contudo, ao se analisar o posto de controle Foz do Jaguari, trecho do rio em que o comitê da bacia PCJ determinou uma medida de gerenciamento de recursos hídricos ao estabelecer um valor de vazão limite de $2\text{m}^3/\text{s}$, vazões que sejam menores que este valor levam a região a qual a REPLAN se insere em um estado de restrição no qual deve-se diminuir em 30% a vazão de captação industrial. Esta medida afeta diretamente a REPLAN pois a vazão projetada do modelo hidrológico na localidade da estação foz do Jaguari chegou a valores abaixo de $2\text{m}^3/\text{s}$, principalmente durante o período seco, entre abril e outubro. Desta forma, conclui-se que com o aumento de captação de água para os múltiplos usos dentro da bacia, aumenta-se também o conflito gerado que tem como consequência restrições ao uso de água da REPLAN.

A partir dos resultados desta dissertação conclui-se que as refinarias de petróleo podem sofrer restrições na utilização de água por efeito da disputa de água entre as múltiplas demandas de uma mesma bacia, principalmente quando a região é próxima de áreas caracterizadas pela urbanização intensiva e agropecuária, que além de demandarem água acabam por deteriorar os recursos hídricos da região.

Este trabalho apresenta algumas limitações apesar de a metodologia ter sido satisfatória em averiguar a questão dos recursos hídricos em refinarias tanto pelo lado da demanda, quanto da oferta de água.

Primeiramente, o simulador do parque de refino CAESAR utiliza os coeficientes de reposição da água das torres de resfriamento de maneira geral, pois não se considerou a utilização de outras tecnologias e seus devidos coeficientes de consumo de água.

Outro ponto importante é que no simulador existem apenas as unidades de processo principais, não estão incluídas as unidades auxiliares como as estações de tratamento de água. Além disso, não é possível simular a geração de efluentes.

Em relação ao balanço hídrico, utilizou-se uma metodologia simplificada que desconsidera a absorção da água pelo solo e as reservas de água disponíveis nos aquíferos.

Sendo assim, recomendações para trabalhos futuros incluem a adição de unidades auxiliares no simulador CAESAR, de forma que seja possível quantificar a geração de efluentes e ainda estimar os contaminantes típicos em função do tipo de petróleo usado para o processamento. Desta forma será possível estudar e propor rotas tecnológicas para as refinarias de forma mais realista e também analisar seus custos de implementação e operação.

Em relação as novas refinarias, de acordo com o modelo proposto por este trabalho é possível concluir que a localização em função do estudo mais detalhado da disponibilidade de água para captação da refinaria se torna indispensável, pois futuras restrições da captação de água podem limitar os processos de produção. Caso haja planejamento que considere este recurso, será possível projetar as refinarias previamente com sistemas mais eficientes de reuso de água e tratamentos de efluentes avançados. Neste estudo foi demonstrado que as bacias hidrológicas que são menos sujeitas a futuros conflitos em relação a água são também aquelas que estão mais distantes dos grandes centros urbanos. Necessita-se, então, de um estudo que leve em consideração o custo da captação de água, tratamento e demais tecnologias associadas em relação ao custo logístico relacionado ao transporte de matéria-prima e produtos gerados.

Por fim, valeria estudar-se como as Mudanças Climáticas Globais poderiam impactar o balanço hídrico, tanto pelo lado da oferta quanto pelo lado da demanda, e, assim, afetar a disponibilidade de água para refinarias brasileiras.

Referências Bibliográficas

ALTMAN, S. J.; JENSEN, R. P.; CAPPELLE, M. A.; SANCHEZ, A. L.; EVERETT, R. L.; ANDERSON, H. L.; MCGRATH, L. K., 2012. **Membrane treatment of side-stream cooling tower water for reduction of water usage**. Desalination, v. 285, p. 177–183, 31 jan. 2012.

AMORIM, R. da S, 2005. **Abastecimento de água de uma refinaria de petróleo - Caso Replan**. 2005. p,193 Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão) - Programa de Pós-Graduação em Sistema de Gestão da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2005.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <<http://sar.ana.gov.br/MedicaoCantareira?dropDownListReservatorios=29001&dataInicial=01%2F01%2F2010&dataFinal=01%2F01%2F2016>>. Acesso em: 29 mai. 2017.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cadernos de Recursos Hídricos: Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. 134p. Brasília, 2005. ANA,2005.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Metadados ANA**. 2017a. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>. Acesso em: 25 jan. 2017. ANA, 2017a.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **ATLAS - Abastecimento Urbano de Água**. 2007b. Agência Nacional de Águas, 2007. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=6>>. Acesso em: 20 maio. 2016. ANA,2007b.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual De Procedimentos Técnicos E Administrativos De Outorga De Direito De Uso De Recursos Hídricos Da Agência Nacional De Águas**. p252. Brasília. 2013. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sof/MANUALDEProcedimentosTecnicoseAdministrativosdeOUTORGadeDireitodeUsodeRecursosHidricosdaANA.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2016. ANA, 2013.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Regiões Hidrográficas**. 2015a. Agência Nacional de Águas, Brasília, 2015. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/regioeshidrograficas.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2015.

ANA, 2015a.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil** - Informe 2015b. Agência Nacional de Águas, p88 Brasília, 2015. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_2015.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2015. ANA, 2015b.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Encarte Especial sobre a Crise Hídrica**. 2014. Agência Nacional de Águas, p88 Brasília, 2014. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/crisehidrica.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2015. ANA, 2014.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos**. 2017. Agência Nacional de Águas, 177p, Brasília. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/>>. Acesso em: 13 jan. 2018.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DE SÃO PAULO. **Dados de Referência Acerca da Outorga do Sistema Cantareira**. 135p, 2016. Disponível em: <<http://www.daee.sp.gov.br/images/documentos/cantareira/ddr.pdf>> DAEE, 2016.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2017**. 263p, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/anuario-estatistico/2017/Textos/Secao2.pdf>>. Acesso em: 6 set. 2017. ANP, 2017

ANZE, M. **Otimização Do Uso De Água Em Refinarias De Petróleo**. 2013. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade de São Paulo, 2013.

BARBOSA, F. L. **Regulamentação do reuso da água em refinarias - Análise do modelo americano e perspectivas para o cenário nacional**. 2007. 265p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

BARROS, M. M. **Análise Da Flexibilidade Do Refino De Petróleo Para Lidar Com Choques De Demanda De Gasolina No Brasil**. 2014. 142p, Tese (Doutorado em Ciências) Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

BRASIL. **LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997**. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 10 mar. 2017.

BRITO, L. P. G. De; CAVENAGHI, S.; JANNUZZI, P. D. M., 2010. **Estimativas e projeções populacionais para pequenos domínios: uma avaliação da precisão para municípios do Rio de Janeiro em 2000 e 2007**. v. 27, n. 1, p. 35–57, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbepop/v27n1/04.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

CBH-PCJ - COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDUAÍ. 2000. **Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. v. 1º, p. 505, São Paulo 2000.

CBH-PCJ - COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDUAÍ. 2008. **Plano de Bacias PCJ para o quadrênio 2008-2011**. São Paulo, 2008.

CBH-PCJ - COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDUAÍ. 2011 **Relatório de Gestão e Situação das Bacias PCJ 2011**. Relatório sobre a execução do Contrato de Gestão nº 003/ANA/2011. p.79. São Paulo, 2011.

CETESB. **Licenciamento Ambiental Prévio de ampliação da Refinaria RPBC do empreendimento Carteira de Diesel**. 2011 47p, Cubatão. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/consema/2011/11/oficio_consema_2011_017/Parecer_Tecnico_CETESB_4055_11_TA_sobre_o_EIA-RIMA_da_Carteira_de_Diesel_da_RPBC.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2016. CETESB, 2011.

CIIAGRO. **Centro integrado de informações agrometeorológicas**. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

COBRAPE. **Plano das Bacias Hidrograficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010-2020: Relatório final**. São Paulo. p. 780, 2010

COLLARES, S. **Avaliação de uso de recursos hídricos em refinarias de petróleo: Um estudo de caso na Petrobrás**. 2004. p.150 Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão) - Programa de Pós-Graduação em Sistema de Gestão da Universidade Federal Fluminense, 2004.

COMITESINOS. **Relatório Executivo do Plano da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos - REP**. 2014. 120p, Porto Alegre. Disponível em: <http://www.comitesinos.com.br/arquivos/1--plano-de-bacia---relatorio-executivo-do-plano---fase-c-2017-07-03-1499110935.pdf>> Acesso em: 15 maio. 2016.

DAEE. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DE SÃO PAULO. **Banco de dados hidrológicos**. Disponível em: <<http://www.hidrologia.daee.sp.gov.br/>>. Acesso em: 15 maio. 2016.

DAEE. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DE SÃO PAULO. **Outorga e Cadastro**. Disponível em: <<http://www.agencia.baciaspcj.org.br/novo/instrumentos-de-gestao/outorga-e-cadastro>>. Acesso em: 23 maio. 2016.

EERE. ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY 2011. **Cooling towers: Understanding Key Components of Cooling Towers and How to Improve Water Efficiency**. U.S. Department of Energy. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/waterfs_coolingtowers.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2018.

MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. 2017. Ministério de Minas e Energia. Empresa De Pesquisa Energética 309p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026_versao_para_publicacao_08dez2017.pdf/f5d8f999-566d-4f5b-9167-d80b6ea8924e>. Acesso em: 22 jan. 2018. MME/EPE, 2017

FABHAT. **Relatório De Situação Dos Recursos Hídricos Bacia Hidrográfica Do Alto Tietê -Ugrhi-06**. 2017. Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. Disponível em: 123p. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-AT/12322/relatorio_situacao_dos_recursos_hidricos_ugrhi_06_2017.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2018. FABHAT, 2017.

FAO. **Coping with water scarcity - Challenge of the twenty-first century**. 2007, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 29p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-aq444e.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2017. FAO, 2007.

FREITAS, A. A. De; BEZERRA, F.; FONTENELE, F. das C. B., 1999 **Determinação Da Evapotranspiração Máxima E Real E Do Fator De Sensibilidade Ao Déficit Hídrico Da Melancia Em Canindé**, CE. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 3, n. 3, p. 298–303, 1999. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v3n3/1415-4366-rbeaa-03-03-0298.pdf>>.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgar

Blücher Ltda., 1988. 291p.

GARY, J. H.; HANDWERK, G. E. **Petroleum Refining Technology and Economics**. 4th Editio ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.

GASPARINI, M. C. **Águas De Processo Da Replan: Qualidade E Aplicação De Processos Oxidativos Avançados**. 2011.171p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Caminas, 2011.

GOLDEMBERG, J.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; LUCCHESI, R. **Oil and natural gas prospects in South America: Can the petroleum industry pave the way for renewables in Brazil?** Energy Policy, v. 64, p. 58–70, jan. 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513004163>>. Acesso em: 16 out. 2017.

GONDIM, N. de M., **Alternativas Para Redução Do Consumo De Água E Energia Em Sistemas De Água De Resfriamento E Geração De Vapor Em Refinarias De Petróleo Do Brasil**. 2014. 195p, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) do Programa de Engenharia ambiental da Escola de Química da Universidades Federal do Rio de Janeiro, 2014

GUEDES, F. P. D. C. **Avaliação De Alternativas Para Redução Do Uso Final De Energia No Setor De Refino De Petróleo Brasileiro E Estimativa De Custos De Abatimento De Emissões De Gases De Efeito Estufa**. 2015.178p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

HESPANHOL, I. **Potencial de Reuso de Água no Brasil Agricultura, Industria, Municípios, Recarga de Aquíferos**. Out, v. 7, n. 4, p. 75–95, 2002.

HWANG, S.; MOORE, I. **Water network synthesis in refinery**. Korean Journal of Chemical Engineering, v. 28, n. 10, p. 1975–1985, 29 jul. 2011.

IBGE.- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA **Censo Demográfico 1991**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censodem/default_censo1991.shtm>. Acesso em: 5 mar. 2016. IBGE, 1991.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2000**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/defaulttab_munic.shtm>.

Acesso em: 5 mar. 2016. IBGE, 2000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas do censo demográfico 2010**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em: 5 mar. 2016. IBGE, 2010.

IGAM. **Relatório Anual Situação e Gestão dos Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais**. 2015. 198p Instituto Mineiro de Gestão de Águas. Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2017/DIVERSOS/Relat%C3%B3rio_de_Gest%C3%A3o_e_Situa%C3%A7%C3%A3o_dos_Recursos_H%C3%ADricos_2015_revisado_29_12_2017.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2016. IGAM, 2015

IGAM. **Portal Infohidro**. Informações sobre Recursos Hídricos. Instituto Mineiro de Gestão de Águas. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/>>. Acesso em: 5 abr. 2016. IGAM, 2016.

IPIECA. **Petroleum Refining Water/Wastewater Use and Management**. [s.l: s.n.]. International Petroleum Industry Environmental Conservation and Association. Disponível em: <http://www.perf.org/images/Archive_Refining_Water.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2016.

JULIÃO, A. dos S.; TOUMA, S. L. **Histórico, Panorama e Cenários Futuros do Reúso de Água na Petrobras** —. 2015. Disponível em: <http://ahkbusiness.de/fileadmin/ahk_business_br/02_Agenda-Events/Evento_Hidrico/13_Andrea_dos_Santos_Juliao_Petrobras.pdf>.

KNUST, C. M. **Análise De Superfícies De Resposta Para Projeto De Unidades De Tratamento De Águas Ácidas**. 2013. 165p. Dissertação (Mestrado em Ciências) Programa de Pós-Graduação em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.h2cin.org.br/download/superficies-de-resposta-para-projeto-de-unidades-de-tratamento-de-aguas-acidas.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

LAZZARINI CONSULTORIA AMBIENTAL. **Estudo de Impacto Ambiental da Modernização da Refinaria De Paulínia**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Replan-EIA_Item-5.pdf>.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **Four billion people facing severe water scarcity**. Science Advances, v. 2, n. 2, 2016. Disponível em:

<<http://advances.sciencemag.org/content/2/2/e1500323/tab-figures-data>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

MEYERS, R. A. **Handbook of Petroleum Refining Processes**. 3rd Editio ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2004.

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste**. 2006 Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos 106p, Brasília. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024223.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2016. MMA, 2006a.

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental**. 2006 Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos 148p, Brasília. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024510.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2016. MMA, 2006b

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica Amazônica**. 2006 Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos 126p, Brasília. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024915.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2016. MMA, 2006c

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Paraná**. 2006. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos 256p, Brasília. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011023747.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2016. MMA, 2006d

MMA. **Caderno da região hidrográfica do Atlântico Sul**. MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Paraná**. 2006. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos 132p, Brasília. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024106.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2016. MMA, 2006d

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. 2006. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos 152p, Brasília. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011023538.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2016. MMA, 2006e

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Atlântico Leste**. 2006. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos 160p, Brasília. Disponível em: <

http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011024710.pdf>.

Acesso em: 2 ago. 2016. MMA, 2006f

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. Van; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L.; ARNOLD, J. G.; LIEW, C. W. Van; MORIASI, D. N. **Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations**. Transactions of the ASABE, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

NOGUEIRA, D. M. **Balanço Hídrico na Refinaria de Paulínia e Alternativas para Reuso de Água: Construção de uma Ferramenta Auxiliar para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas Universidade Estadual de Campinas, 2007.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO.2004a **Estimativa das Vazões para Atividades de Uso consuntivo da água em bacias do sistema interligado nacional - SIN**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.ceivap.org.br/downloads/Relatorio final ONS.pdf](http://www.ceivap.org.br/downloads/Relatorio_final_ONS.pdf)>. Acesso em: 27 dez. 2016.ONS, 2004a

ONS. **Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas**. 2004. 61p. Rio de Janeiro, Disponível em: www.ons.org.br/download/operacao/hidrologia/rel_evaporacao_08_02_2006.pdf. Acesso em 17 set 2016.

PEREIRA, D. R.; ULIANA, E. M.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, D. D. **Desempenho De Um Modelo Hidrológico Concentrado E De Um Semidistribuído Na Predição De Vazões Diárias**. IRRIGA, v. 21, n. 2, p. 409–424, 2016.

PETROBRAS. **Tecnologia Petrobrás 2013**.2014. 78p. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/relatorio-apresenta-nossos-principais-resultados-de-2014-na-area-de-tecnologia.htm>>. PETROBRAS, 2014a.

PETROBRÁS. **Plano Estratégico PETROBRAS 2030**. Petrobras, v. 1, p. 5–54, 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/plano-estrategico-2030-e-plano-de-negocios-e-gestao-2014-2018.htm>>. PETROBRAS, 2014b.

PETROBRÁS. **Relatório Anual De Acordo Com O Artigo 13 Ou 15(D) Da Lei De Valores Mobiliários De 1934 para o exercício fiscal findo em 31 de dezembro de 2014**.

2015, 312p. PETROBRAS, 2015.

POMBO, F. R. 2011 **Gestão da Demanda de Água na Indústria de Refino de Petróleo: Desafios e Oportunidades de Racionalização**. p. 169, 2011. Tese (Doutorado em Ciências) Programa de Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Dados de Monitoramento do Sistema Cantareira**. Disponível em: <<http://www2.sabesp.com.br/mananciais/dadoscantareira/DadosRepresa.aspx>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

SCHOR, A. R. **Riscos E Alternativas Para O Abastecimento De Água Em Uma Refinaria De Petróleo Estudo De Caso: Refinaria Duque De Caxias - Reduc**. 2006. Dissertação (Mestre em Ciências) Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa de Uso e Cobertura da Terra UGRHI 5 (PCJ) | CPLA - Sistema Ambiental Paulista - Governo de SP**. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/cpla/mapa-de-uso-e-ocupacao-da-terra-ugrhi-5-pcj/>>.

SIDRA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo/acervo9.asp?e=c&p=PP&z=t&o=24>>. Acesso em 3 fev 2016.

SIEBER, J.; PURKEY, D. **Water Evaluation And Planning System User Guide**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf>.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de água e esgoto - 2014**. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Acesso em: 4 ago 2016. SNIS, 2014.

STANISLAUS, A.; MARAFI, A.; RANA, M. S. **Recent advances in the science and technology of ultra low sulfur diesel (ULSD) production**. Catalysis Today, v. 153, n. 1–2, p. 1–68, 2010.

SUDENE - SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO SUDESTE. **Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste**. Disponível em:

<http://www.sudene.gov.br/area-de-atuacao/regiao-nordeste-estatisticas/nordeste-em-numeros/caracterizacao-do-territorio-nordestino>. Acesso em: 4 ago 2016. SUDENE, 1998

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C.; BONFÁ, M. H. P. **Fundamentos do Refino do Petróleo. Tecnologia e Economia**. 3a Edição ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012.

TOLMASQUIM, M. T.; SZKLO, A. S. **Matriz Brasileira na Virada do Milênio**. Rio de Janeiro: COPPE UFRJ, 2000.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI : enfrentando a escassez**. [s.l.] RiMa, 2003.

VAN LIMPT, B.; VAN DER WAL, A. **Water and chemical savings in cooling towers by using membrane capacitive deionization**. Desalination, v. 342, p. 148–155, jun. 2014.

VANELLI, C. A. **Conservação De Água Em Refinaria De Petróleo : O Caso Da Revap**. 2004. p. 151, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá 2004.

VASQUEZ, E.; SOUZA, L.; GUEDES, F.; ROCHEDO, P.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; LUCENA, A. **A Disponibilidade Hídrica Como Possível Restrição Ambiental Para A Produção De Derivados De Petróleo No Brasil**. In: Rio Oil & Gas, **Anais...** 2016.

VENKATESH, M.; COX, R. **Improving water management in refining operations : minimizing consumption and maximizing re-use**. In: 20th World Petroleum Congress, Doha. **Anais...** Doha: 2011.

ANEXO 1: Análise do preenchimento dos dados de precipitação

Código	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
D3-001	12		11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	6									
D3-004																			7	12	12	12	11	12	12		12	12	4								
D3-005												5	12	11	12	11	12	12	12	12	12	12	12	9													
D3-009	6	11	11	8	11	12	12	8	6	9	10	7	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	
D3-010	3	12	12	8	7	12	3		12	12	12	9	1	12	11	12	11	9	8	9	6	3	5	5	5												
D3-011	12	12	12	11	11	12																															
D3-018	12	12	12	12	11	11	12	12	9	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	
D3-023																			5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
D3-027	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	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
D3-029	12	12	11	8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6								
D3-031	12	11	10	11	12	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	12	12	
D3-035	10	11	7	12	7	7	9	9	4	8	8	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	
D3-036	12	12	12	12	12	12	12	12	7	1	8	12	12	11	12	12	12	12	11	12	11	11	11	11	11	12	9	11	11	12	12	12	12	11	12	12	
D3-042	6	7	8	5	5	7	9	9	9	12	11	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
D3-046					3	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	12	10	
D3-052			9	12	12	12	10	10							10	12	12	11	12	12	12	12	11	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
D3-054										12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	9	12	12	10	12	10	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	
D3-063																												11	12	12	12	12	12	12	12	12	12
D3-064																												7	12	12	12	12	12	12	12	12	12
D3-065																												7	12	12	12	12	12	12	12	12	12
D3-068																													8	12	12	12	12	12	12	12	12
D3-072																																					
D4-038	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	12	12	12	12	9			
D4-052	7	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	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	
D4-082							4	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	
D4-099																												3	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Código	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	2011	2012	2013	2014	2015
D3-001																																				
D3-004																																				
D3-005																																				
D3-009	10	11	9	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	11	12	12	11	12	12	12
D3-010																																				
D3-011																																				
D3-018	12	10	10	12	12	12	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	11	10	12	11	11	12	
D3-023	12	12	12	12	12	12	12	11	10	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	12	12
D3-027	12	12	11	12	12	12	12	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	11	12	12	12
D3-029																																				
D3-031	11	9	12	12	12	12	11	12	9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	9	12	12	12	12	12	12	6	6	5	1	10	12	12	12	12
D3-035	12	12	12	11	12	11	11	12	12	12	12	12	12	11	11	9	1	7	12	12	12	12	12	11	11	12	2	10	7	4	8	9	11	11	9	7
D3-036	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	8	10	9	11	10	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12
D3-042	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	7	12	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
D3-046	12	12	12	11	7	12	8	9	12	9	12	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	11	11
D3-052	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	12	12	12	12	12	10	2	12	12	12	12
D3-054	12	12	11	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	12	12	12	12	12	12	12
D3-063	11	12	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	8		3	12	12	9	11	12	12	12	12	12	12	8	12	12	12	12	12	12	11
D3-064	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	6	12	12	11	2																		
D3-065	12	11	12	12	12	12	12	12	11	12	12	12	11	10	4	8	4	4	3	2																
D3-068	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11																					
D3-072			12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12			12																				
D4-038																																				
D4-052	12	11	10	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	12	12	12	12
D4-082	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	10	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11
D4-099	12	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	11	12	12	12	12	12

ANEXO II: Vazões simuladas para o posto pluviométrico Foz do Jaguarí

Data	Vazão	Data	Vazão	Data	Vazão	Data	Vazão	Data	Vazão
1/01/2015	10.66	1/01/2018	110.91	1/01/2021	100.58	1/01/2024	68.52	1/01/2027	91.19
1/02/2015	44.33	1/02/2018	106.74	1/02/2021	61.55	1/02/2024	78.19	1/02/2027	96.24
1/03/2015	44.68	1/03/2018	66.58	1/03/2021	90.62	1/03/2024	85.7	1/03/2027	104.91
1/04/2015	15.55	1/04/2018	40.79	1/04/2021	44.59	1/04/2024	66.69	1/04/2027	49.29
1/05/2015	12.86	1/05/2018	35.01	1/05/2021	52.38	1/05/2024	53.39	1/05/2027	26.03
1/06/2015	15.34	1/06/2018	23.12	1/06/2021	32.43	1/06/2024	40.54	1/06/2027	21.64
1/07/2015	9.19	1/07/2018	17.45	1/07/2021	25.86	1/07/2024	23.22	1/07/2027	10.97
1/08/2015	4.04	1/08/2018	22.29	1/08/2021	16.87	1/08/2024	26.28	1/08/2027	9.13
1/09/2015	19.78	1/09/2018	18.31	1/09/2021	22.58	1/09/2024	18.98	1/09/2027	5.42
1/10/2015	13.98	1/10/2018	9.72	1/10/2021	26.84	1/10/2024	20.02	1/10/2027	19.74
1/11/2015	37.9	1/11/2018	24.19	1/11/2021	26.47	1/11/2024	28.67	1/11/2027	38.49
1/12/2015	72.66	1/12/2018	32.33	1/12/2021	38.97	1/12/2024	47.68	1/12/2027	41
1/01/2016	71.13	1/01/2019	79.28	1/01/2022	48.17	1/01/2025	84.97	1/01/2028	85.08
1/02/2016	76.14	1/02/2019	63.46	1/02/2022	93.04	1/02/2025	108.36	1/02/2028	56.09
1/03/2016	52.51	1/03/2019	38.35	1/03/2022	78.78	1/03/2025	63.1	1/03/2028	34.77
1/04/2016	33.71	1/04/2019	25.32	1/04/2022	45.31	1/04/2025	41.69	1/04/2028	36.83
1/05/2016	19.89	1/05/2019	19.37	1/05/2022	24.36	1/05/2025	29.47	1/05/2028	37.42
1/06/2016	16.8	1/06/2019	13.94	1/06/2022	18.9	1/06/2025	27.91	1/06/2028	57.95
1/07/2016	20.15	1/07/2019	10.88	1/07/2022	19.29	1/07/2025	31.59	1/07/2028	34.82
1/08/2016	18.93	1/08/2019	9.03	1/08/2022	15.02	1/08/2025	26.5	1/08/2028	14.73
1/09/2016	32.09	1/09/2019	7.25	1/09/2022	17.48	1/09/2025	36.54	1/09/2028	7.34
1/10/2016	16.24	1/10/2019	12.39	1/10/2022	16.73	1/10/2025	34.43	1/10/2028	11.59
1/11/2016	42.38	1/11/2019	21	1/11/2022	23.74	1/11/2025	53.58	1/11/2028	9.67
1/12/2016	72.53	1/12/2019	54.26	1/12/2022	42.93	1/12/2025	76.25	1/12/2028	22.02
1/01/2017	61.76	1/01/2020	46.86	1/01/2023	105.83	1/01/2026	100.37	1/01/2029	45.89
1/02/2017	95.71	1/02/2020	60.3	1/02/2023	52.41	1/02/2026	130.94	1/02/2029	43.35
1/03/2017	50.11	1/03/2020	39.43	1/03/2023	41.99	1/03/2026	104.05	1/03/2029	49.98
1/04/2017	39.74	1/04/2020	39.09	1/04/2023	26.6	1/04/2026	64.88	1/04/2029	38.62
1/05/2017	27.78	1/05/2020	36.53	1/05/2023	21.46	1/05/2026	29.01	1/05/2029	17.72
1/06/2017	20.82	1/06/2020	43.88	1/06/2023	20.73	1/06/2026	24.44	1/06/2029	23.03
1/07/2017	15.39	1/07/2020	34.4	1/07/2023	38.8	1/07/2026	20.45	1/07/2029	20.26
1/08/2017	12.75	1/08/2020	17.44	1/08/2023	17.41	1/08/2026	8.05	1/08/2029	6.32
1/09/2017	16.29	1/09/2020	11.97	1/09/2023	10.73	1/09/2026	8.87	1/09/2029	3.65
1/10/2017	41.72	1/10/2020	32.91	1/10/2023	13.39	1/10/2026	12.1	1/10/2029	13.72
1/11/2017	29.96	1/11/2020	35.16	1/11/2023	50.61	1/11/2026	17.51	1/11/2029	6.58
1/12/2017	81.96	1/12/2020	55.05	1/12/2023	38.96	1/12/2026	36.81	1/12/2029	14.23

Data	Vazão	Data	Vazão	Data	Vazão	Data	Vazão
1/01/2030	5.4	1/01/2033	67.28	1/01/2036	36.17	1/01/2039	72.97
1/02/2030	1.4	1/02/2033	51.46	1/02/2036	81.04	1/02/2039	96.36
1/03/2030	6.26	1/03/2033	26.35	1/03/2036	66.78	1/03/2039	51.1
1/04/2030	3.18	1/04/2033	13.32	1/04/2036	33.31	1/04/2039	29.69
1/05/2030	2.03	1/05/2033	7.37	1/05/2036	12.36	1/05/2039	17.47
1/06/2030	2.08	1/06/2033	1.94	1/06/2036	6.9	1/06/2039	15.91
1/07/2030	1.74	1/07/2033	3.88	1/07/2036	7.29	1/07/2039	19.59
1/08/2030	0.59	1/08/2033	2.03	1/08/2036	3.02	1/08/2039	14.5
1/09/2030	1.15	1/09/2033	0.25	1/09/2036	5.48	1/09/2039	24.54
1/10/2030	1.94	1/10/2033	0.39	1/10/2036	4.73	1/10/2039	22.43
1/11/2030	1.49	1/11/2033	9	1/11/2036	11.74	1/11/2039	41.58
1/12/2030	6.96	1/12/2033	42.26	1/12/2036	30.93	1/12/2039	144.25
1/01/2031	2.66	1/01/2034	34.86	1/01/2037	93.83	1/01/2040	158.37
1/02/2031	34.33	1/02/2034	48.3	1/02/2037	40.41	1/02/2040	128.94
1/03/2031	34.68	1/03/2034	27.43	1/03/2037	29.99	1/03/2040	102.05
1/04/2031	5.55	1/04/2034	27.09	1/04/2037	14.6	1/04/2040	62.88
1/05/2031	2.86	1/05/2034	24.53	1/05/2037	9.46	1/05/2040	27.01
1/06/2031	5.34	1/06/2034	31.88	1/06/2037	8.73	1/06/2040	22.44
1/07/2031	1.19	1/07/2034	22.4	1/07/2037	26.8	1/07/2040	18.45
1/08/2031	2.04	1/08/2034	5.44	1/08/2037	5.41	1/08/2040	6.05
1/09/2031	9.78	1/09/2034	2.97	1/09/2037	1.73	1/09/2040	6.87
1/10/2031	3.98	1/10/2034	20.91	1/10/2037	1.39	1/10/2040	10.1
1/11/2031	27.9	1/11/2034	23.16	1/11/2037	38.61	1/11/2040	15.51
1/12/2031	62.66	1/12/2034	43.05	1/12/2037	26.96	1/12/2040	34.81
1/01/2032	89.85	1/01/2035	88.58	1/01/2038	56.52		
1/02/2032	60.83	1/02/2035	49.55	1/02/2038	66.19		
1/03/2032	101.94	1/03/2035	78.62	1/03/2038	73.7		
1/04/2032	17.99	1/04/2035	32.59	1/04/2038	54.69		
1/05/2032	20.4	1/05/2035	40.38	1/05/2038	41.39		
1/06/2032	75.35	1/06/2035	20.43	1/06/2038	28.54		
1/07/2032	16.53	1/07/2035	13.86	1/07/2038	11.22		
1/08/2032	10.29	1/08/2035	4.87	1/08/2038	14.28		
1/09/2032	6.31	1/09/2035	10.58	1/09/2038	6.98		
1/10/2032	1.72	1/10/2035	14.84	1/10/2038	8.02		
1/11/2032	12.19	1/11/2035	14.47	1/11/2038	16.67		
1/12/2032	20.33	1/12/2035	26.97	1/12/2038	35.68		