

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA HÍDRICA DE FORTALEZA - VOL. 2

ESTUDOS TEMÁTICOS E SETORIAIS



**Prefeitura de
Fortaleza**
Instituto de Planejamento
de Fortaleza



FCPC
FUNDAÇÃO CEARENSE
DE PESQUISA E CULTURA



FORTALEZA2040

Fortaleza, Ceará
Julho de 2015

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA
INSTITUTO DE PLANEJAMENTO DE FORTALEZA - IPLANFOR
FUNDAÇÃO CEARENSE DE PESQUISA E CULTURA -FCPC

**PROJETO:
AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA HÍDRICA DE FORTALEZA -
FORTALEZA**

Autores

Francisco de Assis de Souza Filho
Samíria Maria Oliveira da Silva
Daniel Antônio Camelo Cid

**RELATÓRIO 2
Balanço Hídrico Futuro**

**FORTALEZA /CE
DEZEMBRO DE 2015**

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	7
2	MODELO DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO	9
3	DEMANDA HÍDRICA FUTURA.....	11
4	VAZÕES FUTURAS	14
5	SIMULAÇÃO DO SISTEMA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	19
5.1	CENÁRIO 1	20
5.2	CENÁRIO 2	26
5.3	CENÁRIO 3	30
5.4	CENÁRIO 4	36
5.5	CENÁRIO 5	40
5.6	CENÁRIO 6	45
5.7	CENÁRIO 7	49
6	CONCLUSÃO.....	52
7	REFERÊNCIAS	53

Lista de Figuras

<i>Figura 1 – Rede de fluxo da modelagem do sistema de abastecimento de água bruta da região Jaguaribe e Metropolitana de Fortaleza utilizando o software Acquanet.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2 – Cenários de demandas futuras utilizadas nas simulações: (a) dFJ 1.1 (b) dFJ1.2, (c) dFJ 1.3 e (d) dFJ 2.2.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3. Sumário dos Caminhos da Forçante Radioativa.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4 - Fluxograma dos passos de geração das vazões afluentes com base em modelos climáticos globais.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5 - Variação percentual na média anual de vazões no século XXI para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 para: (a) Óros , (b) Castanhão, (c) Banabuiu.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ1-1 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ1-1 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 9- Curva de permanência das transferências entre os reservatórios Orós e Castanhão.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10- Relação entre vazão de transferência e volume dos reservatórios Orós e Castanhão.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11 – Curva de permanência da vazão mensal de transferência ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12 – Simulação da operação do reservatório Pacajus, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ1-1 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 13 - Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ1-1 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 14- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 15 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012 e demandas atuais e capacidade máxima de transferência do Eixão das águas de 20 m³/s.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).</i>	<i>28</i>
<i>Figura 18 – Simulação da operação do reservatório Pacajus, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>29</i>

<i>Figura 19 - Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 20- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-3 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 21 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 22 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-3 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 23 - Curva de permanência da transferência entre os reservatórios Orós e Castanhão para o Cenário 3.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 24 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).</i>	<i>33</i>
<i>Figura 25 – Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-3 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 26– Simulação da operação do reservatório Pacajús, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-3 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 27- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 28 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 29 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 30 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).</i>	<i>38</i>
<i>Figura 31 – Simulação da operação do reservatório Pacajus, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 32 - Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 33- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 34 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 35 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	<i>42</i>

<i>Figura 36 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).</i>	43
<i>Figura 37 – Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	43
<i>Figura 38– Simulação da operação do reservatório Pacajús, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	44
<i>Figura 39- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	45
<i>Figura 40 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.</i>	46
<i>Figura 41 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	47
<i>Figura 42 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).</i>	47
<i>Figura 43 – Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.</i>	48
<i>Figura 44- Acumulação do reservatório Castanhão e vazão da transposição do rio São Francisco para o cenário de demanda dFJ 1.2 e vazões futuras dos modelos: BCC-CSM1.1 (a), HadGEM2 (b) e MIROC5 (c).</i>	51

1 APRESENTAÇÃO

No contexto da economia da alocação de água, um conceito relevante é o de escassez de água, isto é, quando a demanda excede a oferta hídrica. Isto porque quando a água é um recurso escasso, ela deve ser gerida e distribuída de forma eficiente, no sentido econômico. Além de uma alocação de água eficiente, é necessário distribuir o bem-estar entre todos os indivíduos e assegurar a sustentabilidade do recurso.

O problema da escassez pode surgir de diversos fatores como: crescimento populacional, a expansão do consumo associada à melhoria dos padrões de vida, mudanças alimentares, aquecimento do planeta, degradação dos corpos hídricos e mau gerenciamento dos sistemas de abastecimento de água.

O crescimento populacional é apontado como uma das variáveis preocupantes quando trata-se de recursos hídricos, uma vez que ele vem acompanhado do aumento do consumo de água, de energia, e de alimentos tendo impactos sobre a demanda por recursos hídricos de forma geral.

Espera-se que a população mundial aumente de 6,9 bilhões, em 2010, para 8,3 bilhões, em 2030, e para 9,1 bilhões, em 2050 (UNDESA, 2009). Ao mesmo tempo, projeta-se que as populações urbanas aumentarão em 2,9 bilhões de pessoas, passando de 3,4 bilhões, em 2009, para um total de 6,3 bilhões, em 2050. Assim, espera-se que as áreas urbanas do mundo absorvam todo o crescimento populacional nas próximas quatro décadas, e que também retirem uma parte da população rural. Além disso, a maior parte do crescimento populacional esperado em áreas urbanas se concentrará nas cidades grandes e pequenas de regiões menos desenvolvidas (UNHABITAT, 2006).

Desta forma, a gestão da demanda hídrica é aspecto primordial no planejamento dos recursos hídricos, especialmente quanto ao abastecimento de áreas urbanas. A gestão da demanda envolve todas as ações relacionadas aos usos econômicos e sociais da água e à sustentabilidade ambiental. Aspectos como a conservação da água (uso racional) e a flexibilidade dos usos são dimensões relevantes dessa gestão. Na prática do setor de recursos hídricos, essa gestão é realizada por intermédio de instrumentos como a outorga e a cobrança.

Este relatório apresenta o balanço hídrico futuro realizado com as projeções de demandas para 2040 (Fortaleza e Região do Jaguaribe) e vazões afluentes históricas e futuras através do programa Acquanet. O uso das vazões históricas advém da hipótese

de que no futuro, essa variável tenha o mesmo comportamento apresentado no período de 1912 a 2012. A utilização das vazões futuras, no entanto, visa incorporar as possíveis variações das vazões no gerenciamento de recursos hídricos, considerando as incertezas associadas ao clima futuro e consequente as variáveis de oferta (ex. vazões) e demanda (evapotranspiração, temperatura) associadas ao clima.

O relatório está organizado em seis seções além da apresentação. Na seção 2 tem-se uma breve descrição do software utilizado para a simulação do balanço hídrico futuro. Na seção seguinte apresentam-se os cenários de demanda com as projeções da população de fortaleza e dos usuários da bacia do Jaguaribe além do cenário de incerteza sobre o consumo per capita. Na quarta seção têm-se os cenários de vazões futuras utilizados nas simulações do sistema. Na seção 5 apresentam-se os cenários de simulação do sistema, isto é, a combinação dos cenários de demanda hídrica com os cenários de vazão. Nessa seção, também se expõe os resultados de cada uma das simulações apontando-se para os volumes dos principais reservatórios, a curva de permanência da transferência hídrica nos canais de transposição de água existentes no sistema e o déficit de atendimento da demanda. Na última seção são apresentados as conclusões sobre este trabalho.

2 MODELO DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO

O modelo de simulação foi construído utilizando o programa Acquanet. Desenvolvido pelo laboratório de Sistema de Apoio à Decisão da Escola Politécnica da USP (LABSID, 2002), esse programa funciona com uma estrutura modular constituída de um módulo base, denominado AcquaNet e de módulos para cálculo de alocação de água, avaliação da qualidade da água, determinação de alocação de água para irrigação, produção de energia elétrica e consideração de valores econômicos nas decisões de alocação (PORTO et al, 2014).

O ACQUANET simula a operação dos hidrossistemas (reservatórios e demandas) e a alocação de água pela aplicação de um sistema de prioridades e custos otimizados pelo algoritmo Out-of-Kilter, utilizando dois tipos de simulação: Simulação contínua e Planejamento tático. A simulação contínua foi escolhida para a realização deste trabalho. Nela o algoritmo utiliza um ano inicial e um número total de anos da simulação. Os hidrossistemas são avaliados e como respostas obtém-se tabelas e gráficos sobre as acumulações dos reservatórios, vazão transportada entre trechos, demandas atendidas entre outros resultados.

Utilizou-se o programa para a modelagem da rede de abastecimento de água bruta da Região Metropolitana de Fortaleza, mostrada na Figura 1. Nesta, os triângulos com contorno azul representam os reservatórios que compõe o sistema Jaguaribe-Metropolitano e os quadrados de contorno rosa simbolizam as demandas hídricas dos reservatórios (ou trechos).

3 DEMANDA HÍDRICA FUTURA

A definição dos cenários de demanda hídrica futura constitui uma etapa importante na simulação da operação de um sistema de reservatórios. Diante das incertezas associada nesta etapa do trabalho, optou-se pela construção de possíveis cenários de demandas para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e Região do Jaguaribe.

Para a RMF, utilizaram-se dois possíveis cenários de crescimento:

- 1) Em reunião com a coordenação do Projeto Fortaleza 2040, levantaram-se algumas hipóteses a respeito do crescimento de Fortaleza. Dentre as hipóteses, três fatores mostraram-se favoráveis para o crescimento da população: saldo migratório positivo, redução da mortalidade infantil e redução da mortalidade por causas externas (redução significativa de homicídios). Todos esses fatores combinados levariam Fortaleza passar de 2,5 milhões de habitantes em 2012 para 3,14 milhões em 2040. Um crescimento de, aproximadamente, 26%. Esta mesma taxa de crescimento foi incorporado ao valor de demanda atual do sistema, construindo um primeiro cenário de demanda futura para a RMF.
- 2) O segundo cenário para a RMF incorporou a incerteza quanto ao consumo *per capita* de água pela população. Adotou-se, além do crescimento populacional, o crescimento da demanda *per capita* em 20% da demanda atual.

Para a região do Jaguaribe, três cenários de demandas foram levantados:

- 1) As demandas da Região do Jaguaribe em 2040 permaneceriam constantes, iguais às utilizadas na atualidade.
- 2) Crescimento a uma taxa de 1% a.a (28% no acumulado total) das demandas desta região.
- 3) Utilização do cenário de crescimento proposto por ANA (2005) para o ano de 2025, adotando-o como o valor estimado para 2040.

Estes cenários foram combinados e agrupados no Quadro 1 para a construção dos diferentes cenários de demandas.

Quadro 1 - Construção dos cenários de demandas para elaboração das simulações da operação do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

		JAGUARIBE		
		Demanda Atual	Crescimento da demanda em 28% em 2040	Crescimento da demanda segundo ANA (2005)
FORTALEZA	Crescimento populacional de 26% em 2040	dFJ 1.1	dF.J 1.2	dFJ 1.3
	Crescimento populacional de 26% e crescimento do consumo per-capita de 20 % em 2040	dFJ 2.1	dF.J 2.2	dFJ 2.3

Destes cenários construídos, optou-se por simular os cenários dF.J 1.1, dFJ 1.2, dFJ 1.3 e dFJ 2.2 apresentados na Figura 2.

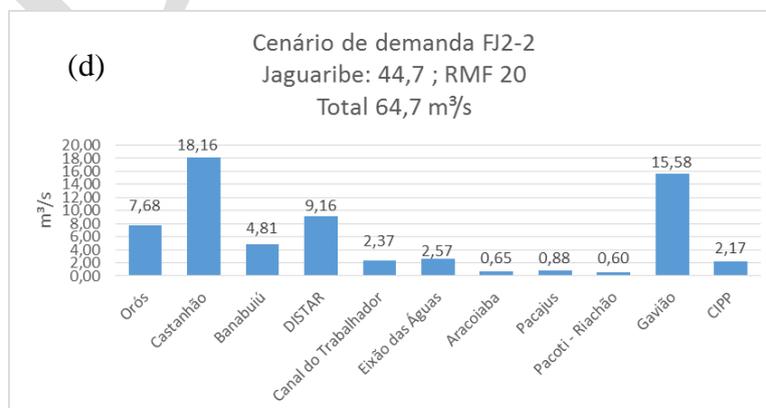
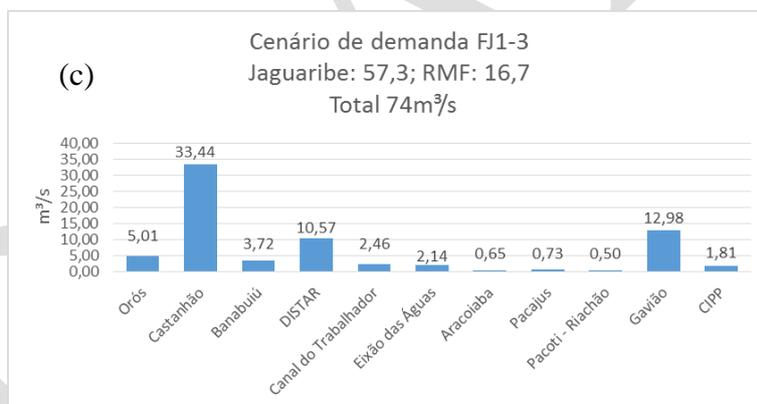
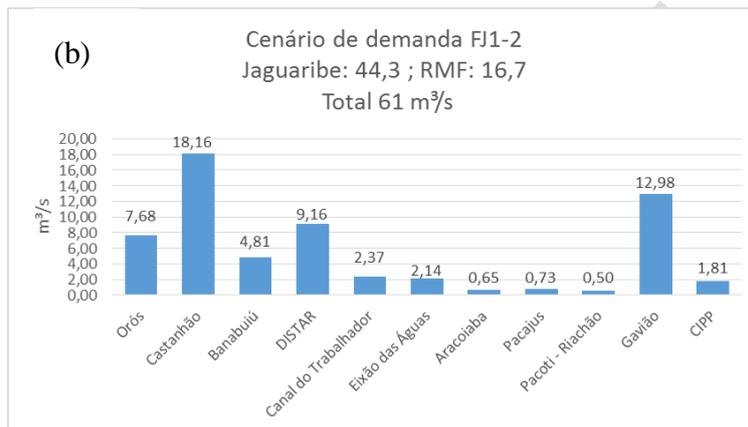
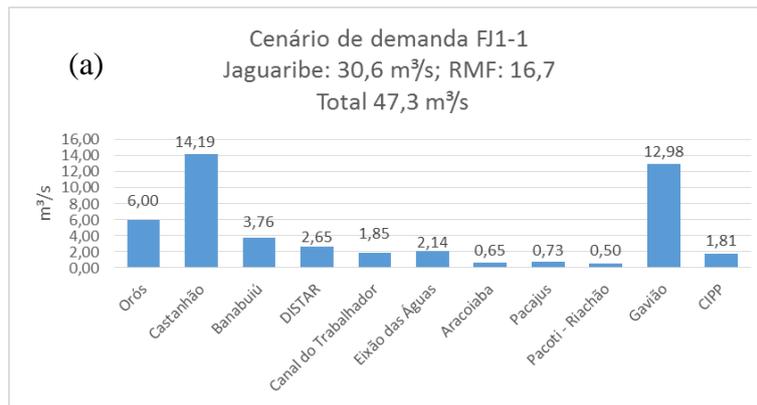


Figura 2 – Cenários de demandas futuras utilizadas nas simulações: (a) dFJ 1.1 (b) dFJ1.2, (c) dFJ 1.3 e (d) dFJ 2.2

4 VAZÕES FUTURAS

A mudança climática para o setor de recursos hídricos tem sua relevância à medida que pode modificar o padrão médio de ocorrência dos processos hidrológicos (precipitação, vazão, evaporação...) e de seus modos de variação.

Os modelos de cenarização da mudança do clima convergem consistentemente na indicação de aumento de temperatura e de sua amplitude para todas as regiões do planeta. Este fato não se reproduz quando avaliada as precipitações produzidas pelos diferentes modelos. Havendo neste caso discrepância não apenas na intensidade da mudança como na direção da mudança. Este fato amplifica-se quando se analisam as vazões.

Estudos anteriores mostram que os modelos de mudança climática são razoáveis na representação dos modos de variação do clima no Século XX, sendo, pois, críveis os seus comportamentos para o Século XXI. Isto é, os modelos de mudança com algumas poucas exceções traduzem futuros possíveis. Desta forma, não considerar estes futuros possíveis no gerenciamento de recursos hídricos é desconsiderar as incertezas associadas ao clima futuro e conseqüente as variáveis de oferta (ex. vazões) e demanda (evapotranspiração, temperatura) associadas ao clima. Desconsiderar as incertezas pode nos levar a investirmos em ações que se mostrarão inadequadas no futuro e associadas a alto nível de arrependimento.

Para avaliar este futuro possível, a simulação do sistema Jaguaribe-Metropolitano foi realizada utilizando vazões afluentes estimadas a partir de dados de temperatura e precipitação disponíveis no projeto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project). Esses dados são oriundos das projeções de modelos climáticos globais sob os cenários de forçante radioativa (Representative Concentration Pathways - RCPs) empregada no Relatório de Avaliação 5 (AR5) do Painel intergovernamental em Mudanças Climáticas.

Os RCPs são conjuntos consistentes de projeções dos componentes da forçante radiativa (a mudança no equilíbrio entre a radiação de entrada e saída para a atmosfera causada principalmente por alterações na composição atmosférica) que se destinam a servir como entrada para a modelagem climática. Ou seja, não são cenários integrados que incluem projeções socioeconômicas, de emissões e climáticas. O fato central nesta

nova tipologia é que qualquer caminho (RCP) pode resultar de um espectro amplo de cenários de desenvolvimento socioeconômico e tecnológico.

Eles representam uma medida das emissões de gases estufa em Watts/m² e são descritos conforme a Tabela 1

Figura 3. Sumário dos Caminhos da Forçante Radioativa.

CENÁRIO	Descrição
RCP 8,5	Caminho crescente da força radioativa levando a 8,5 W/m ² em 2100.
RCP 6,0	Estabilização em 6 W/m ² após 2100
RCP 4,5	Estabilização em 4,5 W/m ² após 2100
RCP 3,0 PD2	Pico na forçante radiativa em ~ 3 W / m ² antes de 2100 e declínio

Fonte. Moss *et al.*, 2008.

No entanto, neste estudo utilizaram-se os dados de vazões futuras produzidos no trabalho de SILVEIRA (2014) para a região do Jaguaribe e Região Metropolitana de Fortaleza. A metodologia é apresentada a seguir.

As precipitações mensais foram obtidas dos modelos climáticos e corrigidas estatisticamente usando a função de distribuição gama. Para a correção gama foi utilizado um ajuste de viés seguindo os seguintes passos:

- 1° - Ajuste da distribuição gama para os dados observados;
- 2° - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos para o século XX para identificar o problema no ajuste do viés;
- 3° - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos do século XXI;
- 4° - Correção das precipitações do século XX e XXI.

Para a correção das precipitações modeladas são considerados doze ajustes gama, um para cada mês do ano. Por exemplo, todas as precipitações que ocorreram ao longo de cada janeiro são agrupadas e são gerados os parâmetros de correção. Em seguida, o mesmo procedimento é realizado para todos os meses.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) é usado o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Segundo este método a evapotranspiração de referência é dada segundo a equação (1):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia-1); R_n é a radiação líquida na superfície das culturas (MJ m² dia-1); G é o fluxo de calor no solo (MJ m² dia-1); T é a média diária da temperatura do ar a 2 m de altura (°C); u₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s-1); e_s é a pressão da saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor atual (kPa); (e_s - e_a) é o déficit de saturação de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura (kPa °C-1); γ (kPa °C-1) é a constante psicrométrica.

Os dados base dessa equação são a velocidade do vento, a radiação líquida, a pressão de vapor real ou atual e a temperatura máxima e mínima, isto é, a partir desses dados é possível estimar as outras variáveis necessárias para o cálculo da evapotranspiração.

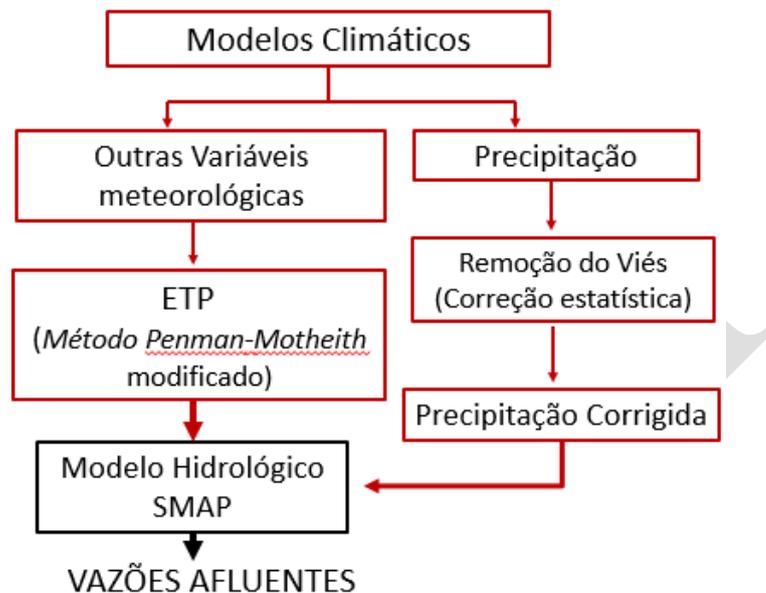
As vazões foram geradas por meio do modelo hidrológico SMAP (LOPES et al., 1981) que possui como dados de entrada a precipitação média e a evapotranspiração da área em estudo. O SMAP, em sua versão mensal, utiliza em seu esquema conceitual de dois reservatórios lineares representando o solo (camada superior) e o aquífero. A cada evento de precipitação (P) é realizado um balanço de massa. Uma parcela de (P) é transferida como escoamento superficial (E_s). A outra parcela de precipitação sofre perda por evaporação e a lâmina remanescente (P-E_s-E_p) é adicionada a um reservatório que representa a camada superior do solo. Esse reservatório possui uma recarga no reservatório subterrâneo (Rec). A soma do escoamento superficial e básico fornece a vazão no ponto de controle da bacia.

Ele possui seis parâmetros: capacidade de saturação do solo (Sat); parâmetro que controla o escoamento superficial (PES); coeficiente de recarga, parâmetro relacionado com a permeabilidade na zona não saturada do solo (Crec); taxa de deplecionamento (K) do nível (Rsub) que gera o escoamento de base (Eb); taxa de umidade do solo

inicial (TU_{in}) que determina o nível inicial do reservatório (R_{solo}); valor do escoamento de base inicial (EB_{in}).

Desta forma, a geração das vazões afluentes utilizadas nas simulações apresentadas neste relatório segue o fluxograma apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma dos passos de geração das vazões afluentes com base em modelos climáticos globais.



Os modelos climáticos globais considerados neste estudo foram o BCC-CSM1.1, HadGEM2-AO e MIROC5 para o cenário de forçante radioativa 4.5. SILVEIRA (2014), para o período de 2010 a 2039 na bacia do Orós, o modelo HadGEM2-AO apresentou uma redução em torno de 40% a 60% para as bacias do Jaguaribe e RMF em relação ao século XX (1950-1999). O modelo BCC-CSM1.1 apresentou um aumento das vazões 5% a 25%, enquanto o modelo MIROC5 apresentou também variação entre -2% (redução) e 10% (aumento) em relação ao mesmo século XX (1950-199). A Figura 5 mostra essa variação dos modelos analisados por Silveira.

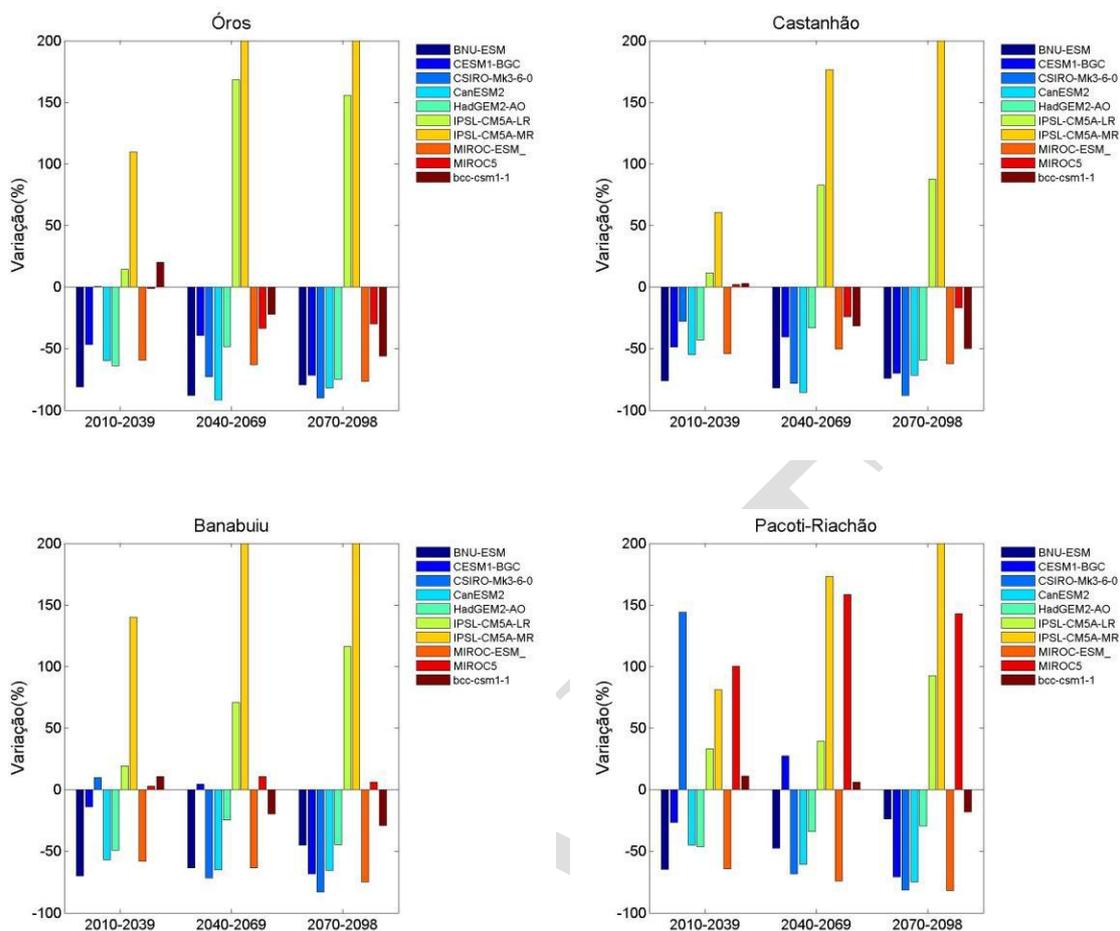


Figura 5 - Variação percentual na média anual de vazões no século XXI para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 para: (a) Óros , (b) Castanhão, (c) Banabuiu e (d) Pacoti-Riachão.
Fonte: SIVEIRA (2014)

5 SIMULAÇÃO DO SISTEMA E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Os principais resultados das simulações com cenários futuros para o sistema Jaguaribe – Metropolitano serão apresentados nesta seção. Estes resultados demonstram o comportamento dos reservatórios sujeitos aos cenários de demandas apresentados anteriormente, utilizando a série histórica de vazões atuais e futuras. Este modelo de simulação visa observar os níveis críticos dos reservatórios, bem como as falhas e os riscos associadas ao abastecimento de Fortaleza.

As simulações futuras incorporaram algumas suposições relacionadas a demandas e vazões futuras, bem como a modificação da estrutura operacional da rede de abastecimento. Diante dessas incertezas, optou-se por realizar as simulações futuras combinando-se alguns cenários de vazões e demandas, apresentadas no Quadro 2.

No cenário de vazões, optou-se por simular o sistema recebendo água da transposição do rio São Francisco com capacidade máxima de 10 m³/s e 20 m³/s. Além desses, utilizou-se modelos de circulação global para prever vazões futuras associadas aos cenários de mudanças climáticas. O cenário de demandas foi apresentado da seção DEMANDA HÍDRICA FUTURA.

Quadro 2 - Combinação dos cenários de demandas e vazões para a simulação do sistema Jaguaribe-Metropolitano

		Demandas			
		dFJ 1.1	dFJ 1.2	dFJ1.3	dFJ 2.2
Vazões	Vazão histórica com transposição do São Francisco – capacidade máxima 20 m ³ /s	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
	Vazão histórica com transposição do São Francisco – capacidade máxima 10m ³ /s		Cenário 5	-	Cenário 6
	Vazão futura com transposição do São Francisco – capacidade máxima 10 m ³ /s	-	Cenário 7	-	-

5.1 Cenário 1

O Cenário 1 foi montado incorporando o cenário de demandas dFJ 1.1 com o cenário de vazões históricas do sistema, acrescentando a transposição das águas do rio São Francisco, limitando a capacidade máxima de chegada no reservatório Castanhão em 20 m³/s. A Figura 6 demonstra o comportamento da operação do reservatório Castanhão. Observa-se que em 300 meses (25% do tempo) o reservatório Castanhão tem seu estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. Em 1% do tempo o reservatório atingiu o volume mínimo operacional de 220hm³. Em apenas um mês desta simulação o reservatório entrou em colapso.

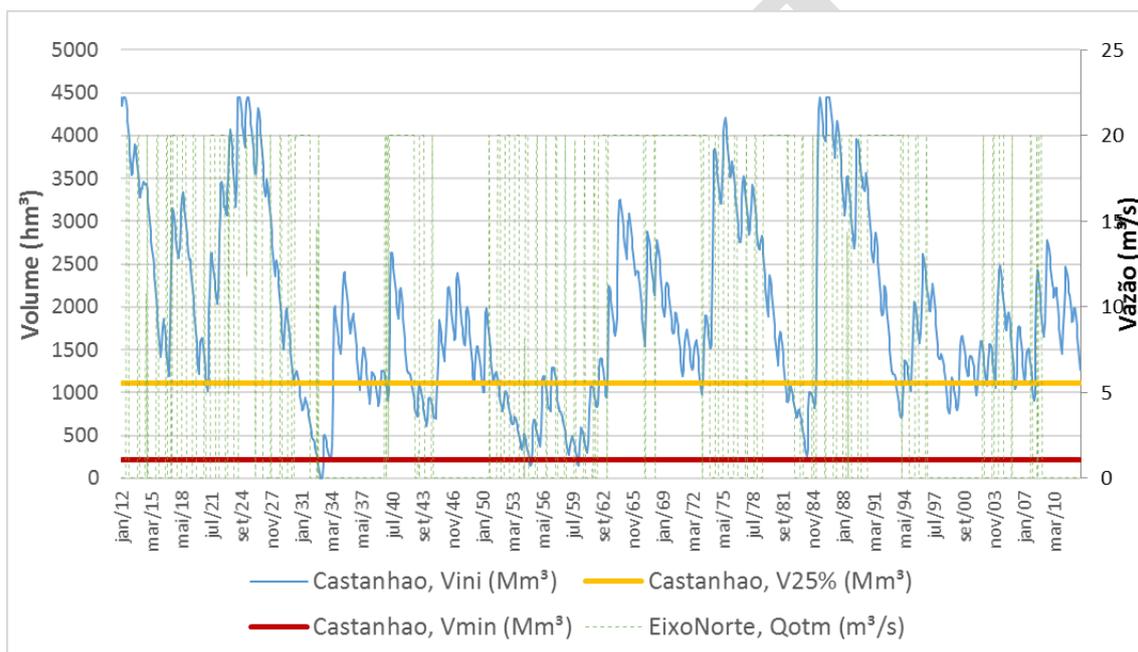


Figura 6- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ1-1 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

As águas da transposição do rio São Francisco chegam ao reservatório Castanhão conforme mostra a Figura 7. Este cenário indica a transferência máxima de 20 m³/s em 38% do tempo (461 meses). Em 61% do tempo simulado (739 meses) não existe transferência. Durante o período, a vazão média resultou em 7,93 m³/s, sendo volume total de água transferida 25268,8 hm³.

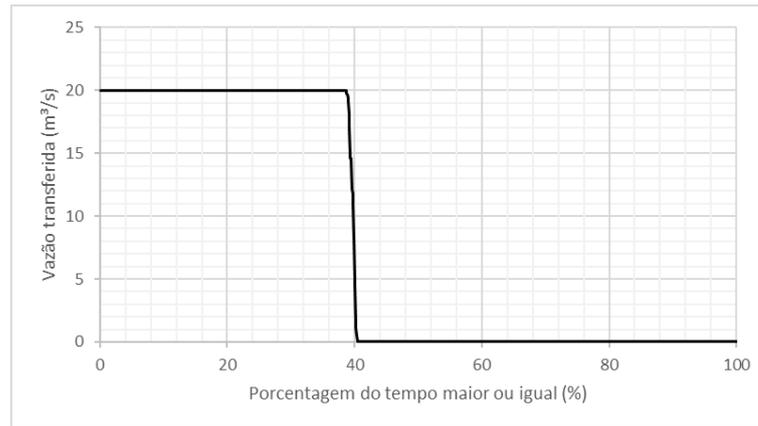


Figura 7 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.

O reservatório Orós, situado a montante do reservatório Castanhão, além de atender às demandas locais, pode funcionar como reservatório estratégico utilizado quando os níveis do primeiro estão em cotas baixas. Na Figura 8 pode-se observar o comportamento do reservatório Orós para o período de tempo simulado.

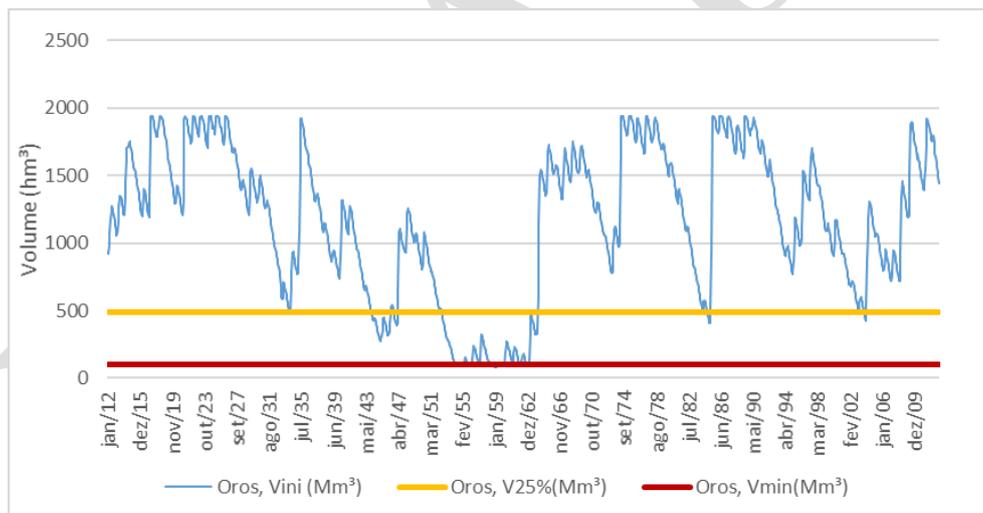


Figura 8 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ1-1 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

O reservatório apresenta em, aproximadamente, 15% do tempo da simulação (184 meses) estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. Seu volume mínimo operacional de 100 hm³ é atingido em 50 meses do período (4,13 % do tempo), indicando falhas no atendimento das demandas locais. O reservatório apresentou um período máximo de 22 meses consecutivos com falhas. O déficit total de

água resultou em 652 hm³ aproximadamente, e a vazão média fornecida foi 5,8 m³/s. A Tabela 1 mostra um resumo desses déficits de abastecimento.

Tabela 1- Déficit de suprimento das demandas do reservatório Orós para o período de tempo simulado (1912-2012) e demandas atuais.

Demanda	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Oros	22,00	4,13	652,53	5,80

As transferências de águas ocorridas entre os reservatórios Orós e Castanhão são apresentadas na Figura 9. A Figura indica que a transferência máxima ocorrida foi de 16,5 m³/s em aproximadamente 5% do tempo. Observa-se, ainda, que em, aproximadamente, 92% do tempo não existem transferências entre os dois reservatórios.

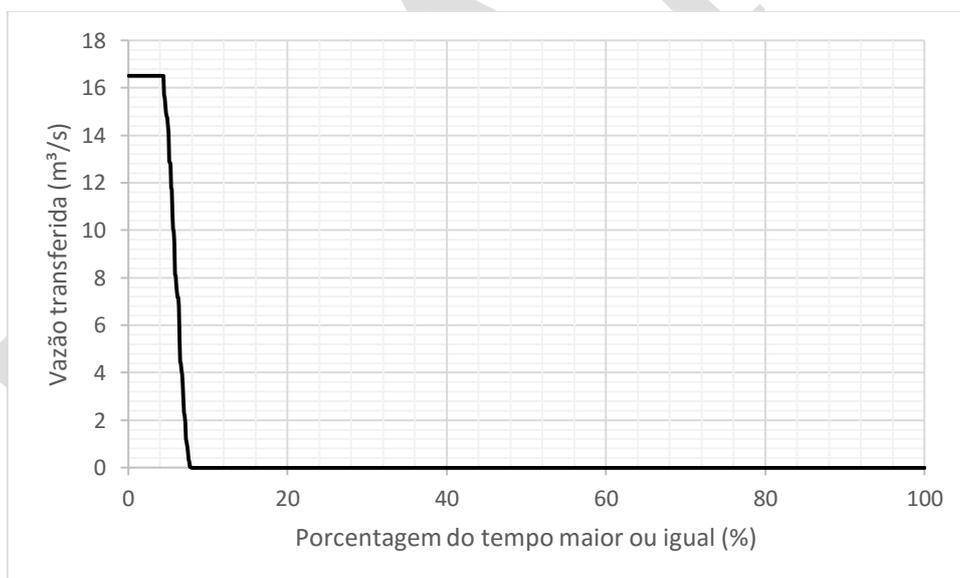


Figura 9- Curva de permanência das transferências entre os reservatórios Orós e Castanhão.

Observando a relação entre a vazão de transferência e os níveis destes dois reservatórios (Figura 10), percebeu-se que as transferências aconteceram apenas quando o reservatório Orós atingia sua capacidade máxima de armazenamento (estando o reservatório Castanhão com volume acima de 3000 hm³), indicando que as águas do Orós são utilizadas somente para consumo das demandas locais instaladas.

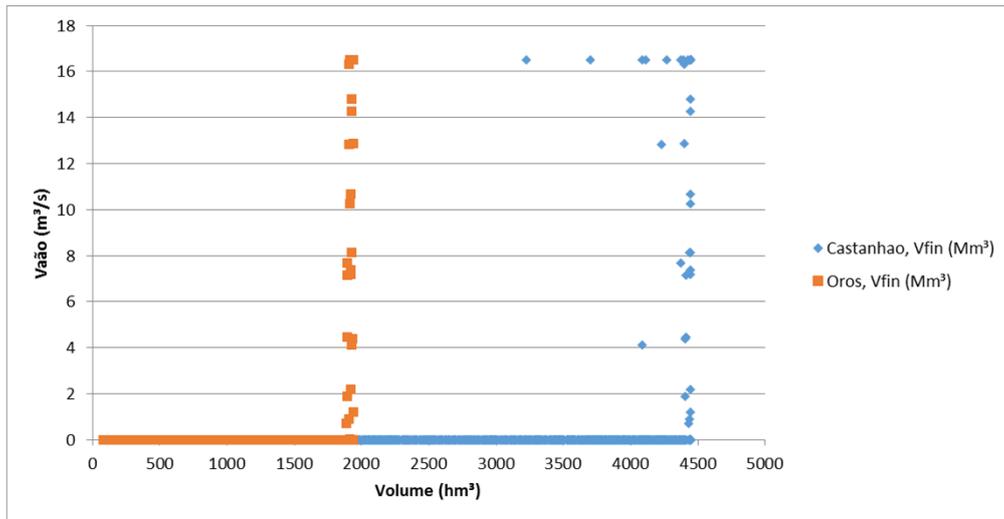


Figura 10- Relação entre vazão de transferência e volume dos reservatórios Orós e Castanhão.

As transferências de água ocorrida entre o sistema Jaguaribe-Metropolitano acontecem através do Eixão das Águas e do Canal do trabalhador. As águas que passam por estes canais são utilizadas, também, para o atendimento de algumas demandas locais, como o Distrito de Irrigação Tabuleiro de Russas (DISTAR).

O Eixão das águas apresenta transferência média de 7,9 m³/s, sendo a vazão máxima de 20m³/s transferida em 3,5% do tempo. O canal do Trabalhador tem, em média, 1,9 m³/s de transferência mensal, apresentando em 5% do tempo vazão mensal de 3 m³/s (vazão máxima).

O Eixão das águas liga o reservatório Castanhão ao reservatório Pacoti-Riachão, na região metropolitana de Fortaleza. Neste reservatório, em média, ocorreu a chegada, via Eixão das Águas, de 5,4 m³/s, com vazão máxima de 17,7 m³/s. A Figura 6 mostra a curva de permanência das vazões de chegada à RMF.

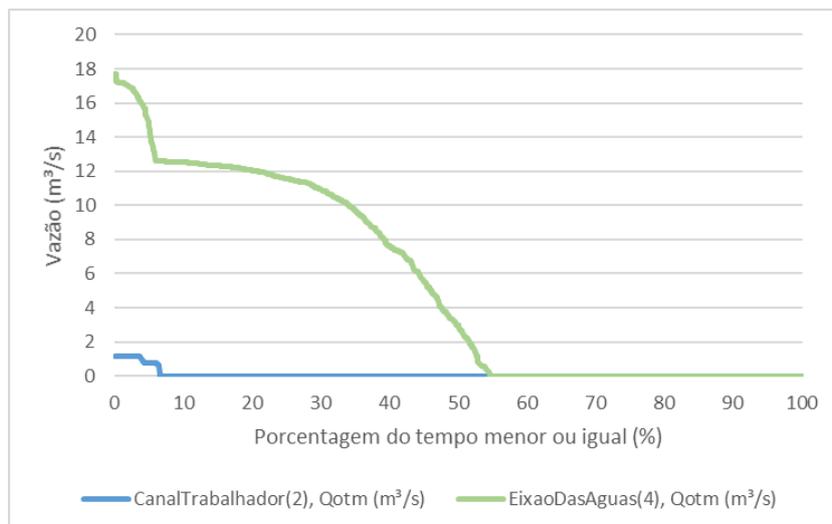


Figura 11 – Curva de permanência da vazão mensal de transferência ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).

O comportamento do reservatório Pacajús e do Pacoti-Riachão podem ser vistos na Figura 12 e na Figura 13. Estes dois reservatórios, como também o reservatório Gavião, não apresentaram nenhum tipo de falha durante a simulação.

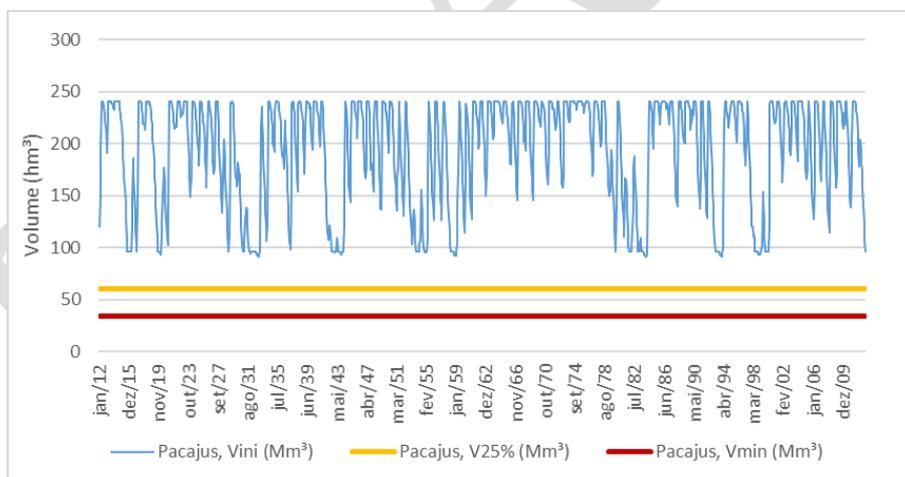


Figura 12 – Simulação da operação do reservatório Pacajús, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ1-1 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

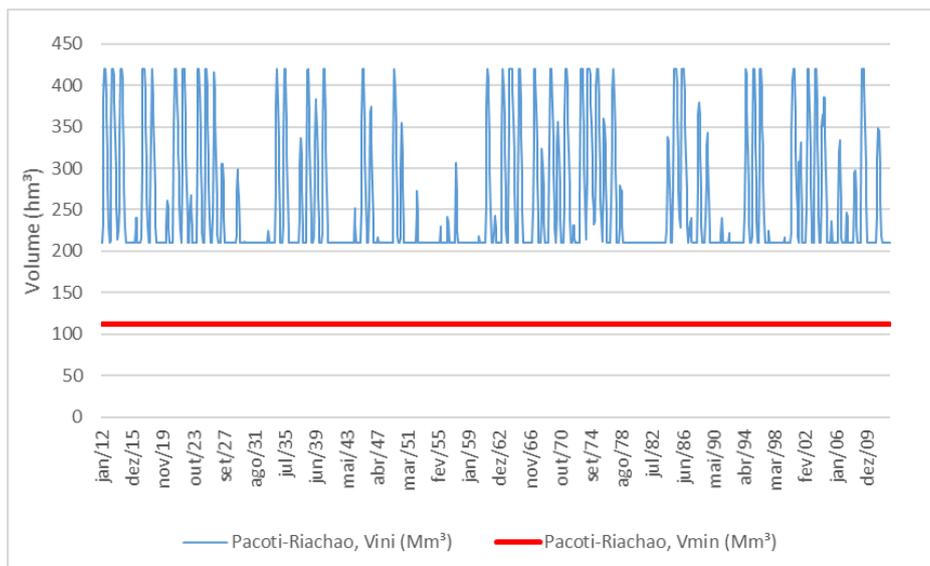


Figura 13 - Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ1-1 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

Os déficits de atendimento das demandas são mostrados na Tabela 2. Além do reservatório Orós já citado anteriormente, observou-se que o Distrito de Irrigação do Perímetro Tabuleiro de Russas (Distar) apresentou falha em menos de 1% do tempo.

Tabela 2 - Déficits de atendimento das demandas

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Orós	22,00	4,13	652,53	5,80
Castanhão	0,00	0,00	0,00	14,19
Banabuiú	0,00	0,00	0,00	3,76
Distar	27,00	3,22	259,49	2,57
Canal Trabalhador	0,00	0,00	0,00	1,85
Eixão Das Águas	0,00	0,00	0,00	2,14
Aracoiaba	0,00	0,00	0,00	0,67
Pacajús	0,00	0,00	0,00	0,73
Pacoti-Riachão	0,00	0,00	0,00	0,50
Fortaleza	0,00	0,00	0,00	12,98
Industria Pecém	0,00	0,00	0,00	1,81

5.2 Cenário 2

O Cenário 2 foi montado incorporando o cenário de demandas dFJ 1.2 com o cenário de vazões históricas do sistema, acrescentando a transposição das águas do rio São Francisco, limitando a capacidade máxima de chegada no reservatório Castanhão em 20 m³/s. O reservatório Castanhão apresentou, conforme pode ser visto na Figura 14, 577 meses (48% do tempo) com estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. O reservatório atinge o volume mínimo operacional (220 hm³) durante 112 meses da simulação (9% do tempo). Com os estoques neste volume, seria necessário um plano de ação para a utilização do volume ainda estocado, obrigando a imposição de restrição severa para a utilização deste manancial. A simulação indica, ainda, o esvaziamento completo do Castanhão em 53 meses (4,4% do tempo) do período simulado.

As águas da transposição do rio São Francisco chegam ao reservatório Castanhão conforme mostra a Figura 15. Este cenário indica a transferência máxima de 20 m³/s em 60% do tempo (727 meses). Em 38 % do tempo simulado (461 meses) não existem transferências. Durante o período, a vazão média resultou em 12,11 m³/s, sendo volume total de água transferida 38584,7 hm³.

O reservatório Orós apresentou comportamento indicado na Figura 16. Este apresenta em, aproximadamente, 25% do tempo da simulação (306 meses) estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. Seu volume mínimo operacional de 100 hm³ é atingindo em 103 meses do período (8% do tempo), indicando falhas no atendimento das demandas locais. O reservatório apresentou um período máximo de 28 meses consecutivos com falhas. O déficit total de água resultou em 1806 hm³ aproximadamente, e a vazão média fornecida foi 7,11 m³/s. A Tabela 3 mostra um resumo desses déficits de abastecimento.

Como mostrado no Cenário 1, as transferências ocorridas entre os reservatórios Orós e Castanhão aconteceram somente quando o reservatório Orós atingiu sua capacidade máxima de armazenamento, indicando que suas águas são utilizadas somente para consumo local.

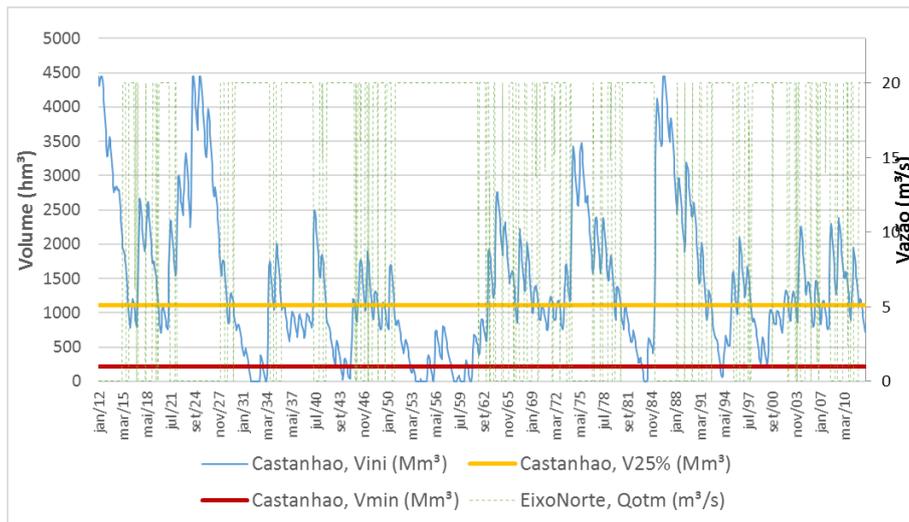


Figura 14- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

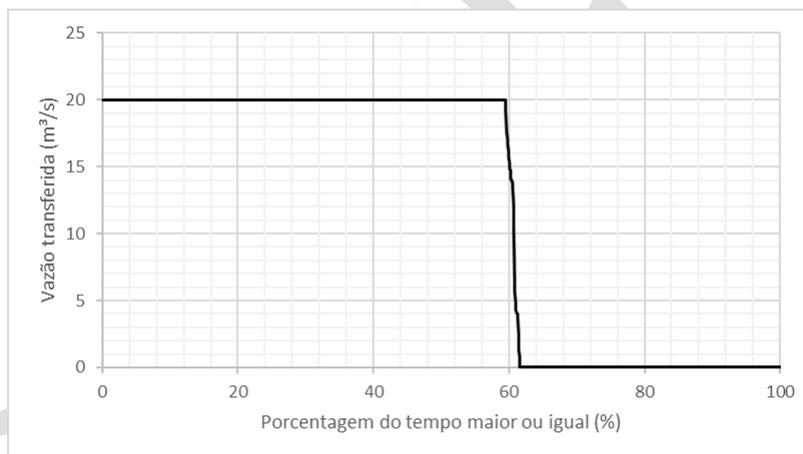


Figura 15 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.

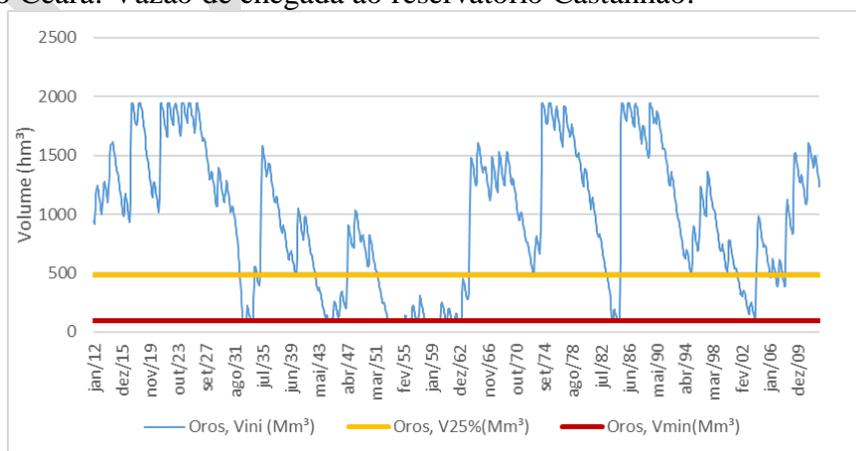


Figura 16 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012 e demandas atuais e capacidade máxima de transferência do Eixão das águas de 20 m³/s.

Tabela 3- Déficit de suprimento das demandas do reservatório Orós para o período de tempo simulado (1912-2012) e demandas atuais.

Demanda	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Orós	28,00	8,33	1806,41	7,11

O Eixão das águas apresenta transferência média de 7,7 m³/s, sendo a vazão máxima de 20 m³/s transferida em 3% do tempo. O canal do Trabalhador tem, em média, 2,41 m³/s de transferência mensal, apresentando em 8% do tempo vazão mensal de 3 m³/s (vazão máxima).

Na Figura 17 pode-se ver a curva de permanência das transferências ocorridas através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador, nos respectivos trechos finais (Aporte na RMF). No reservatório Pacoti-Riachão, na região metropolitana de Fortaleza, em média, ocorreu o aporte de 5,19 m³/s via Eixão das Águas, com transferência de águas ocorrendo durante 55% do tempo.

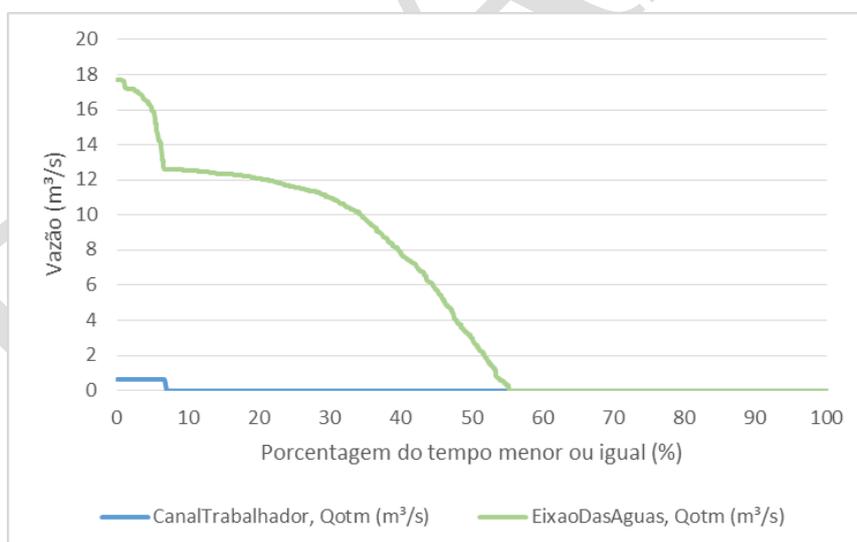


Figura 17 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).

O comportamento do reservatório Pacajus e do Pacoti-Riachão podem ser vistos na Figura 18 e na Figura 19. O reservatório Pacoti-Riachão atingiu o volume seu mínimo operacional em 2% do período simulado, indicando falha no atendimento das demandas

locais, e, conseqüentemente, nas demandas do reservatório Gavião. Os déficits de atendimento das demandas são mostrados na Tabela 4.

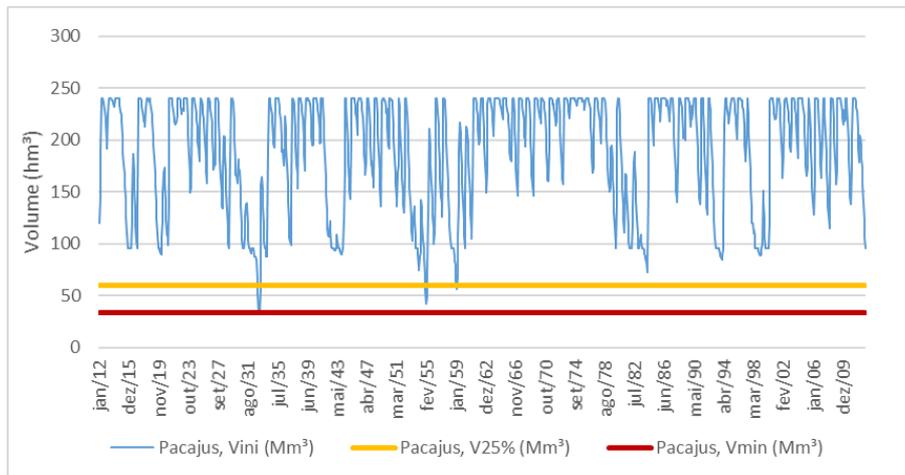


Figura 18 – Simulação da operação do reservatório Pacajus, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

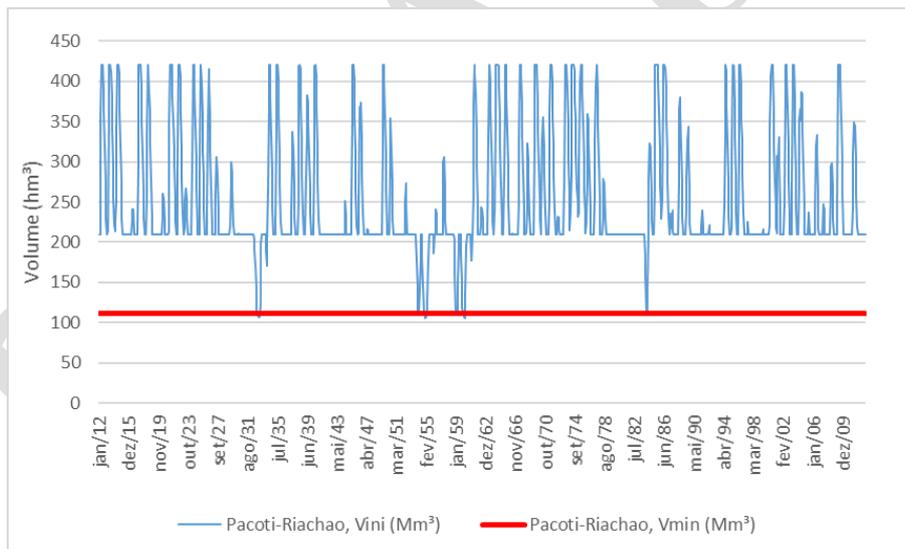


Figura 19 - Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

Tabela 4 - Déficits de atendimento das demandas para o cenário 2

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Orós	28,00	8,33	1806,41	7,11
Castanhão	6,00	2,06	215,86	18,09
Banabuiú	0,00	0,00	0,00	4,81
Distar	94,00	22,28	6424,55	7,14
Canal Trabalhador	6,00	2,31	165,22	2,32
Eixão Das Águas	0,00	0,00	0,00	2,14
Aracoiaba	0,00	0,00	0,00	0,67
Pacajús	0,00	0,00	0,00	0,73
Pacoti-Riachão	4,00	1,32	21,02	0,49
Fortaleza	4,00	1,40	370,79	12,86
Industria Pecém	4,00	1,40	80,86	1,79

Na região do Jaguaribe, o Distrito de Irrigação do Perímetro Tabuleiro de Russas (Distar) apresentou falha em 22,28 % do tempo, tendo a vazão média fornecida de 7,15 m³/s. Além deste, as demandas do reservatório Castanhão, Orós e Canal do Trabalhador apresentaram falhas. Na RMF, em 1,4% do tempo simulado uma parcela da demanda instalada no Pacoti-Riachão, Fortaleza e Industria Pecém não pode ser atendida.

5.3 Cenário 3

O Cenário 3 foi montado incorporando o cenário de demandas dFJ 1.3 com o cenário de vazões históricas do sistema, acrescentando a transposição das águas do rio São Francisco, limitando a capacidade máxima de chegada no reservatório Castanhão em 20 m³/s. A Figura 20 demonstra o comportamento da operação do reservatório Castanhão. Observa-se que em 684 meses (56,4% do tempo) o reservatório Castanhão tem seu estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. O reservatório atinge o volume mínimo operacional (220 hm³) em 25,7% do período. A simulação indica, ainda, o esvaziamento completo do Castanhão em 16 % do tempo do período simulado.

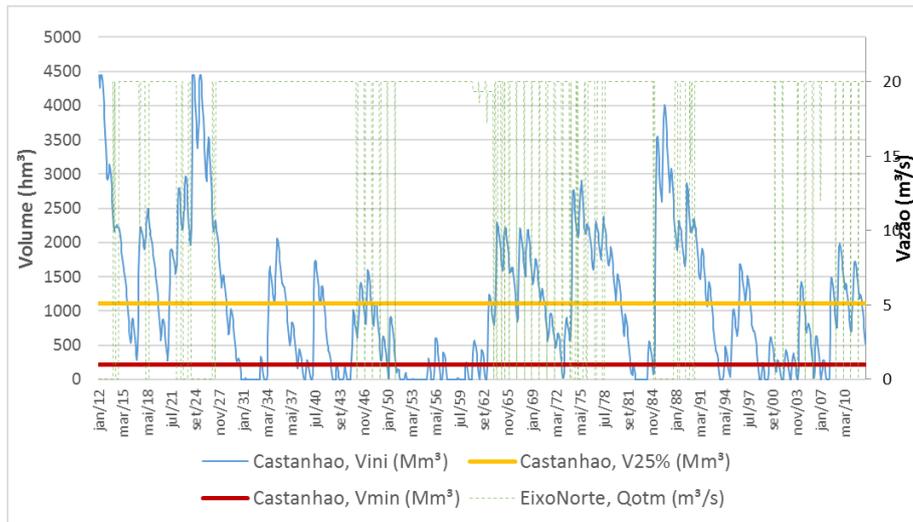


Figura 20- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-3 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

A Figura 21 mostra a curva de permanência da vazão de chegada ao Castanhão das águas da transposição do rio São Francisco. Este cenário indica a transferência máxima de 20 m³/s em 82% do tempo. Em apenas 15 % do tempo simulado não existe transposição de águas para a região. Durante o período, a vazão média resultou em 16,8 m²/s, sendo volume total de água transferida 53611,9 hm³.

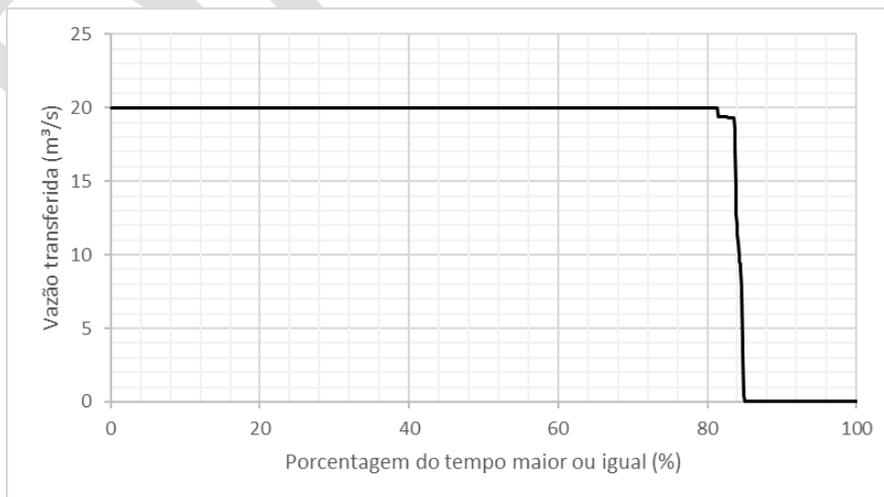


Figura 21 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.

O reservatório Orós apresentou comportamento indicado na Figura 22. Este apresenta em, aproximadamente, 14,7% do tempo da simulação (178 meses) estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. Seu volume mínimo operacional de 100 hm³ é atingindo em 38 meses do período (3,1% do tempo), indicando falhas no atendimento das demandas locais. O reservatório apresentou um período máximo de 9 meses consecutivos com falhas. O déficit total de água resultou em 462,11 hm³ aproximadamente, e a vazão média fornecida foi 4,87 m³/s

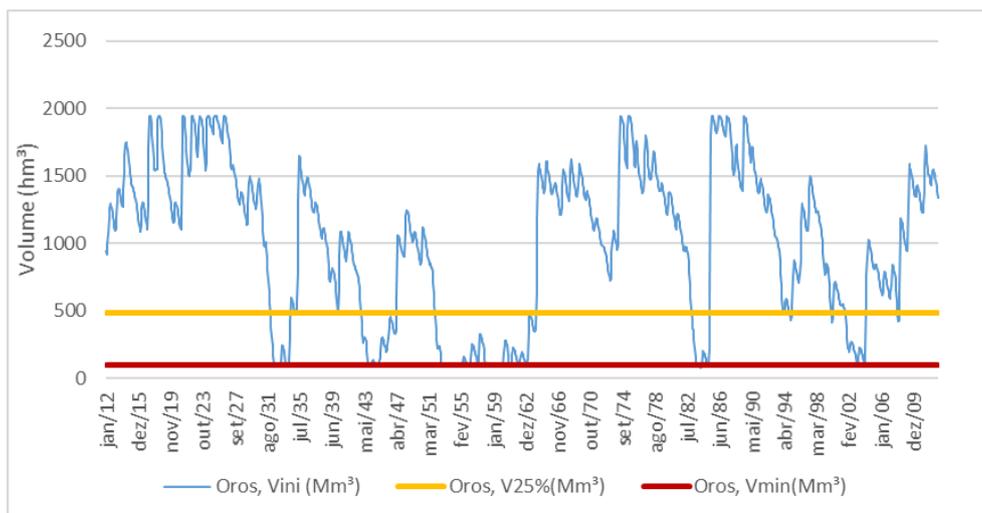


Figura 22 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-3 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

As transferências de águas ocorridas entre os reservatórios Orós e Castanhão são apresentadas na Figura 23. A transferência máxima ocorrida foi de 16,5 m³/s em aproximadamente 3% do tempo. Em aproximadamente 93% do tempo não existem transferências entre os dois reservatórios.

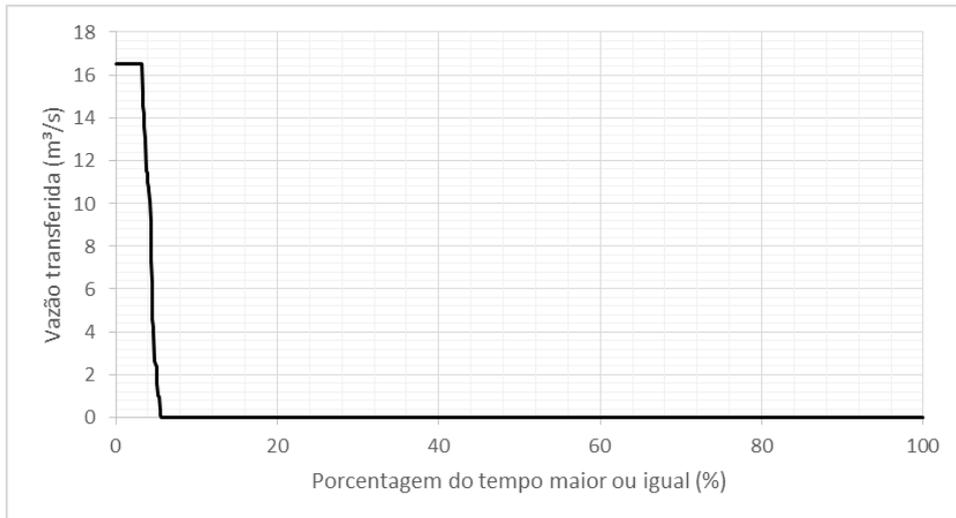


Figura 23 - Curva de permanência da transferência entre os reservatórios Orós e Castanhão para o Cenário 3.

O Eixão das águas apresenta transferência média de 7,5 m³/s, sendo a vazão máxima de 20 m³/s transferida em 4% do tempo. O canal do Trabalhador tem, em média, 2,45 m³/s de transferência mensal, apresentando em 20% do tempo vazão mensal de 3 m³/s (vazão máxima).

Na Figura 24 pode-se ver a curva de permanência das transferências ocorridas através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador, nos respectivos trechos finais (Aporte na RMF). No reservatório Pacoti-Riachão, na região metropolitana de Fortaleza, em média, ocorreu o aporte de 5,16 m³/s via Eixão das Águas, com transferência de águas ocorrendo em 55% do tempo.

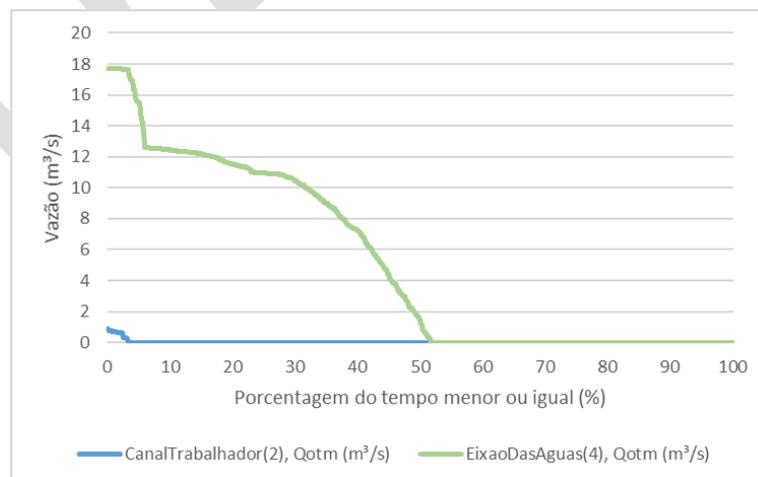


Figura 24 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).

Na Figura 25 observa-se o comportamento do reservatório Pacoti-Riachão. O reservatório apresentou em 91 meses da simulação (7,5% do tempo) volume inferior ao seu mínimo operacional, indicando a necessidade de utilização do seu volume morto para o suprimento das demandas. O reservatório Pacajús tem seu comportamento mostrado na Figura 26. Este reservatório apresentou 35 meses (2,9% do tempo) volume abaixo de 25% da capacidade máxima do reservatório. Em 19 meses da simulação (1,6% do tempo) apresentou volume igual ou inferior ao seu volume mínimo operacional. Com os baixos estoques destes reservatórios, seria necessário um plano de ação para a utilização dos recursos ainda disponíveis, indicando algum tipo de restrição de uso para as cidades. Cabe destacar que o reservatório Gavião não apresentou nenhum tipo de falha devido a transferência de risco feita para a região do Jaguaribe. Neste trabalho, optou-se por atender primeiramente as demandas da região metropolitana de Fortaleza em detrimento da demanda da Região do Jaguaribe. A Tabela 5 mostra os déficits de atendimento.

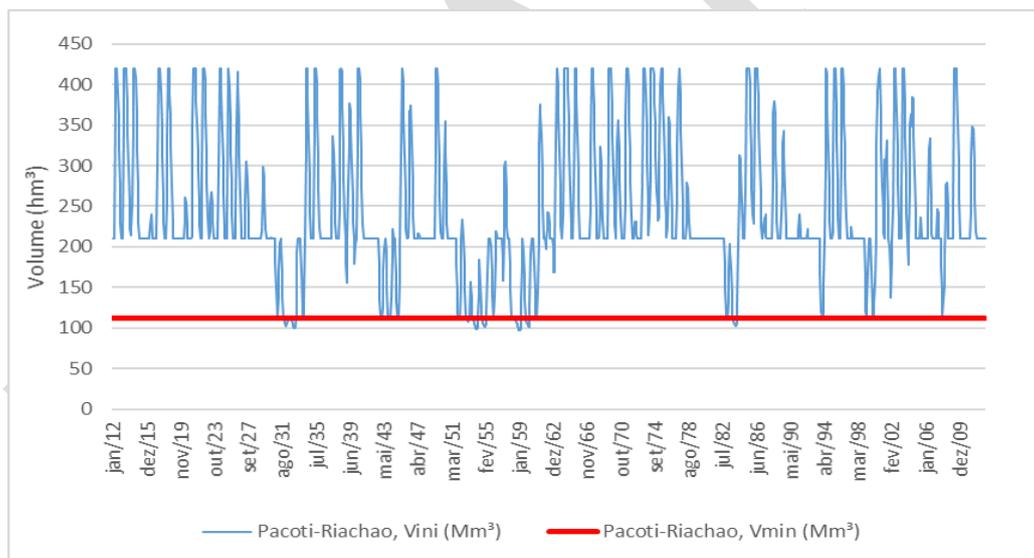


Figura 25 – Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-3 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

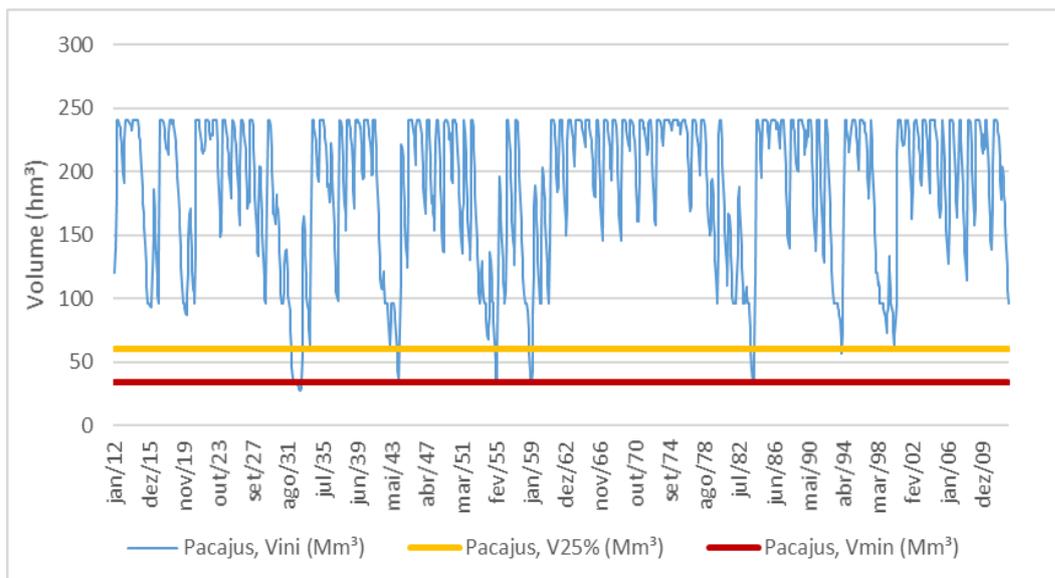


Figura 26– Simulação da operação do reservatório Pacajús, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-3 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco

Tabela 5 - Déficits de atendimento das demandas para o Cenário 3

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Orós	30,00	9,24	1494,86	4,54
Castanhão	29,00	17,82	5976,20	31,57
Banabuiú	10,00	12,62	1322,02	3,31
Distar	17,00	17,90	5708,33	8,78
Canal Trabalhador	9,00	6,02	476,06	2,31
Eixão Das Águas	10,00	6,68	433,31	2,00
Aracoiaba	16,00	1,32	13,85	0,67
Pacajús	0,00	0,00	0,00	0,73
Pacoti-Riachão	0,00	0,00	0,00	0,50
Fortaleza	0,00	0,00	0,00	12,98
Industria Pecém	0,00	0,00	0,00	1,81

5.4 Cenário 4

O cenário de demandas dFJ 2.2 com o cenário de vazões históricas do sistema, acrescentando a transposição das águas do rio São Francisco, limitando a capacidade máxima de chegada ao reservatório Castanhão em 20 m³/s, formaram o Cenário 4. O reservatório Castanhão apresentou (Figura 27) 318 meses (26,2% do tempo) com estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. O reservatório atinge o volume mínimo operacional (220 hm³) durante 102 meses da simulação (8,4% do tempo), atingindo o completo esvaziamento em 5,1% do tempo.

As águas da transposição do rio São Francisco chegam ao reservatório Castanhão conforme mostra a Figura 28. Este cenário indica a transferência máxima de 20 m³/s em 73% do tempo. Em 26% do tempo simulado não existe transferência. Durante o período, a vazão média resultou em 14,8 m³/s.

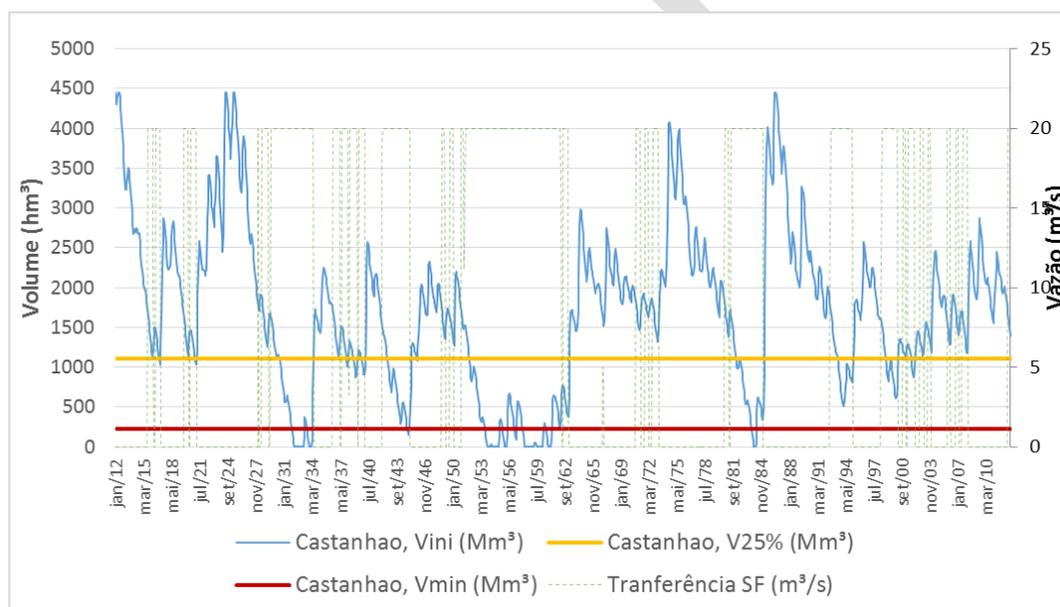


Figura 27- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

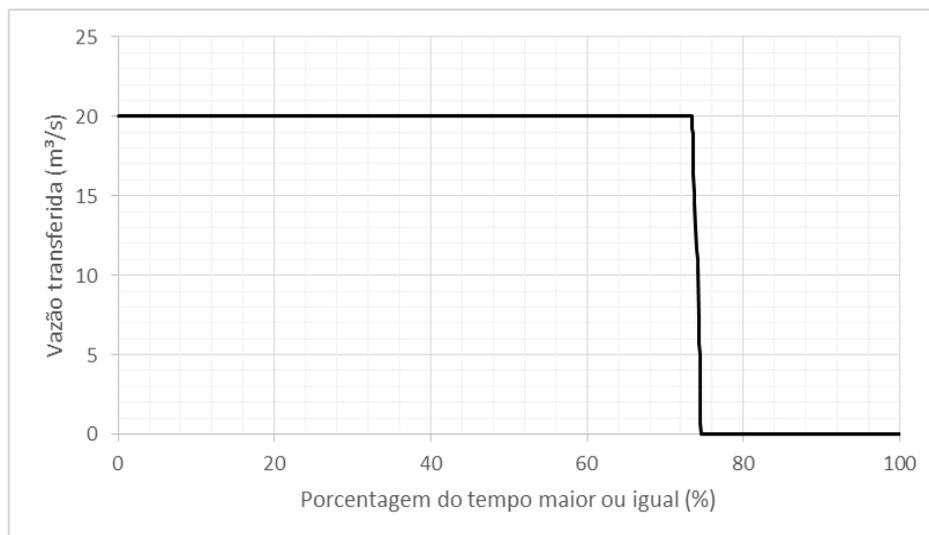


Figura 28 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.

O reservatório Orós apresentou comportamento indicado na Figura 29. Este apresenta em, aproximadamente, 26% do tempo da simulação estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. Seu volume mínimo operacional de 100 hm³ é atingindo em 102 meses do período (8,5% do tempo), indicando falhas no atendimento das demandas locais. O reservatório apresentou um período máximo de 28 meses consecutivos com falhas. O déficit total de água resultou em 1788 hm³ aproximadamente, e a vazão média fornecida foi 7,12 m³/s.

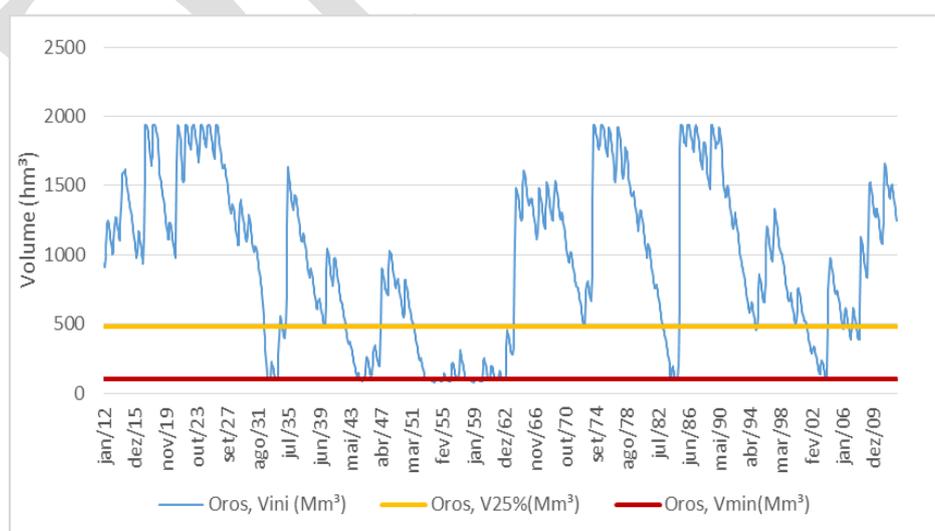


Figura 29 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

Na Figura 30 pode-se ver a curva de permanência das transferências ocorridas através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador, nos respectivos trechos finais (Aporte na RMF). No reservatório Pacoti-Riachão, na região metropolitana de Fortaleza, ocorreu em média o aporte de 7,73 m³/s via Eixão das Águas, com transporte ocorrendo em 65% do tempo.

O comportamento do reservatório Pacajús e do Pacoti-Riachão podem ser vistos na Figura 31 e na Figura 32. O reservatório Pacoti-Riachão atingiu seu volume mínimo operacional em 3,2% do tempo, enquanto o Pacajús em 0,7% do tempo simulado. Ao chegarem nesse volume, estes reservatórios necessitariam utilizar as águas do volume morto para o suprimento das demandas locais.

Os déficits de atendimento das demandas são mostrados na Tabela 6. O Distrito de Irrigação do Perímetro Tabuleiro de Russas (Distar) apresentou falha em 15,4 % do tempo, tendo a vazão média fornecida de 7,8 m³/s. A exceção das demandas dos reservatórios Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião, todas as outras demandas apresentaram falhas. Cabe destacar que a restrição de uso (falha de atendimento) na região do Jaguaribe, no Canal do Trabalhador e no Eixão das Águas contribuiu para que todas as demandas da RMF fossem atendidas.

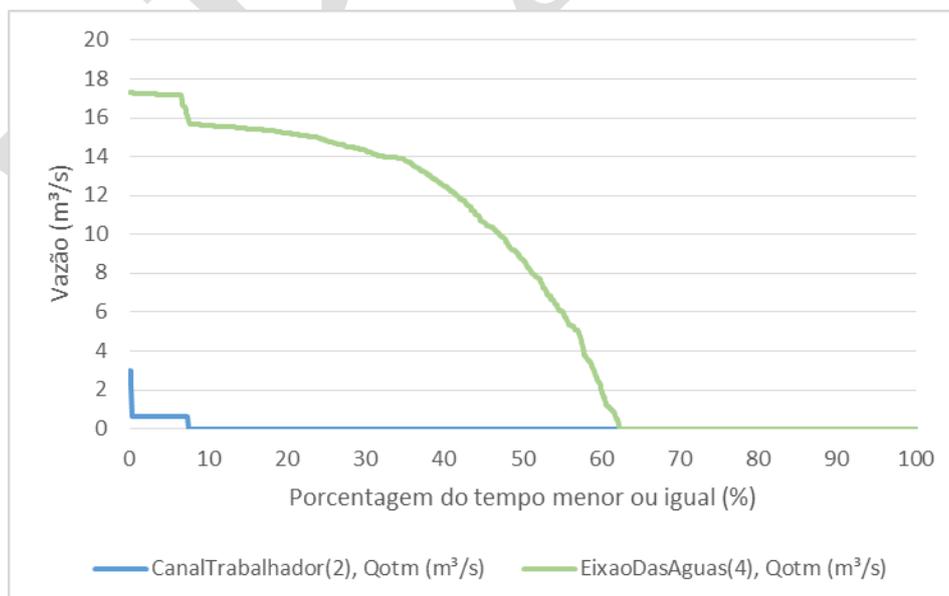


Figura 30 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).

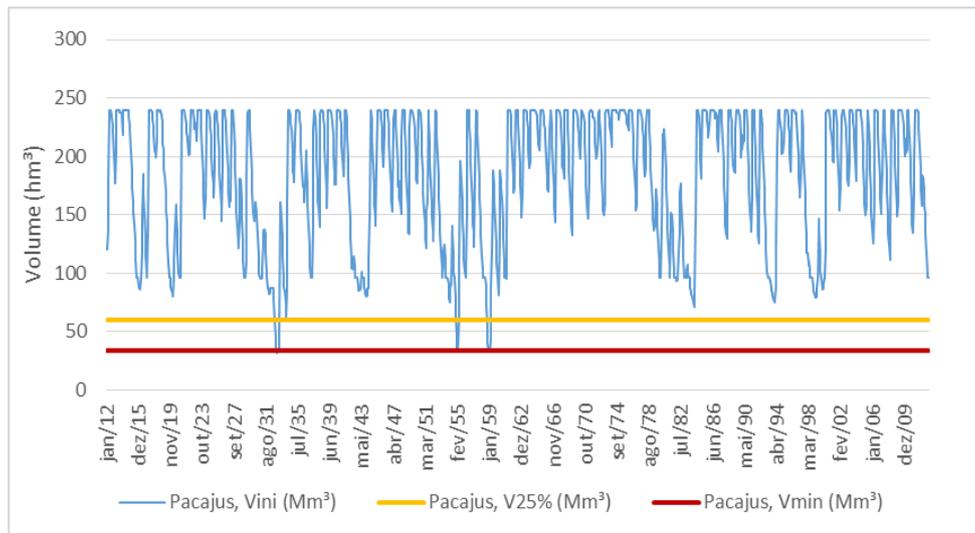


Figura 31 – Simulação da operação do reservatório Pacajus, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

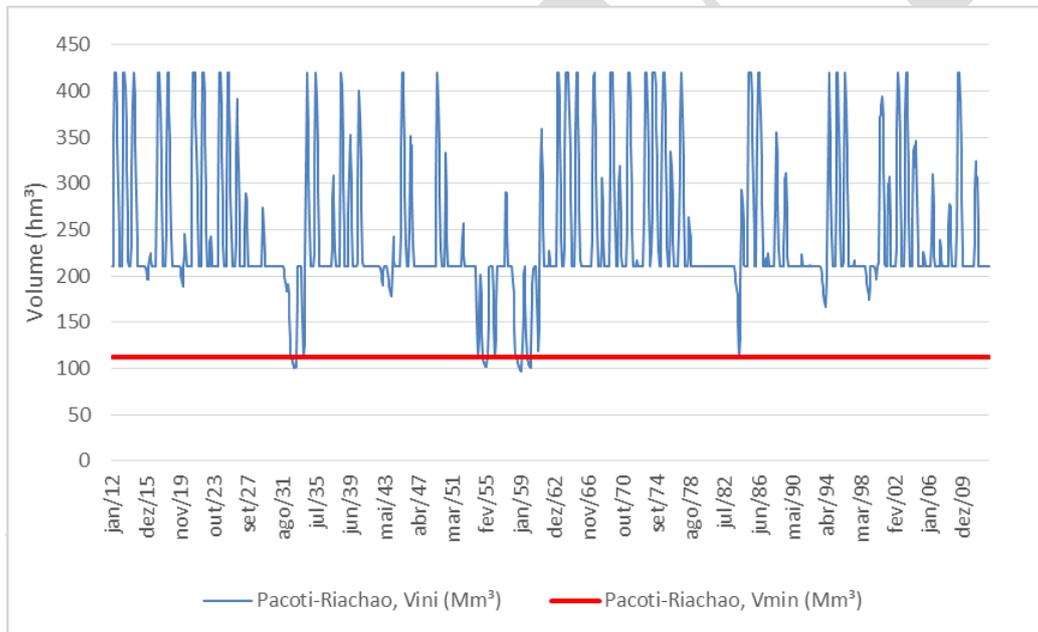


Figura 32 - Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 20 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

Tabela 6 - Déficits de atendimento das demandas para o cenário 4

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Orós	28,00	8,17	1787,93	7,12
Castanhão	8,00	3,22	876,91	17,89
Banabuiú	15,00	12,05	1450,37	4,36
Distar	17,00	15,43	4377,38	7,78
Canal Trabalhador	10,00	3,22	220,25	2,30
EixaoDasAguas	10,00	2,64	201,99	2,51
Aracoiaba	6,00	0,50	6,39	0,81
Pacajús	0,00	0,00	0,00	0,88
Pacoti-Riachão	0,00	0,00	0,00	0,60
Gaviao	0,00	0,00	0,00	15,58
CIPP	0,00	0,00	0,00	2,17

5.5 Cenário 5

O Cenário 5 foi montado incorporando o cenário de demandas dFJ 1.2 com o cenário de vazões históricas do sistema, acrescentando a transposição das águas do rio São Francisco, limitando a capacidade máxima de chegada no reservatório Castanhão em 10 m³/s. A Figura 33 demonstra o comportamento da operação do reservatório Castanhão. Observa-se que em 46% do tempo o reservatório Castanhão tem seu estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. O reservatório atinge o volume mínimo operacional (220 hm³) em 217 meses do período (18%). A simulação indica, ainda, o esvaziamento completo do Castanhão em 10,7 % do tempo (130 meses) do período simulado.

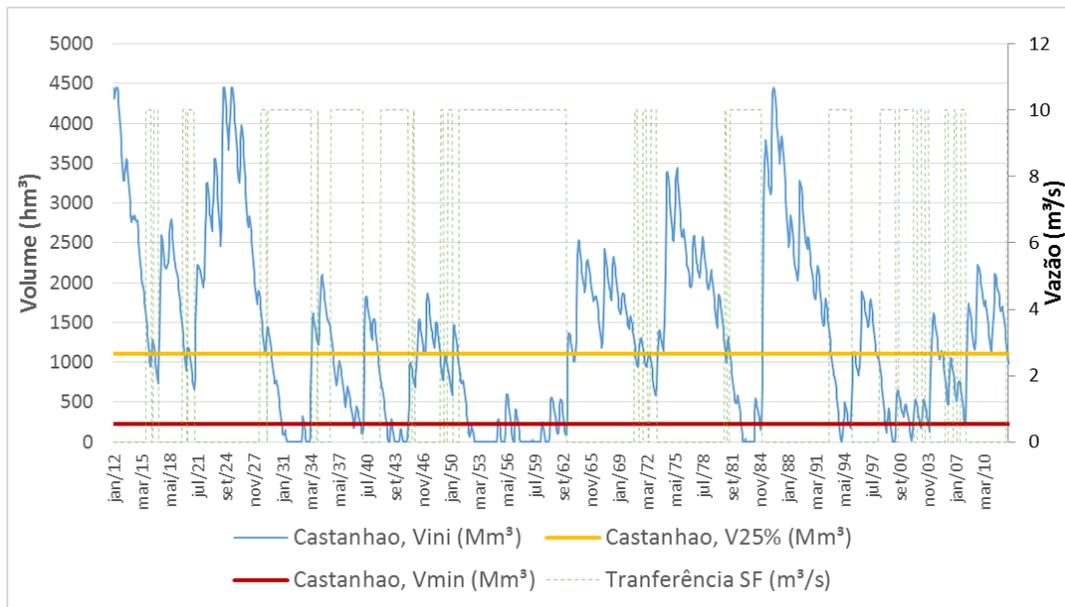


Figura 33- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

A Figura 34 apresenta a curva de permanência da vazão de chegada ao Castanhão das águas da transposição do rio São Francisco. Este cenário indica a transferência máxima de 10 m³/s em 80% do tempo. Em 19 % do tempo simulado não existe transposição das águas. Durante o período, a vazão média resultou em 8,04 m³/s.

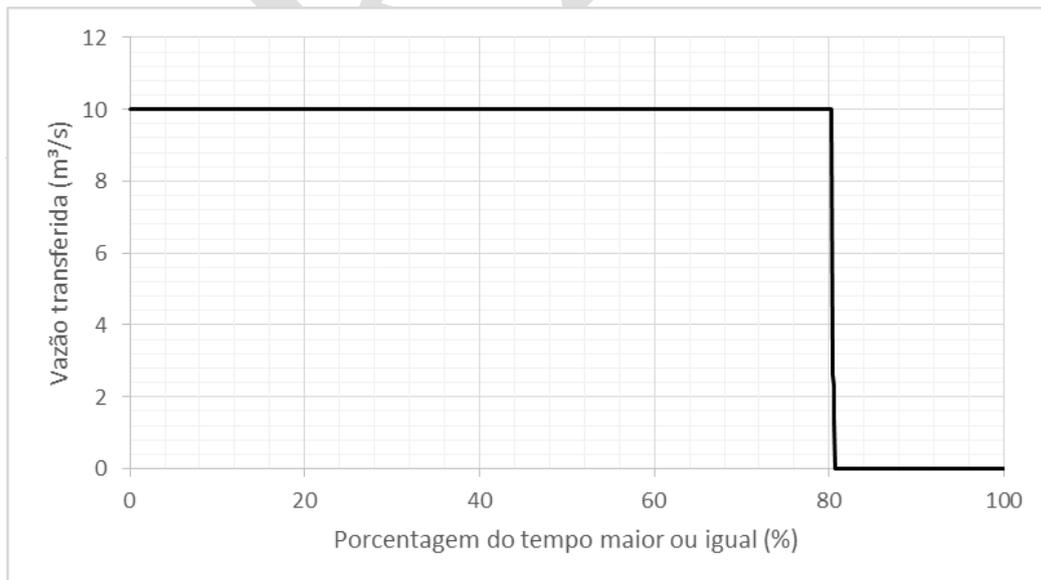


Figura 34 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.

O reservatório Orós apresentou comportamento indicado na Figura 35. Este apresenta em, aproximadamente, 27% do tempo da simulação estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. Seu volume mínimo operacional de 100 hm³ é atingindo em 11% do tempo, indicando falhas no atendimento das demandas locais. O reservatório apresentou um período máximo de 29 meses consecutivos com falhas. A vazão média fornecida foi 6,95 m³/s.

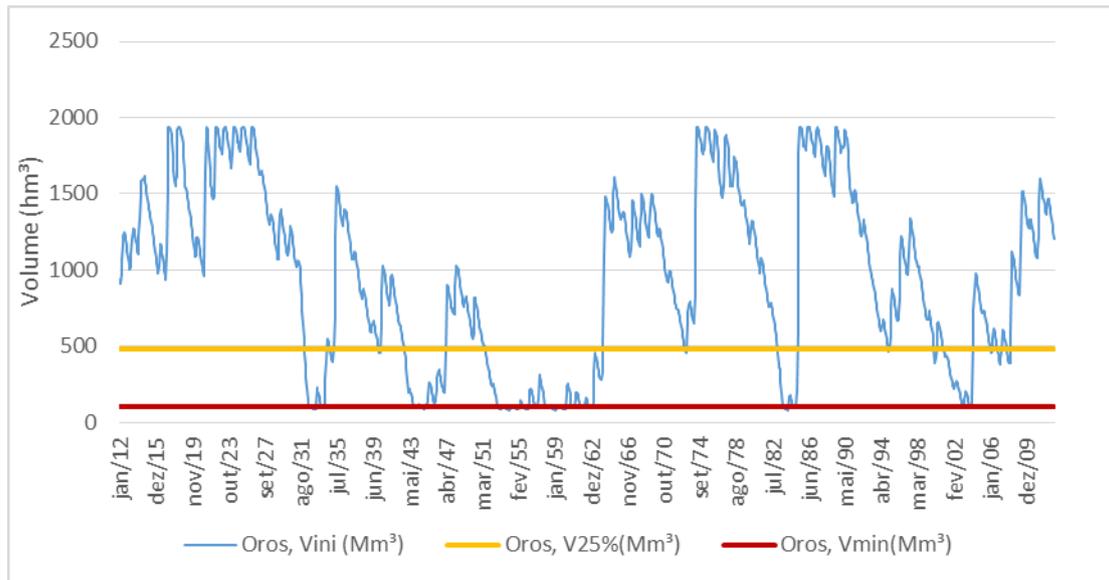


Figura 35 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

Na Figura 36 pode-se ver a curva de permanência das transferências ocorridas através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador, nos respectivos trechos finais (Aporte na RMF). No reservatório Pacoti-Riachão, na região metropolitana de Fortaleza, em média, ocorreu o aporte de 5,2 m³/s via Eixão das Águas, com transporte ocorrido em 55 % do tempo.

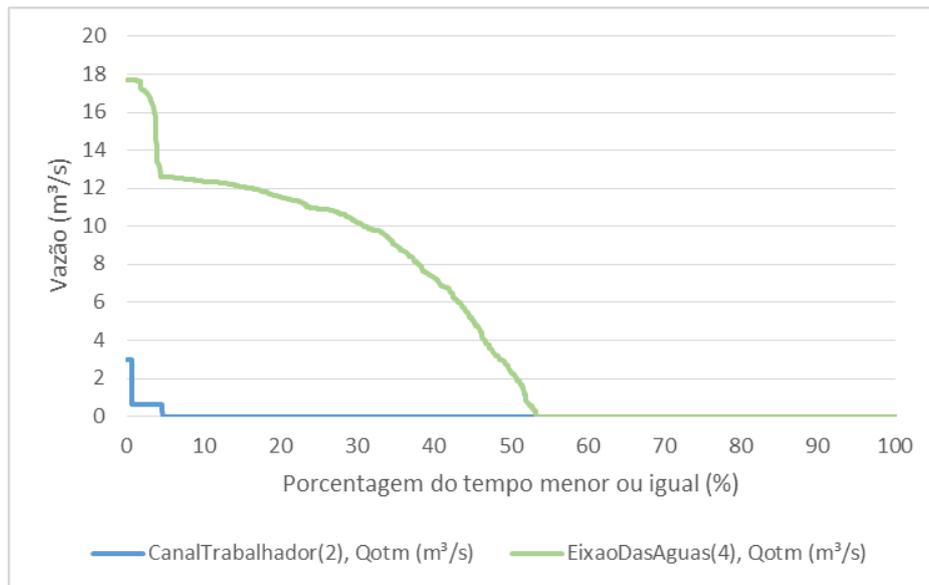


Figura 36 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).

Na Figura 37 observa-se o comportamento do reservatório Pacoti-Riachão. O reservatório apresentou em 6,4% do tempo da simulação volume inferior ao seu mínimo operacional, indicando a necessidade de utilização do seu volume morto, indicando possível redução da vazão de abastecimento local. A Tabela 7 mostra os déficits das demandas simuladas.

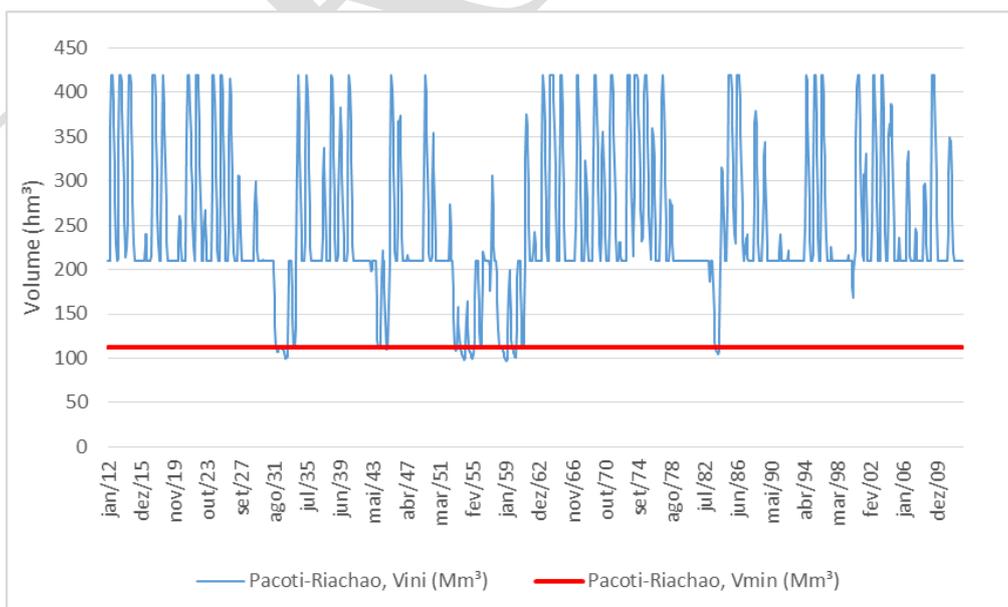


Figura 37 – Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

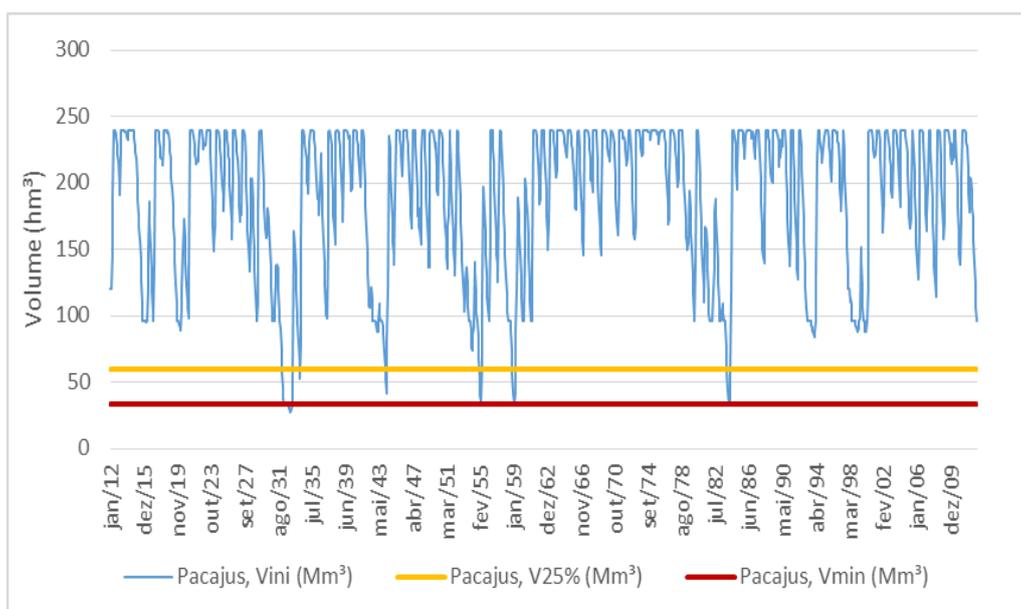


Figura 38– Simulação da operação do reservatório Pacajús, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 1-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

Tabela 7 - Déficits de atendimento das demandas para o Cenário 5

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Orós	29,00	10,56	2353,82	6,94
Castanhão	15,00	7,67	3213,31	17,15
Banabuiú	15,00	12,87	1572,04	4,32
Distar	17,00	16,50	4655,37	7,69
Canal Trabalhador	14,00	8,09	575,77	2,19
EixaoDasAguas	17,00	6,19	411,81	2,01
Aracoiaba	16,00	1,32	14,09	0,67
Pacajús	6,00	0,50	9,91	0,73
Pacoti-Riachão	0,00	0,00	0,00	0,50
Gaviao	6,00	0,50	51,35	12,96
CIPP	6,00	2,15	69,59	1,79

5.6 Cenário 6

O cenário de demandas dFJ 2.2 com o cenário de vazões históricas, acrescentando a transposição das águas do rio São Francisco, limitando a capacidade máxima de chegada no reservatório Castanhão em $10 \text{ m}^3/\text{s}$ formaram o cenário 6. A Figura 39 demonstra o comportamento da operação do reservatório Castanhão. Observa-se que em 55% do tempo o reservatório Castanhão tem seu estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. O reservatório atinge o volume mínimo operacional (220 hm^3) em 24% do tempo simulado. A simulação indica, ainda, o esvaziamento completo do Castanhão em 15% do tempo.

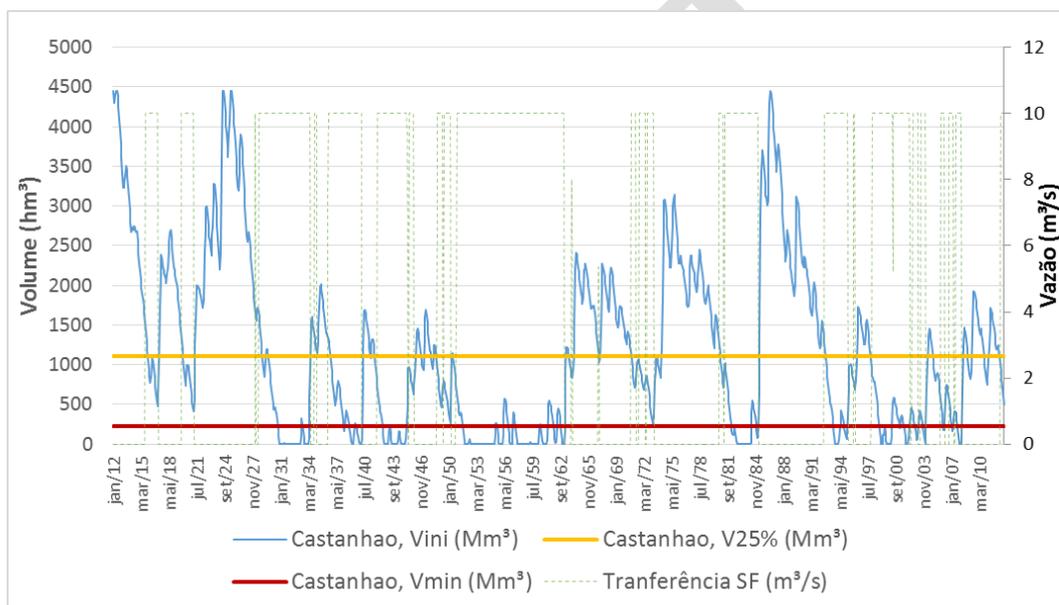


Figura 39- Simulação da operação do reservatório Castanhão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ de água transposta do rio São Francisco.

A Figura 40 apresenta a curva de permanência da vazão de chegada ao Castanhão das águas da transposição do rio São Francisco. Este cenário indica a transferência máxima de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ em 82% do tempo. Em 17 % do tempo simulado não existe transposição das águas. Durante o período, a vazão média resultou em $8,26 \text{ m}^3/\text{s}$.

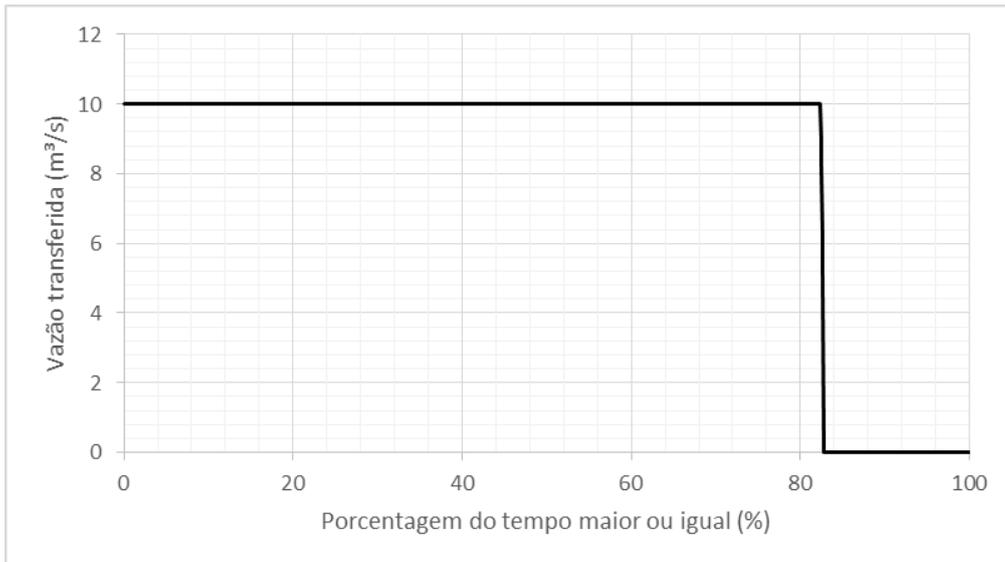


Figura 40 – Curva de permanência da transferência das águas do rio São Francisco para à região do Ceará: Vazão de chegada ao reservatório Castanhão.

O reservatório Orós apresentou comportamento indicado na Figura 41. Este apresenta em, aproximadamente, 32% do tempo da simulação estoque de água abaixo de 25% de sua capacidade máxima. Seu volume mínimo operacional de 100 hm³ é atingindo em 14% do tempo, indicando falhas no atendimento das demandas locais. O reservatório apresentou um período máximo de 33 meses consecutivos com falhas. A vazão média fornecida foi 6,73 m³/s.

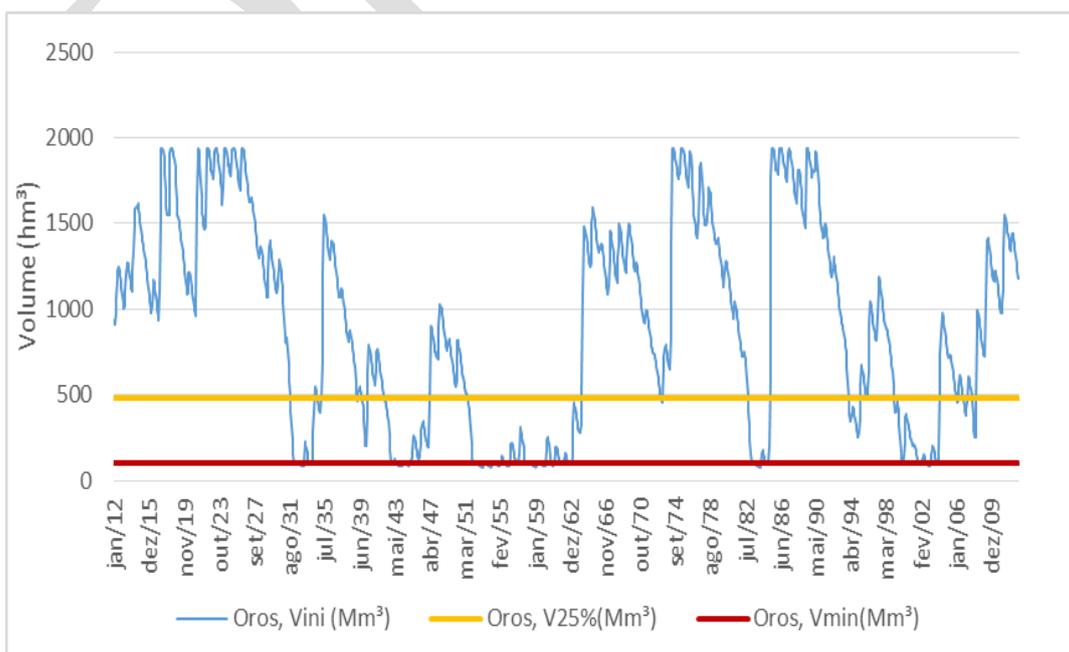


Figura 41 - Simulação da operação do reservatório Orós, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

Na Figura 36Figura 42 pode-se ver a curva de permanência das transferências ocorridas através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador, nos respectivos trechos finais (Aporte na RMF). No reservatório Pacoti-Riachão, na região metropolitana de Fortaleza, em média, ocorreu o aporte de 7,4 m³/s via Eixão das Águas, com transporte ocorrido em 63 % do tempo.

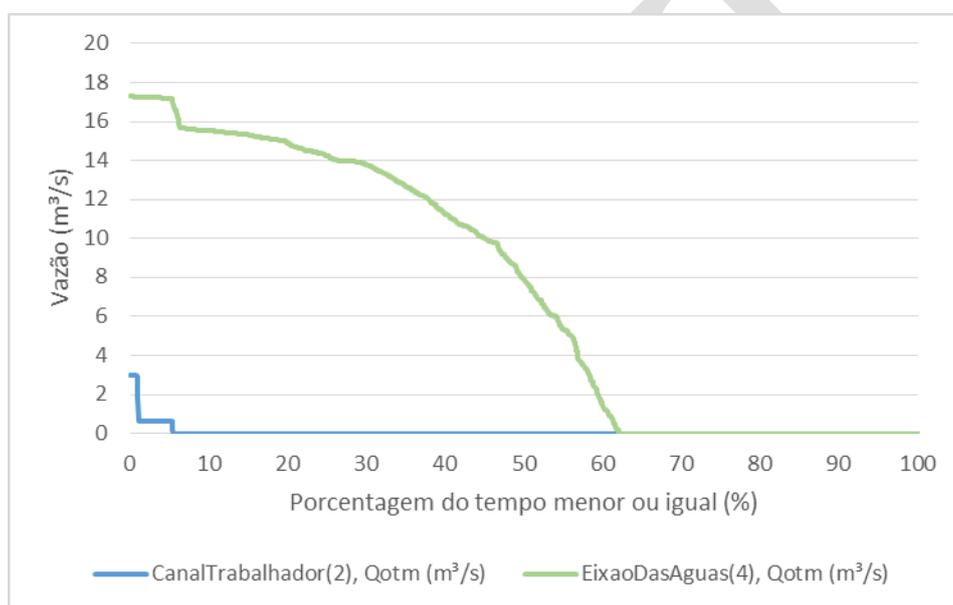


Figura 42 – Curva de permanência da transferência hídrica mensal ocorrida entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano através dos canais Eixão das Águas e Canal do Trabalhador (vazões de chegada à RMF).

Na Figura 37Figura 43 observa-se o comportamento do reservatório Pacoti-Riachão. O reservatório apresentou em 10% do tempo da simulação volume inferior ao seu mínimo operacional, indicando a necessidade de utilização do seu volume morto, indicando possível redução da vazão de abastecimento local. As simulações indicaram falha em até 4,5% do tempo na RMF. A Tabela 7 mostra os déficits das demandas simuladas.

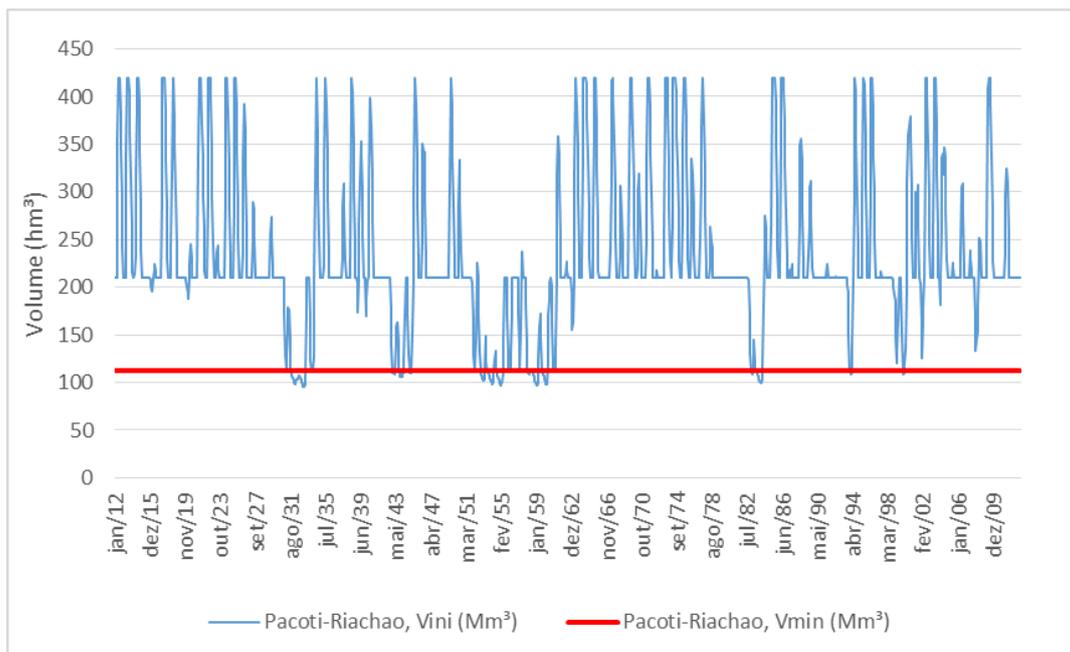


Figura 43 – Simulação da operação do reservatório Pacoti-Riachão, com vazões históricas de 1912-2012, demandas dFJ 2-2 e capacidade máxima de 10 m³/s de água transposta do rio São Francisco.

Tabela 8 - Déficits de atendimento das demandas para o Cenário 5

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (hm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
Orós	33,00	13,61	3019,18	6,73
Castanhão	20,00	10,64	4693,76	16,69
Banabuiú	15,00	13,04	1636,27	4,30
Distar	17,00	16,83	4725,80	7,67
Canal Trabalhador	16,00	10,81	750,06	2,14
EixaoDasAguas	20,00	9,41	750,43	2,33
Aracoiaba	20,00	2,32	29,80	0,80
Pacajús	9,00	0,83	22,65	0,87
Pacoti-Riachão	0,00	0,00	0,00	0,60
Gavião	8,00	3,38	238,83	15,51
CIPP	9,00	4,54	271,74	2,09

5.7 Cenário 7

A construção do cenário 7 foi realizado tomando o cenário de demandas dFJ 1.2 e combinando aos cenários de vazões futuras de três modelos: BCC-CSM1-1, HadGem2 e MIROC5. A seguir, serão apresentados os principais resultados deste cenário.

Na Tabela 9 observam-se as porcentagens de tempo em que os reservatórios permaneceram abaixo dos volumes de 25% do volume total, volume mínimo e volume zero. Nos três modelos, o reservatório Banabuiú apresenta os piores estoques, chegando a passar 56,5% do tempo com volume igual a zero no modelo HadGEM2. O reservatório Castanhão apresenta para o modelo HadGEM2 26% do tempo com volume igual zero. Nos outros dois modelos o reservatório também atinge o colapso. Os reservatórios da região Metropolitana de Fortaleza apresentaram volume zero no modelo HAdGEM2. Este modelo apresentou os piores resultados das simulações.

Tabela 9 - Resultados dos estoques dos reservatórios para o cenário de demanda dFJ 1.2 e vazões futuras dos modelos BCC-CSM1.1, HadGEM2 e MIROC5

	Reservatório	BCC-CSM1.1	HadGEM2-ES	MIROC5
Porcentagem do tempo com volume abaixo de 25% do total	Banabuiú	75%	80%	65%
	Castanhão	50%	50%	40%
	Orós	36%	43%	10,7%
	Pacajús	0%	13,5%	0,93%
	Pacoti-Riachão	0%	15%	0,93%
Porcentagem do tempo com volume abaixo de volume mínimo	Castanhão	25%	33,33%	13,5%
	Gavião	0%	10,88%	0%
	Orós	10%	28%	3%
	Pacajús	0%	12%	0,5%
	Pacoti-Riachão	1,6%	21%	1,6%
Porcentagem do tempo com volume igual a zero	Banabuiú	46%	56,5%	27%
	Castanhão	13%	26%	6,7%
	Gavião	0%	4,2%	0%
	Orós	0%	0%	0%
	Pacajús	0%	1,85%	0%
	Pacoti-Riachão	0%	0%	0%

As simulações mostram as demandas do reservatório Banabuiú e do Distrito de Irrigação do Tabuleiro de Russas (Distar) com as maiores falhas de atendimento. Apenas o modelo HadGEM2 apresentou falhas entre 9,5% e 11,2% para as demandas

da RMF. O modelo MIROC5 mostra menores severidades para o sistema. Neste modelo, o Orós apresentou falha em 2,8% do tempo e o Castanhão em 2%. O Banabuiú e o Distar apresentaram, respectivamente, 22,5% e 25,7% do tempo com falhas.

Tabela 10 - Frequência das falhas de atendimento da demanda necessária e vazões médias fornecidas para o cenário de demanda dFJ 1.2 e vazões futuras dos modelos BCC-CSM1.1, HadGEM2 e MIROC5.

	Demandas	BCC-CSM1.1	HadGEM2	MIROC5
Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Orós	8,10	28,01	2,78
	Castanhão	8,56	24,54	2,08
	Banabuiú	37,27	50,23	22,45
	Distar	42,82	54,17	25,69
	Canal Trabalhador	10,42	24,54	3,70
	Eixão Das Águas	1,62	19,91	1,62
	Pacajús	0,00	11,11	0,46
	Pacoti-Riachão	0,00	10,88	0,46
	Gavião	0,00	9,49	0,46
	CIPP	0,00	10,65	1,39
Vazão média fornecida (m³/s)	Orós	7,20	5,65	7,50
	Castanhão	17,43	14,41	17,83
	Banabuiú	3,25	2,59	3,84
	Distar	5,33	4,27	6,88
	Canal Trabalhador	2,14	1,79	2,30
	Eixão Das Águas	2,11	1,71	2,11
	Pacajús	0,73	0,65	3,34
	Pacoti-Riachão	0,50	0,45	1,26
	Gavião	12,98	12,66	12,98
	CIPP	1,81	1,63	1,79

A Figura 44 mostra a acumulação do reservatório Castanhão e da vazão mensal de transferência do rio São Francisco para os três modelos de variação do clima. Esta figura mostra a transferência entre as bacias ocorrendo quando o reservatório Castanhão atinge 50% do volume total. Estas frações do volume total foram estabelecidas na modelagem devido a limitação de 10m³/s do canal a montante do Castanhão. Elas fazem com que o sistema transfira água antes que o reservatório atinja o colapso. Na, Figura 44(b), observa-se um período de transferência iniciando em julho 2022, quando o reservatório possuía um volume de 2250 hm³, aproximadamente. A partir desse momento, o reservatório recebe de transferência o valor máximo de 10m³/s durante os

três anos seguintes quando atinge o colapso em junho de 2025, indicando que a capacidade máxima de 10m³/s seja um valor insuficiente para este cenário de demanda e vazões simulado com gatilho de transferência de 50% do volume máximo do Castanhão.

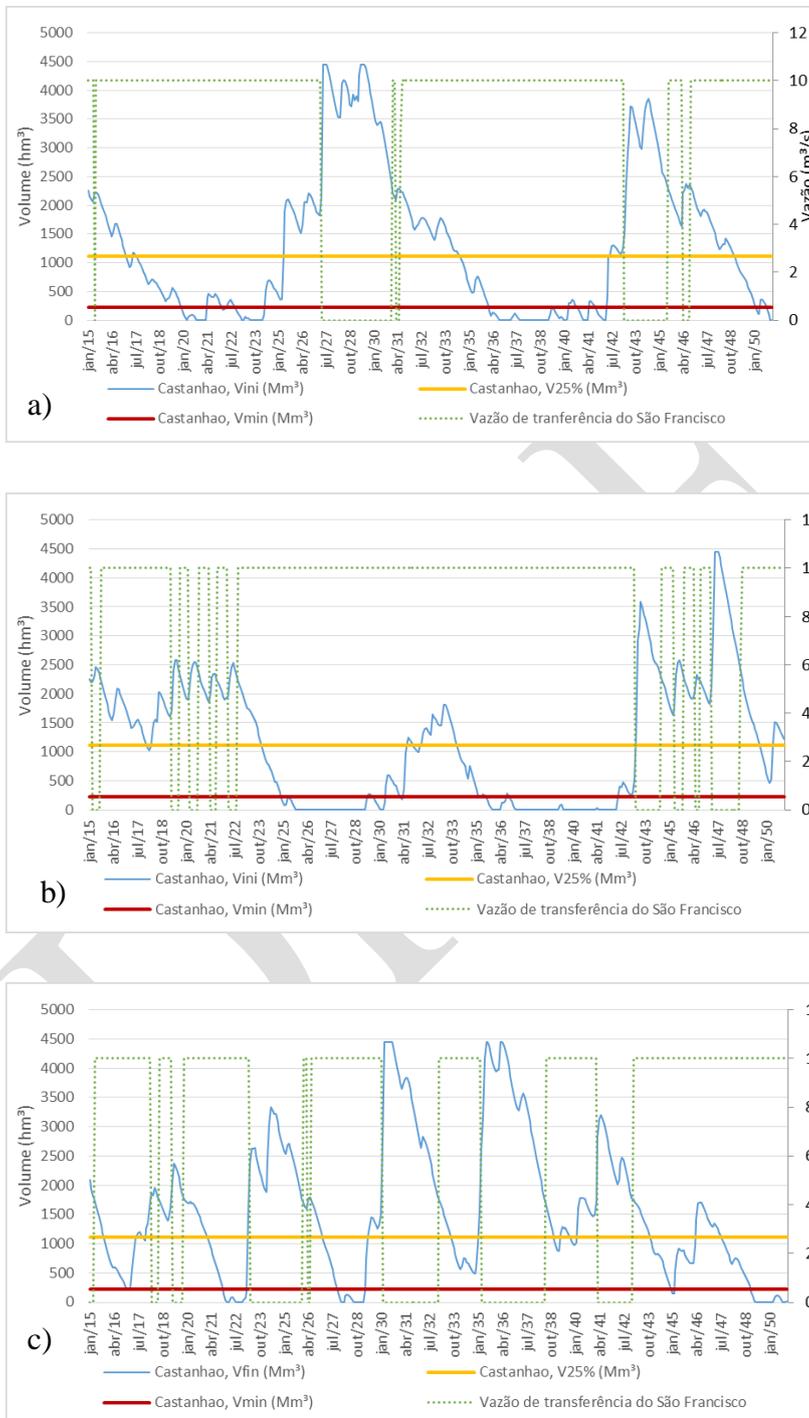


Figura 44- Acumulação do reservatório Castanhão e vazão da transposição do rio São Francisco para o cenário de demanda dFJ 1.2 e vazões futuras dos modelos: BCC-CSM1.1 (a), HadGEM2 (b) e MIROC5 (c).

6 CONCLUSÕES

As simulações mostraram a grande dependência das águas da transposição do rio São Francisco para o suprimento das demandas das regiões Jaguaribe e Metropolitana. As menores severidades ocorreram nos cenários em que foi considerado a vazão de 20m³/s transferida do rio São Francisco para o reservatório Castanhão. Entretanto, para que ocorra uma transferência desta magnitude, é necessária uma revisão da vazão outorgada do Projeto de Integração do rio São Francisco.

Quando adicionamos a informação das mudanças climáticas ao estudo, observamos que as severidades das secas se tornam ainda mais graves, com modelos apontando falha no atendimento da demanda acima de 10% do período para Fortaleza e RMF.

Estas simulações indicam a grande vulnerabilidade do sistema Jaguaribe-Metropolitano para os cenários futuros de aumento de demanda ou mudança nas vazões afluentes, apontando que o município de Fortaleza necessita investir em fontes alternativas de água para suprimento de parcela da sua demanda.

7 REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Nota Técnica n.º 390 / 2005/SOC: Análise do pedido de outorga de direito de uso de recursos hídricos para o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional.** Brasília, 2005.

ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** FAO-Irrigation and Drainage Paper. Roma, p. 297. 1998.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR., B. P. F.; CONEJO, J. G. L. A. **Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado.** Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fortaleza: [s.n.]. 1981. p. 42-62

SILVEIRA, C. S. **Modelagem integrada de meteorologia e recursos hídricos em múltiplas escalas temporais e espaciais: aplicação no Ceará e no setor hidroelétrico brasileiro.** 2014. 315f. Tese (Doutorado). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2014.

UNDESA. **World Population Prospects: the 2008 revision, highlights.** New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (UNDESA), 2009.

UN-HABITAT. **Meeting Development Goals in Small Urban Centres: water and sanitation in the world's cities.** Nairobi: UNHabitat; London: Earthscan, 2006.