



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DANIEL ANTONIO CAMELO CID

**ALOCAÇÃO INTERTEMPORAL E MÚLTIPLOS USUÁRIOS: ESTUDO DE
CASO SISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANO**

FORTALEZA
2017

DANIEL ANTONIO CAMELO CID

ALOCAÇÃO INTERTEMPORAL E MÚLTIPLOS USUÁRIOS: ESTUDO DE CASO
SISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

FORTALEZA
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C51a Cid, Daniel Antonio Camelo.
Alocação intertemporal e múltiplos usuários : estudo de caso sistema Jaguaribe-Metropolitano / Daniel Antonio Camelo Cid. – 2017.
130 f.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.
1. Operação de reservatórios. 2. Alocação de água. 3. Seca. I. Título.

CDD 627

DANIEL ANTONIO CAMELO CID

ALOCAÇÃO INTERTEMPORAL E MÚLTIPLOS USUÁRIOS: ESTUDO DE CASO
SISTEMA JAGUARIBE-METROPOLITANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

Aprovada em: 16 / 02 / 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Rubens Sonsol Gondim
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado e me ajudado até aqui.

Aos meus pais Antônio Cid e Sheila Camelo, que sempre me apoiaram e incentivaram na concretização desta etapa da vida. Obrigado por acreditarem em mim.

Aos meus irmãos Danielle Cid e David Cid pela forma como me inspiraram a batalhar para alcançar os meus objetivos. A minha tia Keila Camelo, que sempre esteve presente em minha vida.

Ao meu amor, amigo e companheiro Cristiano Soares que me apoiou nos momentos de inquietações e tornou meu dia-a-dia mais feliz. O mundo será nosso!

Aos meus amigos do PÓS-DEHA pelas reflexões, críticas, sugestões e apoios recebidos.

Aos meus professores, em especial ao professor Assis Filho, orientador e amigo, que sempre reservou um tempo para me orientar na elaboração deste trabalho. Muito obrigado!

À COGERH pelos dados disponibilizados para elaboração deste trabalho.

Ao CNPQ pelo financiamento da bolsa durante o período do mestrado

RESUMO

As incertezas quanto à disponibilidade da água no Semiárido brasileiro marcam as dificuldades da gestão de recursos hídricos nessa região. Na tentativa de combater essas incertezas, utilizam-se os reservatórios como reguladores de água em períodos de estiagens. A operação desses reservatórios e a alocação da água disponível constituem um processo de tomada de decisão, cujas escolhas podem ser auxiliadas por modelos de simulação e otimização de sistema de recursos hídricos. Propõem-se com este trabalho a definição de uma regra de operação de reservatórios com vistas a promover a alocação equitativa e eficiente dos recursos hídricos, integrando os mecanismos de alocação de curto e longo prazo. O local de aplicação foi o sistema de reservatórios Jaguaribe-Metropolitano, localizado no estado do Ceará. A metodologia incorporou a preferência dos gestores de água na definição de riscos de desabastecimento, racionamento de usos e transferência hídrica entre as bacias, que serviram como critérios para a definição da política de operação dos reservatórios com salvaguardas. A regra de operação gerada mostrou-se com bons resultados, capaz de ser aplicada na operação real do sistema. Os reservatórios que antes estavam sujeitos ao colapso devido ao fato da demanda instalada ser superior à vazão regularizada, obtiveram um bom desempenho nas simulações.

Palavras-chave: Operação de reservatórios. Alocação de água. Seca.

ABSTRACT

The uncertainties regarding the availability of water in the Brazilian semi-arid region mark the difficulties of managing these resources in this region. In order to combat these uncertainties, reservoirs are used as water regulators during periods of drought. The operation of these reservoirs and the allocation of available water are part of the decision-making process, whose choice options can be aided by simulation models and optimization of the water resources system. This work proposes the definition of a reservoir operation rule with the objective of promoting the equitable and efficient allocation of water resources, integrating short and long term allocation mechanisms. The application site was the Jaguaribe-Metropolitano reservoir system, located in the state of Ceará. The methodology incorporated the preference of users and water managers in the definition of risks of thinning, rationing of uses and water transfer between the basins, which served as criteria for the definition of the policy of operation of the reservoirs with Hedging. The rules of operations generated proved to be successful, capable of being applied to the actual operation of the system. The reservoirs that were previously subject to collapse due to the installed demand being higher than the regularized flow, obtained a good performance in the simulations.

Keywords: Reservoir operation. Water Allocation. Drought.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Regra de Operação Padrão (SOP)	26
Figura 2	- Curvas guias para reservatórios de múltiplos usos	27
Figura 3	- Representação das equações geradas pela relação entre as Curvas Guias e de Salvaguarda.....	28
Figura 4	- Mapa esquemático do Sistema Jaguaribe-Metropolitano	32
Figura 5	- Variação sazonal das afluições dos reservatórios que compõem o sistema Jaguaribe-Metropolitano, representando a média mensal, a mediana e quartis 25%(Q25) e 75% (Q75): (a)Banabuiú; (b) Orós; (c) Castanhão; (d) Aracoiaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.....	35
Figura 6	- Vazão média anual afluente aos reservatórios que compõem o sistema Jaguaribe-Metropolitano no período de 1912 a 2012, média móvel de 10 anos e média da série histórica: (a)Orós; (b) Banabuiú; (c) Castanhão; (d) Aracoiaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g)Gavião	37
Figura 7	- Curvas de cota-área-volume dos principais reservatórios das bacias do Jaguaribe e Metropolitano: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião	40
Figura 8	- Demandas hídricas em m ³ /s do sistema Jaguaribe-Metropolitano.....	43
Figura 9	- Diagrama unifilar do sistema Jaguaribe - Metropolitano, com a representação das demandas exclusivas de cada infraestrutura de abastecimento	43
Figura 10	- Desenho esquemático do sistema Jaguaribe-Metropolitano agregado	49
Figura 11	- Vazão média mensal (m ³ /s) dos reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano.....	50
Figura 12	- Regra de operação com salvaguardas.....	53
Figura 13	- Construção de Níveis Metas do reservatório equivalente Jaguaribe: (a) Volume Meta 1; (b) Volume Meta 2; (c) Volume Meta 3; (d) Volume Meta 4; (e) Níveis Metas.....	55
Figura 14	- Vazão regularizada dos Reservatórios equivalentes Jaguaribe (a) e Metropolitano (b) para garantias de 60% a firma (100%).....	68
Figura 15	- Níveis Metas 1 do reservatório Equivalente Jaguaribe definido a partir da preferência dos Técnicos COGERH Fortaleza.....	69
Figura 16	- Níveis Metas 1 do reservatório Equivalente Metropolitano definido a partir da preferência dos Técnicos COGERH Fortaleza.....	69
Figura 17	- Simulação da operação do reservatório equivalente Jaguaribe com os níveis metas 1.....	70
Figura 18	- Simulação da operação do reservatório equivalente Metropolitano com os níveis metas 1.....	71
Figura 19	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 1: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano.....	71

Figura 20	- Níveis Metas 2 do reservatório Equivalente Jaguaribe definido a partir da preferência dos Técnicos COGERH gerência interior.....	72
Figura 21	- Níveis Metas 2 do reservatório Equivalente Metropolitano definido a partir da preferência dos Técnicos COGERH gerência interior.....	72
Figura 22	- Simulação da operação do reservatório equivalente Jaguaribe com os níveis metas 2.....	73
Figura 23	- Simulação da operação do reservatório equivalente Metropolitano com os níveis metas 2.....	74
Figura 24	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 2: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano.....	74
Figura 25	- Níveis Metas 3 do reservatório Equivalente Jaguaribe definido a partir da preferência proposta nesta dissertação.....	75
Figura 26	- Níveis Metas 3 do reservatório Equivalente Metropolitano definido a partir da preferência proposta nesta dissertação.....	75
Figura 27	- Simulação da operação do reservatório equivalente Jaguaribe com os níveis metas 3.....	76
Figura 28	- Simulação da operação do reservatório equivalente Metropolitano com os níveis metas 3.....	77
Figura 29	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 3: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano.....	77
Figura 30	- Operação do sistema Jaguaribe com os níveis metas 1 para o sistema equivalente e desagregado.....	78
Figura 31	- Operação do sistema Metropolitano com os níveis metas 1 para o sistema equivalente e desagregado.....	78
Figura 32	- Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 1.....	79
Figura 33	- Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 1.....	80
Figura 34	- Operação do reservatório Gavião para a regra de operação Nível Meta 1.....	80
Figura 35	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 1 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.....	82
Figura 36	- Operação do sistema Jaguaribe com os níveis metas 2 para o sistema equivalente e desagregado.....	84
Figura 37	- Operação do sistema Metropolitano com os níveis metas 2 para o sistema equivalente e desagregado.....	85
Figura 38	- Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 2.....	85
Figura 39	- Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 2.....	86
Figura 40	- Operação do reservatório Gavião para a regra de operação Nível Meta 2.....	86

Figura 41	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 2 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoíaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.....	88
Figura 42	- Operação do sistema Jaguaribe com os níveis metas 3 para o sistema equivalente e desagregado.....	90
Figura 43	- Operação do sistema Metropolitano com os níveis metas 3 para o sistema equivalente e desagregado.....	91
Figura 44	- Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 3.....	91
Figura 45	- Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 3.....	92
Figura 46	- Operação do reservatório Gavião para a regra de operação Nível Meta 3.....	92
Figura 47	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 3 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoíaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.....	94
Figura 48	- Curva de permanência da acumulação dos reservatórios Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b) para as regras de operação Nível Meta 1, 2 e 3.....	96
Figura 49	- Curva de permanência da severidade das falhas de atendimento das demandas do reservatório Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b) para as operações Níveis Metas 1,2 e 3.....	97
Figura 50	- Curva de permanência das transferências ocorridas entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano para as regras de operação Nível Meta 1,2 e 3.....	97
Figura 51	- Níveis metas 4 dos reservatórios Equivalentes Jaguaribe e Metropolitano definido a partir das mesmas preferências de Níveis Metas 3, incorporando o momento da tomada de decisão sobre a restrição dos usos nos meses de abril e julho.....	100
Figura 52	- Simulação da operação dos reservatórios equivalente Jaguaribe e Metropolitano com os níveis Metas 4.....	101
Figura 53	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 4: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano.....	102
Figura 54	- Operação do sistema Jaguaribe (a) e Metropolitano (b) com os níveis metas 4 para o sistema equivalente e desagregado.....	103
Figura 55	- Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 4.....	104
Figura 56	- Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 4.....	104
Figura 57	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 4 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoíaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.....	106

Figura 58	- Simulação da operação dos reservatórios equivalente Jaguaribe e Metropolitano com os níveis Metas 5.....	110
Figura 59	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 5: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano.....	111
Figura 60	- Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 5.....	112
Figura 61	- Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 5.....	112
Figura 62	- Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 4 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.....	114
Figura 63	- Curva de permanência da acumulação dos reservatórios Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b) para as regras de operação Nível Meta 4 e 5.....	116
Figura 64	- Curva de permanência da severidade das falhas de atendimento das demandas do reservatório Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b).....	117
Figura 65	- Curva de permanência das transferências ocorridas entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Vazões regularizadas (m ³ /s) com garantia de 85%, 90% e firme (100%) para os reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano..	39
Tabela 2	- Média das vazões afluentes, desvio padrão e eficiência dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe – Metropolitano.....	39
Tabela 3	- Evaporação média(mm) dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano.....	41
Tabela 4	- Volumes característicos do sistema de abastecimento de Fortaleza..	41
Tabela 5	- Demandas de referência do sistema Jaguaribe-Metropolitano.....	44
Tabela 6	- Matriz de transição dos estados de secas dos reservatórios. A linha representa o nível no mês ‘t’ enquanto a coluna representa o nível no mês ‘t+1’.....	61
Tabela 7	- Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 1.....	71
Tabela 8	- Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 2.....	73
Tabela 9	- Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 3.....	76
Tabela 10	- Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1.....	81
Tabela 11	- Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1.....	81
Tabela 12	- Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 1.....	83
Tabela 13	- Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 4.....	84
Tabela 14	- Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1.....	87
Tabela 15	- Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1.....	87
Tabela 16	- Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 2.....	89
Tabela 17	- Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 2.....	90
Tabela 18	- Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1.....	93
Tabela 19	- Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1.....	93

Tabela 20	- Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 3.....	95
Tabela 21	- Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 3.....	95
Tabela 22	- Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 4.....	102
Tabela 23	- Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 4.....	105
Tabela 24	- Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 4.....	105
Tabela 25	- Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 4.....	107
Tabela 26	- Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 4.....	107
Tabela 27	- Matriz de transição de níveis de seca para racionamento do reservatório Castanhão, utilizando a regra de operação Nível Meta 4.....	108
Tabela 28	- Matriz de transição de níveis de seca para racionamento do sistema Metropolitano, utilizando a regra de operação Nível Meta 4.....	108
Tabela 29	- Matriz de transição de níveis de seca para racionamento do reservatório Castanhão, utilizando a regra de operação Nível Meta 5.....	109
Tabela 30	- Matriz de transição de níveis de seca para racionamento do sistema Metropolitano, utilizando a regra de operação Nível Meta 5.....	109
Tabela 31	- Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 4.....	111
Tabela 32	- Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 5.....	113
Tabela 33	- Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 5.....	113
Tabela 34	- Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 5.....	115
Tabela 35	- Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 5.....	115

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	- Definição e caracterização dos estados de secas.....	45
	Exemplo de definição dos riscos toleráveis para os reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano em diferentes estados de seca: Frequência de falha máxima admitida, Frequência de tempo no nível	
Quadro 2	- e Coeficientes de racionamento.....	47
	Exemplo da matriz do trade - off de transferência entre o sistema	
Quadro 3	- Jaguaribe-Metropolitano. Valores em m ³ /s.....	48
	Gatilhos de transferência entre os reservatórios dentro da mesma	
Quadro 4	- bacia.....	58
	Trade-off de bombeamento entre os sistemas Jaguaribe-Metropolitano para a construção da regra de operação Nível Meta 5, com vistas a aumentar os estoques de água na RMF e reduzir o	
Quadro 5	- impacto provocado pela transição brusca entre os níveis.....	63
	Definição dos riscos toleráveis de desabastecimento e os valores de	
Quadro 6	- transferência hídrica propostos de técnicos da COGERH Fortaleza....	65
	Definição dos riscos toleráveis de desabastecimento e os valores de	
Quadro 7	- transferência hídrica propostos de técnicos da COGERH Interior.....	66
	Definição dos riscos toleráveis de desabastecimento e os valores de	
Quadro 8	- transferência hídrica propostos pelo pesquisador.....	67
	Estados de seca mensais dos reservatórios Castanhão (a) e do	
Quadro 9	- sistema Metropolitano (b) para a regra de Nível Meta 3.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AH	Abastecimento Humano
ANI	Dessedentação de animal
AU	Abastecimento Urbano
CBHs	Comitês de Bacia Hidrográfica
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
IND	Industria
IRR	Irrigação
REJ	Reservatório Equivalente Jaguaribe
REM	Reservatório Equivalente Metropolitano
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivo	20
1.3	Escopo.....	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	Operação de Reservatórios.....	21
2.1.1	<i>Modelos de Otimização.....</i>	<i>22</i>
2.1.2	<i>Operação de reservatórios com salvaguardas</i>	<i>25</i>
2.2	Alocação de Água	28
3	LOCAL DE ESTUDO	32
3.1	Oferta.....	34
3.1.1	<i>Vazões afluentes.....</i>	<i>34</i>
3.1.2	<i>Curva Cota-Área-Volume.....</i>	<i>40</i>
3.1.3	<i>Taxa de evaporação</i>	<i>41</i>
3.1.4	<i>Volumes máximos e mínimos</i>	<i>41</i>
3.2	Demanda.....	42
4	METODOLOGIA	45
4.1	Estratégia Metodológica	45
4.2	Definição da preferência dos usuários.....	46
4.2.1	<i>Risco Tolerável.....</i>	<i>46</i>
4.2.2	<i>Trade-off de transferência entre sistemas/reservatórios</i>	<i>47</i>
4.3	Definição da Regra de operação utilizando Níveis Metas.....	48
4.3.1	<i>Construção do Reservatório Equivalente</i>	<i>49</i>
4.3.2	<i>Balanço Hídrico do Reservatório.....</i>	<i>52</i>
4.3.3	<i>Operação com salvaguardas</i>	<i>52</i>
4.3.4	<i>Construção dos níveis metas</i>	<i>53</i>
4.3.5	<i>Modelo de Otimização</i>	<i>55</i>
4.4	Avaliação do impacto da regra em longo prazo.....	57
4.4.1	<i>Frequência de falhas no nível.....</i>	<i>59</i>

4.4.2	<i>Garantia no nível</i>	59
4.4.3	<i>Resiliência do sistema</i>	59
4.4.4	<i>Severidade das falhas</i>	60
4.4.5	<i>Vulnerabilidade do sistema</i>	60
4.4.6	<i>Transição entre os níveis de seca</i>	61
4.5	Construção de novas regras de operação a partir das anteriores	61
4.5.1	<i>Tomada de decisão sobre racionamento e transferência.</i>	62
4.5.2	<i>Regra de bombeamento mínimo para RMF</i>	63
5	RESULTADOS	63
5.1	Definição da preferência dos usuários	64
5.2	Definição da Regra de operação utilizando Níveis Metas	68
5.2.1	<i>Níveis Metas 1</i>	69
5.2.2	<i>Níveis Metas 2</i>	72
5.2.3	<i>Níveis Metas 3</i>	74
5.3	Avaliação do impacto da regra em longo prazo	77
5.3.1	<i>Regra Níveis Metas 1</i>	78
5.3.2	<i>Regra Níveis Metas 2</i>	84
5.3.3	<i>Regra Níveis Metas 3</i>	90
5.3.4	<i>Comparação entre regras</i>	96
5.4	Construção de novas regras de operações	98
5.4.1	<i>Regra Nível Meta 4</i>	100
5.4.2	<i>Regra Níveis Metas 5</i>	109
5.4.3	<i>Comparação entre as regras</i>	116
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	118
	REFERÊNCIAS	120
	APÊNDICE A – DADOS DO RESERVATÓRIO EQUIVALENTE	123

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade temporal e espacial do regime de chuvas, os rios intermitentes e as altas taxas de evaporação marcam incertezas quanto à disponibilidade da água no Semiárido brasileiro. Para combater a incerteza utilizam-se os reservatórios como transportadores de água no tempo, armazenando água em períodos chuvosos e liberando em períodos de estiagens.

As liberações dos reservatórios são realizadas através das políticas de regras de operações que indicam o volume do reservatório ou a vazão efluente que se pretende atingir em determinados períodos de tempo, como o diário, decenal, semanal ou mensal (LOUCKS; STEDINGER; HAITH, 1981), visando o suprimento das demandas para se atingir determinados objetivos (sociais, econômicos, ambientais).

Em regiões que apresentam grande ocorrência de períodos secos, comumente adota-se uma operação de reservatórios baseada em salvaguardas. Os operadores reduzem as liberações nesses períodos na tentativa de salvar um pouco de água no reservatório para futuras retiradas (LOUCKS; BEEK, 2005). Essa medida visa manter alguma disponibilidade do recurso hídrico impondo racionamento aos usos no momento em que o reservatório atinge um volume de alerta. Esse tipo de operação levará a uma diminuição dos riscos e dos custos das grandes falhas, em detrimento do aumento do número de pequenas falhas ao longo do tempo.

A política de liberação de água de um reservatório é descrita por Wurbs (1993) como um jogo de regras para se determinar a quantidade de água que será armazenada para posteriormente ser liberada de reservatório. Dessa forma, as regras de operação envolvem um conjunto de variáveis que precisam ser analisadas e definidas de tal maneira que possam maximizar os benefícios gerados na utilização da água, levando em conta a promoção da equidade entre os usuários e da sustentabilidade do sistema de recursos hídricos.

A distribuição das águas liberadas dos reservatórios entre os diferentes usuários de água é realizada através da alocação de água. Esta se configura um processo de tomada de decisão que gera conflitos, principalmente em regiões cuja oferta de água é escassa.

Nos últimos anos a utilização de técnicas de simulação e otimização tornaram-se ferramentas importantes no processo de alocação de água. Dentre essas

técnicas, os algoritmos evolucionários se destacam para a resolução de diversos problemas em recursos hídricos. Labadie (2004) menciona que o fácil acoplamento dessa classe de algoritmos aos modelos hidrológicos, sem a necessidade de hipóteses simplificadoras, é considerado como uma vantagem para sua utilização.

Assim sendo, utilizaram-se modelos de simulação e otimização para a criação de uma política de operação de reservatórios baseada no zoneamento (salvaguardas) na qual se definem níveis metas como indicadores do estado de seca. Esses indicadores funcionam como gatilhos que acionam a vazão disponível e a transferência entre os sistemas para alocação de água, bem como um conjunto de ações e medidas visando a redução dos impactos gerados pelas secas.

Escolheu-se o sistema Jaguaribe – Metropolitano como local de aplicação por ele está situado em uma região que tem a seca como principal evento climático podendo ser um modelo de referência para todos os locais acometidos pelo mesmo tipo de evento.

1.1 Justificativa

A Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) é abastecida por cinco principais reservatórios de água: Aracoiaba, Pacajús, Pacoti, Riachão e Gavião, que, juntos, somam capacidade de acumulação de, aproximadamente, 850 hm³, sendo interligados através de canais e adutoras. Contudo, o crescente desenvolvimento econômico do Ceará nas últimas décadas propiciou, conseqüentemente, um crescimento da demanda por água em todo o Estado, principalmente na RMF. A incapacidade de suprimento desta demanda faz com que a RMF seja dependente das águas de transposição da bacia do Rio Jaguaribe.

O modelo de alocação de água utilizado no Ceará, no entanto, não integra o mecanismo de alocação de longo prazo ao de curto prazo. O primeiro, denominado outorga, constitui um ato discricionário da administração pública, enquanto o segundo, denominado de Macro Alocação Anual Negociada da Água, envolve um processo de participação popular.

As características de cada mecanismo apresentam limitações e dificuldades principalmente em períodos de estiagem (AQUINO *et. al.*, 2013). A decisão sobre a

transferência de água entre as bacias Jaguaribe e Metropolitana, e a definição da restrição de uso entre os setores, em períodos de escassez, são tomadas anualmente na reunião de Macro Alocação Anual Negociada da Água, não tendo ligação com a outorga.

1.2 Objetivo

O objetivo geral desta dissertação de mestrado é definir uma metodologia para criação de uma política de operação dos reservatórios com vistas a promover a alocação equitativa e eficiente dos recursos hídricos, integrando aos mecanismos de alocação de curto e longo prazo.

Como objetivos específicos pretende-se:

- Propor uma metodologia para a construção de regras de operação de reservatórios que incorpore a participação de usuários e gestores de água;
- Definir uma política de operação baseada em níveis metas de operação para indicação de estados de seca, aplicando ao sistema Jaguaribe-Metropolitano;
- Definir uma regra de transferência entre as bacias do Jaguaribe e da RMF baseada nos estoques de água dos reservatórios que as compõem.

1.3 Escopo

Esse trabalho é composto por seis capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentado uma breve introdução sobre o tema desenvolvido, definindo o problema que motivou sua realização, bem como a justificativa para sua elaboração e os objetivos que se desejou atingir. No capítulo seguinte, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a operação de reservatórios e a alocação de águas, focando nos assuntos relacionados a este trabalho.

No capítulo três é apresentado o local de estudo em que foi feita aplicação da metodologia desenvolvida e descrita no capítulo quatro. O capítulo cinco apresenta os resultados obtidos com a aplicação da metodologia no sistema Jaguaribe-Metropolitano. As conclusões e recomendações são apresentadas no sexto e último capítulo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta sessão apresenta uma revisão da literatura sobre a operação de reservatórios e a alocação de águas, com foco nos assuntos relacionados no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Operação de Reservatórios

Operar um reservatório significa definir o volume de água que deverá ser liberado ou armazenado com a finalidade de atender a determinados usos. Este configura-se como um processo de tomada de decisão que envolve diversos agentes (econômicos, sociais e políticos), configurando-se uma etapa importante para a gestão eficiente dos recursos hídricos.

Segundo Brandão (2004, p.39), “a operação de reservatórios é um processo de tomada de decisão sob incertezas, onde o decisor deve utilizar ferramentas adequadas de análise estatística para orientá-lo neste processo”. Aliado a isso, a utilização de sistemas de informações pode facilitar a operação de um reservatório. Estas informações, acopladas a um modelo matemático de simulação, pode representar o seu comportamento em cenários futuros, associando-o a um determinado risco de ocorrência.

Existem diversos modelos que simulam o comportamento de um reservatório, ou sistema de reservatórios. Entretanto, o fato do próprio analista ter que definir regras operacionais é apresentado por Jacoby e Loucks (1972) como uma desvantagem. Os autores afirmam que em um sistema complexo, que apresenta uma grande quantidade de alternativas possíveis, é necessário a utilização combinada de modelos de simulação e otimização.

Os modelos de operação de reservatórios têm sido estudados ao longo das últimas décadas. A impossibilidade de continuar construindo grandes obras de armazenamento de água fez com que os EUA e outros países desenvolvidos, conforme dito por Labadie (2004), se concentrassem em melhorar a eficácia operacional e eficiência dos sistemas de reservatórios existentes, procurando maximizar os benefícios associados a estes projetos

A modernização dos sistemas computacionais possibilitou a construção e aprimoramento de diversas técnicas de simulação e otimização que foram incorporados na solução dos problemas em recursos hídricos. A Universidade de Havard, citada por

Brandão (2004), no início dos anos 1960 torna-se precursora em pesquisas voltadas à análise de sistemas de recursos hídricos. Simonovic (1992), Wurbs (1993), e Labadie (2004) comentaram em seus trabalhos os diferentes métodos de simulação e otimização existentes no intuito de demonstrar as especificidades dos modelos existentes.

Simonovic (1992) chama a atenção para a lacuna existente entre as pesquisas e suas aplicações reais, afirmando que a principal função da análise de sistemas de reservatórios é servir de base para a tomada de decisão. Simonovic discute e apresenta dois exemplos de abordagem de sistemas que considera ser facilmente implementado pelos operadores de reservatórios.

Wurbs (1993) afirma que uma gama de modelos fora desenvolvida para avaliar o comportamento das operações de reservatórios. A seleção do modelo adequado, no entanto, depende das características particulares de cada sistema, além das preferências dos analistas. Nesse artigo, Wurbs faz uma triagem dentre inúmeros modelos, procurando definir quais métodos são mais úteis para diferentes tipos de situação. Labadie (2004) faz uma revisão do estado da arte da operação ótima de sistemas de reservatórios de múltiplos usos.

2.1.1 Modelos de Otimização

A gestão dos recursos hídricos pode utilizar a resposta de modelos de otimização para embasar as atividades de planejamento e gestão dos recursos disponíveis. A aplicação dessas técnicas em problemas reais é um grande desafio por parte dos profissionais que trabalham nesta área.

A importância dos métodos de otimização para a maximização dos benefícios trazidos pelas obras de armazenamento de água é destacado por Labadie (2004). Em seu trabalho, diferentes métodos de otimização são apresentados, entre eles, métodos de programação linear, não linear e dinâmica, além dos métodos de otimização evolucionários, como os algoritmos genéticos. A escolha de um modelo de otimização depende das características do sistema considerado, da disponibilidade dos dados e dos objetivos e restrições especificados. (TU; HSU, YET; 2003).

A programação linear é o método mais conhecido e utilizado na resolução de problemas que envolvem otimização. Este método, geralmente aplicado ao planejamento de atividades competitivas cujos recursos são limitados/escassos, foi

inicialmente utilizado em recursos hídricos pelo grupo de trabalho do *Havard Water Resources Group* na década de 1960, que aplicou esta técnica ao gerenciamento de água subterrânea (BARBOSA, 2002). O termo “linear” existente no nome do método é utilizado pois envolve relações lineares entre as variáveis de estudo.

Em problemas reais, a ocorrência de não-linearidade das funções-objetivos é bastante comum (CARDOSO; MARTINS; SOUZA FILHO, 2006). Para resolver problemas deste tipo, duas soluções podem ser utilizadas: (i) a primeira consiste na linearização destas funções não-lineares. Este processo, no entanto, acarreta a uma perda de precisão devido as aproximações matemáticas realizadas (CIRILO, 2002); (ii) a utilização de métodos de Programação Não-Linear.

A Programação Não-Linear suje inicialmente na década de 1950 com o trabalho de Kunh e Tucker (CIRILO, 2002; CARDOSO; MARTINS; SOUZA FILHO, 2006) e tem por finalidade resolver problemas cujas funções possuem variáveis não proporcionais entre si (não-lineares). Este tipo de programação possui a desvantagem da incerteza em relação a solução encontrada. Em alguns casos, a solução ótima obtida pode não ser a melhor entre as existentes, o que significa encontrar um ótimo local ao invés de um ótimo global.

A Programação Não Linear tem a característica de não possuir um método único para resolução de problemas, apresentando diferentes classificações de acordo com o tipo de técnica utilizada. Cirilo (2002) cita uma classificação desse tipo de programação agrupando-a em dois tipos: (i) técnicas analíticas, cujos métodos procuram encontrar soluções resolvendo sistemas de equações utilizando derivadas, e tem-se como exemplo o método de Lagrange, o método de Cálculo Diferencial e a Programação Geométrica; (ii) técnicas de busca numérica, que utiliza métodos numéricos para resolução de seus problemas.

Outro método de otimização bastante utilizado é denominado de Programação Dinâmica. Este método é útil quando se deseja resolver problemas marcados pela tomada de decisão sequencial em vários estágios (BARROS, 2002). O problema a ser otimizado é dividido em um conjunto de problemas de otimização menores, denominados etapas, onde cada um deve ser resolvido previamente. Assim, a solução ótima global do problema original é computada tomando a solução ótima de cada etapa previamente calculada.

A programação dinâmica, no entanto, tem a grande desvantagem do chamado “Mal da dimensionalidade”. Este termo foi proposto por Bellman (1957 *apud* BARROS, 2002) e surge quando as variáveis de estados são discretizadas em grandes quantidades, tornando a busca do ótimo dificultada pela quantidade de possibilidades existentes em cada etapa. A grande vantagem desse método é sua capacidade em resolver problemas cujas funções objetivos e as restrições podem ser não-lineares e até mesmo descontínuas (BARROS, 2002).

Em recursos hídricos, problemas de alocação de água de múltiplos usuários e operação de sistemas de reservatórios constituem, muitas vezes, aplicações de Programação Dinâmica. A Universidade do Colorado, através do professor Jhon W. Labadie, desenvolveu o programa CSU-DP (*Colorado State University – Dynamic Programming*). Este é um pacote de programação dinâmica escrito, em sua última versão, em linguagem C com a incorporação de uma interface do Windows escrito em Visual Basic (LABADIE, 2014), permitindo a resolução de problemas de programação dinâmica sem a necessidade de se desenvolver um novo código para cada aplicação (LABADIE, 2004).

A diversidade de aplicabilidade em diferentes áreas de conhecimento e a facilidade de implementação em problemas reais tem dado destaque a uma classe de algoritmos de otimização chamados de Algoritmos Evolucionários. Esses diferem de outros pelo fato de utilizar um conjunto de soluções iniciais, ao invés de uma só (BARROS, 2007).

Os Algoritmos Evolucionários podem ser definidos como uma técnica de otimização baseada numa metáfora do processo de evolução natural. Dentro desta classe de algoritmos, dois tipos ganham destaques: (i) algoritmos genéticos, inspirados no processo evolutivo dos seres vivos que sofrem evoluções com o passar do tempo, e com o passar de suas gerações, de modo a melhor se adaptarem ao ambiente; (ii) algoritmos baseados em comportamentos sociais de grupos. Essa classe de algoritmos consiste de técnicas heurísticas para busca e solução de problemas (BARROS, 2007).

Segundo Labadie (2004) técnicas heurísticas não garantem o encontro de soluções ótimas. Entretanto, esses métodos buscam por soluções aceitáveis ou satisfatórias de problemas em que os métodos tradicionais falhariam para convergir ou ficariam restritos em ótimo local.

Na classe de algoritmos baseados em comportamentos sociais de grupos, destacam-se o PSO - *Particle Swarm Optimization* (KENNEDY; EBERHART, 1995), que posteriormente foi adaptado para resolver problemas multiobjetivos, e ficou conhecido como MOPSO - *Multiobjective Particle Swarm Optimization* (ALVAREZ-BENITEZ; EVERSON; FIELDSEND, 2005), o SCEM - *Shuffled Complex Evolucion Metropolis* (DUAN; GUPTA; SOROOSHIAN, 1993), e sua versão multiobjetivo, MOSCEM - *Multiobjective Shuffled Complex Evolucion Metropolis* (VRUGT *et al.* 2003) o BCO - *Bee Colony Optimization* (CHONG *et al.*, 2006), o HBMO - *Honey-Bee Mating Optimization* (HADDAD; AFSHAR; MARINO, 2006). Barros (2007) fez a proposição de uma versão multi-objetivo para o HBMO, denominada de MOHBMO *Multiobjective Honey-Bee Mating Optimization*, e o aplicou a calibração de modelos hidrológicos e na operação de sistemas de reservatórios.

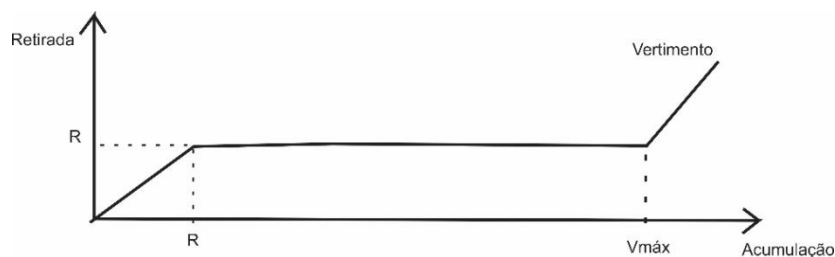
2.1.2 Operação de reservatórios com salvaguardas

Diversos modelos de simulação e otimização estão disponíveis para ajudar aos tomadores de decisão embasar suas decisões operacionais. Entratando, as simulações só podem ocorrer quando existe a definição clara de uma política (ou regra) operacional.

A regra de operação comumente utilizada em períodos normais na operação de reservatórios denomina-se ‘Padrão’, em inglês *Standard Operating Policy* (SOP). Essa regra foi desenvolvida com a finalidade de liberar água em um volume igual ao valor demandado pelos diversos usos. Essa liberação, no entanto, só não irá acontecer quando a água disponível no reservatório for insuficiente. Neste momento, toda a água ainda armazenada será retirada, secando-se o reservatório. Se a água afluyente ao reservatório for maior que a vazão demandada, a água deve ficar armazenada até atingir sua capacidade máxima.

A Figura 1 apresenta uma ilustração da regra Padrão. Nela é possível observar que quando o estoque do reservatório for maior que R (Retirada) e menor que V_{max} (Capacidade máxima de acumulação), a vazão retirada é igual a R. Quando o estoque for maior que V_{max} , retira-se tudo que entra. Quando for menor que R, retira-se o que estiver disponível, fazendo o reservatório chegar ao volume zero (Colapso).

Figura 1 - Regra de Operação Padrão (SOP)



Fonte: Elaborado pelo autor

Durante os períodos de seca ou anteriores a uma seca, os usos instalados não podem ser totalmente atendidos e ocorre escassez de água. A maioria dos operadores, no entanto, reduz as liberações em tempos de seca em uma tentativa de salvar um pouco de água no reservatório para futuras retiradas, caso o período de seca se prolongue nos próximos intervalos de tempo (LOUCKS, 2005). Essa política de operação, denominada de 'salvaguardas' ou em inglês *Hedging*, cria um *trade-off* entre atender plenamente às demandas instaladas e a manutenção de água no reservatório quando as afluências são baixas

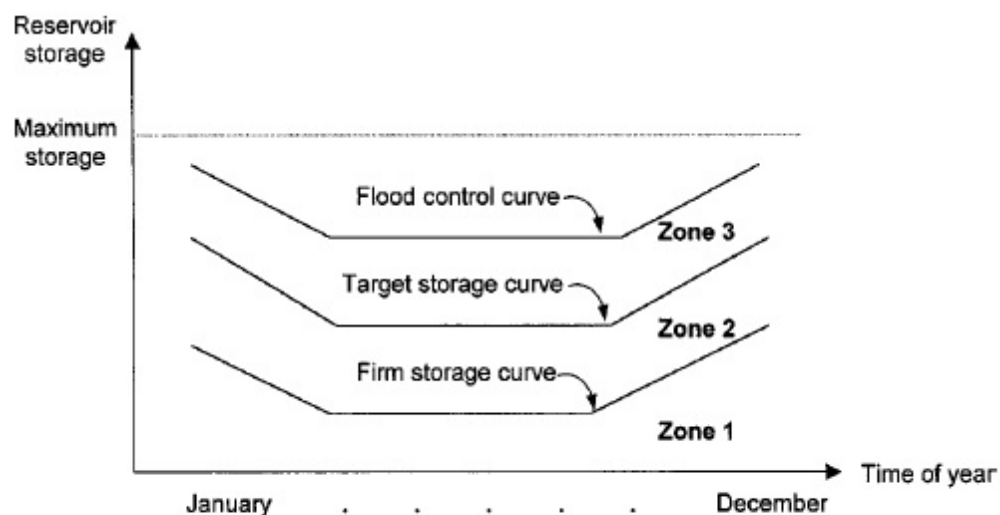
A operação com salvaguardas fornece uma segurança para usos de maior valor quando os reservatórios têm baixos potenciais de recargas ou afluências incertas. Seu intuito é reduzir o risco e o custo de grandes falhas de desabastecimento, em contrapartida a um custo de pequenos desabastecimento mais frequentes (DRAPER; LUND, 2004).

Durante os períodos normais de operação, quando as afluências aos reservatórios são abundantes, o cumprimento de uma meta de armazenamento não representa grandes problemas. No entanto, durante períodos de seca ou anteriores a uma seca, pode não ser possível atingir o alvo de armazenamento devido a uma escassez de afluências. Para minimizar o impacto da seca e a consequente escassez no abastecimento de água, a operação com Salvaguardas é acoplada a curvas guias para que se equilibre as escassez de água com diferentes metas de armazenameto. (TU; HSU, YET; 2003).

As curvas guias visam o zoneamento do reservatório em função de volume para atendimento de diversos usos, como controle de cheias, atendimento em períodos normais e armazenamento estratégico (ou volume morto) visando o atendimento em períodos de seca. A Figura 2 representa um modelo de curvas guias. Neste modelo o

reservatório é dividido em três curvas guias, a saber: (i) a curva superior é chamada *Flood Control Curve*, e é usada para controlar eventos de cheias; (ii) curva do meio, chamada *Target Storage Curve*, é usada para períodos normais de operação, onde há abundância da vazão afluente; (iii) A curva inferior, chamada *Firm Storage Curve*, é usada para períodos de seca.

Figura 2 - Curvas guias para reservatórios de múltiplos usos



Fonte: Tu, Hsu e Yeh (2003)

Tu, Hsu e Yeh (2003) mostram que a relação entre a operação com curvas guias e operação com salvaguarda se dá pela junção dos conceitos de racionamento de água e dos objetivos, ou metas, de armazenamento. Essa relação é mostrada pelas seguintes equações e o gráfico da operação mostrada na Figura 3.

$$\text{Se } S_{min,t} \leq S_t < S_{firm,t}, \text{ então } P_t \leq \alpha_1 \cdot D_t \quad (1)$$

$$\text{Se } S_{firm,t} \leq S_t < S_{target,t}, \text{ então } P_t \leq \alpha_2 \cdot D_t \quad (2)$$

$$\text{Se } S_{target,t} \leq S_t \leq S_{max,t}, \text{ então } P_t \leq D_t \quad (3)$$

Onde,

$S_{min,t}$: Armazenamento mínimo no tempo 't';

$S_{firm,t}$: Armazenamento firme no tempo 't', definido pela curva *Firm Storage Curve*;

$S_{target,t}$: Armazenamento meta no tempo 't', definido pela curva *Target Storage Curve*;

$S_{max,t}$: Armazenamento máximo no tempo 't', definido pela curva *Firm Storage Curve*;

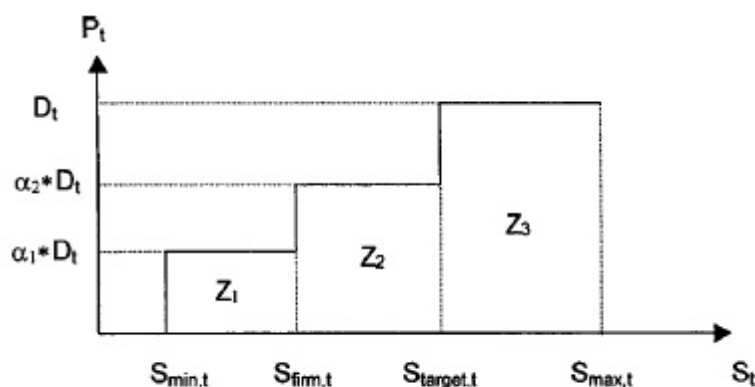
S_t : Volume armazenado no reservatório no tempo 't';

P_t : vazão liberada pelo reservatório no tempo 't';

D_t : vazão demandada de água;

α_1 e α_2 : fatores de racionamento em função da zona do reservatório; As curvas citadas acima referem-se as curvas mostradas na Figura 2.

Figura 3 - Representação das equações geradas pela relação entre as Curvas Guias e de Salvaguarda



Fonte: Tu, Hsu e Yeh (2003)

A operação com Salvaguardas e Curvas guias foi utilizada por Tu, Hsu e Yet (2003) para a definição da política ótima de operação de um sistema de reservatórios de múltiplos usos localizado no sul de Taiwan. O trabalho envolveu a utilização de um modelo de programação linear inteira mista que incorporou essa política de operação para um sistema de abastecimento de água entre cidades e tornou-se relevante pois, segundo os autores, esse tipo de simulação/otimização ainda não tinha sido aplicado.

2.2 Alocação de Água

A alocação de água é um processo de tomada de decisão que visa a distribuição dos recursos hídricos existentes entre diferentes usuários. Esse processo configura-se como um mecanismo de gestão de conflitos, uma vez que a oferta de água se torna escassa diante do crescimento da demanda e da variabilidade das precipitações (ROA-GARCIA, 2014).

Existem diferentes critérios de alocação de água, segundo Dinar, Rosegrant e Meizen-Dick (1997), que vão desde controle completo do governo até uma alocação predominantemente controlada pelo mercado. Os autores definem quatro mecanismos para a alocação de água, são eles: i) preço igual ao custo marginal: o preço da água será igual ao custo marginal da última unidade de água suprida, garantindo uma alocação economicamente eficiente; ii) mecanismo administrativo: onde o Poder Público é o responsável pela definição dos volumes a serem utilizados, bem como pela distribuição entre os usuários, garantindo o domínio do gerenciamento dos recursos hídricos por parte do Poder público; iii) mercado da água: prevê a troca do direito de uso de água entre os usuários, tornando a água um bem alienável; e iv) baseado no usuário: consiste

na negociação política do uso da água entre os usuários, requerindo instituições de ação coletiva com autoridade para decidir sobre os direitos de uso da água.

Os mecanismos de alocação de água baseados nos usuários que inserem a sociedade civil na tomada de decisão, têm, segundo Souza Filho (2005), dois conceitos embutidos. O primeiro diz a respeito da arbitragem de conflito como forma de integração social e o segundo, a ampliação da democracia dentro da sociedade, como forma de gerenciar conflitos. Segundo o autor, esses conceitos legitimam socialmente esse mecanismo de alocação.

Speed *et. al.* (2013) definem uma série de objetivos da alocação de água. Os autores citam que esses objetivos podem estar expressos nas leis e políticas de águas de um país ou nelas estarem implícitas. São eles: a equidade, a sustentabilidade, as prioridades de desenvolvimento, equilíbrio entre oferta e demanda e eficiência do uso da água.

A equidade, segundo os autores, baseia-se no princípio da distribuição da água de forma justa e entre os diferentes usuários de água e diferentes regiões, apoiando as oportunidades de desenvolvimento em regiões subdesenvolvidas, bem como protegendo e promovendo os interesses de grupos socialmente marginalizados. A sustentabilidade diz respeito a forma de reconhecimento das necessidades ambientais (SPEED *et. al.*, 2013).

Segundo Roa-Garcia (2014), o alcance da sustentabilidade exige que a água seja usada e alocada de forma que os sistemas hídricos mantenham-se dentro de sua capacidade de regeneração, a fim de manter os ecossistemas e suas funções. Hashimoto *et al.* (1982) propuseram que a sustentabilidade dos sistemas hídricos fosse avaliada em relação ao risco definido por três indicadores: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade.

As prioridades de desenvolvimento como objetivo visam apoiar e promover o desenvolvimento socio-econômico, reconhecendo as inter-dependências entre os setores usuários. A alocação precisa, ainda manter o equilíbrio entre oferta e demanda, gerenciando as vulnerabilidades do sistema de recursos hídricos, evitando as falhas associadas aos usos. (SPEED *et. al.*, 2013).

Por fim, o último objetivo visa utilização da água de forma eficiente. Roa-Garcia (2014) divide a eficiência em duas componentes a saber, técnica e alocativa. A

primeira diz respeito a eficiência interpretada no sentido de aumentar os resultados gerados na utilização da água, sem levar em consideração os limites de conservação, produtividade ou geração de renda. A segunda é alcançada quando o recurso escasso gera o maior valor monetário e é comumente medido através da eficiência de Pareto. Esses objetivos podem evidenciar trades-off entre si, tornando-se mais evidente quando se refere a equidade e eficiência. (ROA-GARCIA, 2014).

No Brasil, o mecanismo administrativo que autoriza o uso da água, por um prazo determinado, é denominado de outorga de uso da água. Suas condições estão expressas na Política Nacional dos Recursos Hídricos, Lei Federal 9.433/97, e constitui-se uma política de alocação de recursos hídricos de longo prazo. Esta política estabelece que “o regime de 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”. Segundo Aquino *et al.* (2013) a outorga constitui-se uma autorização de uso pelo qual o Poder Público atribui a utilização um bem de seu domínio para ser explorado por um particular, segundo um fim específico

No Nordeste brasileiro, a situação de escassez hídrica torna a alocação dos recursos hídricos bastante complicada. A grande variabilidade temporal e espacial, característica do semiárido brasileiro, justifica a dificuldade da gestão dos recursos hídricos nessa região, trazendo riscos de as outorgas dadas não serem satisfeitas em algum período de tempo.

No Ceará, os valores de liberação da água acumulada nos reservatórios passam por um processo de discussão pública. Este processo configura-se um mecanismo de alocação baseado nos usuários, e foi denominado de Macro Alocação Anual Negociada da Água, ou, simplesmente, Alocação Negociada. A alocação negociada colocou o Ceará numa posição precursora em relação à alocação de água no Brasil. A participação pública nesse processo foi inserida por meio de arenas e fóruns de discussões, em 1994, na bacia do Rio Jaguaribe, partindo das comissões de usuários de água e evoluindo para os Comitês de Bacias (SILVA *et al.* 2013).

A Alocação Negociada possui um carácter regional e de curto prazo, caracterizando-se como um processo político, participativo e descentralizado. Ela ocorre para a negociação de uma regra anual de operação dos reservatórios, objetivando a definição dos valores de água a serem liberados destes para o suprimento das demandas

estabelecidas na bacia hidrográfica. AQUINO *et al.* (2013) observam que os modelos de alocação do Ceará (Outorga e Alocação Negociada) não se articulam entre si, mostrando que os entes envolvidos no processo de alocação negociada “*não integram o rol de informações e atividades que dão suporte à emissão de outorga*” (AQUINO *et al.* 2013, p. 270).

3 LOCAL DE ESTUDO

O local de aplicação deste estudo foi o sistema de abastecimento de água bruta Jaguaribe-Metropolitano, localizado no Estado do Ceará. As bacias hidrográficas deste sistema estão na porção centro-nordeste do Estado e possuem como reservatórios estratégicos: (i) Castanhão, Orós e Banabuiú, na Bacia do Jaguaribe; (ii) Gavião, Pacoti/Riachão, Pacajus e Aracoiaba, na região hidrográfica Bacias Metropolitanas. A Figura 4 mostra a mapa esquemático deste sistema.

Figura 4 – Mapa esquemático do Sistema Jaguaribe-Metropolitano



Fonte: CEARÁ (2016)

O reservatório Castanhão, com 6,7 bilhões de m³ de capacidade máxima, constitui a principal reserva de água do Estado. Este reservatório, desconsiderando os reservatórios do sistema hidrelétrico, é considerado como o maior açude público para múltiplos usos do país, utilizado para irrigação, abastecimento urbano e rural,

dessedentação de animais, piscicultura, além da regularização da vazão do Rio Jaguaribe.

A montante do Castanhão, ligado pelo rio Jaguaribe, encontra-se o reservatório Orós. Este, além de atender às demandas locais, funciona como reservatório estratégico utilizado quando os níveis do outro estão em cotas baixas. O Orós foi durante muitos anos o principal reservatório do Estado, com capacidade máxima de 1,94 bilhões de m³.

Ainda na região do Vale do Jaguaribe, porém integrante da bacia hidrográfica com nome homônimo, encontra-se o terceiro maior reservatório do Estado: o reservatório Banabuiú. Com capacidade máxima em torno de 1,6 bilhões de m³, o açude teve no fim de 2015, desde sua inauguração em 2004, seu pior estoque de água.

A transposição das águas entre os hidrossistemas Jaguaribe e Metropolitano é realizado através de uma grande infraestrutura hídrica composta de estações de bombeamento, canais, adutoras, sifões e túneis. O Eixão das águas, com extensão de 255 km, liga o reservatório Castanhão ao reservatório Pacoti, seguindo para o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Este canal foi dimensionado com capacidade máxima de 22 m³/s, entretanto, atualmente, apenas 9,5 m³/s podem ser aduzidos por ele. Além deste, o Canal do Trabalhador possui um papel complementar de transferência hídrica para a RMF, contribuindo com uma vazão de transferência máxima de 5 m³/s, aproximadamente, interligado o rio Jaguaribe, no município de Itaiçaba, ao reservatório Pacajús. Devido ao assoreamento do canal, a vazão máxima operacional deste canal limita-se a 3,5 m³/s, aproximadamente.

O abastecimento de água para a RMF é realizado por um de um conjunto de mananciais, composto pelos reservatórios Pacajús, Pacoti/Riachão e Gavião. O açude Pacoti/Riachão exerce um papel de destaque nesta região, pois, além de possuir maior capacidade de armazenamento e regularização, recebe a maior parcela de água transferida da região do Jaguaribe. Quantitativamente, o reservatório Gavião pode ser considerado apenas como um reservatório de passagem. Por questões operacionais da Estação de Tratamento de Água nele implantada, o volume de água armazenado no reservatório deve ser mantido em um valor igual ou superior a 80% de sua capacidade máxima, diminuindo consideravelmente seu potencial de regularização.

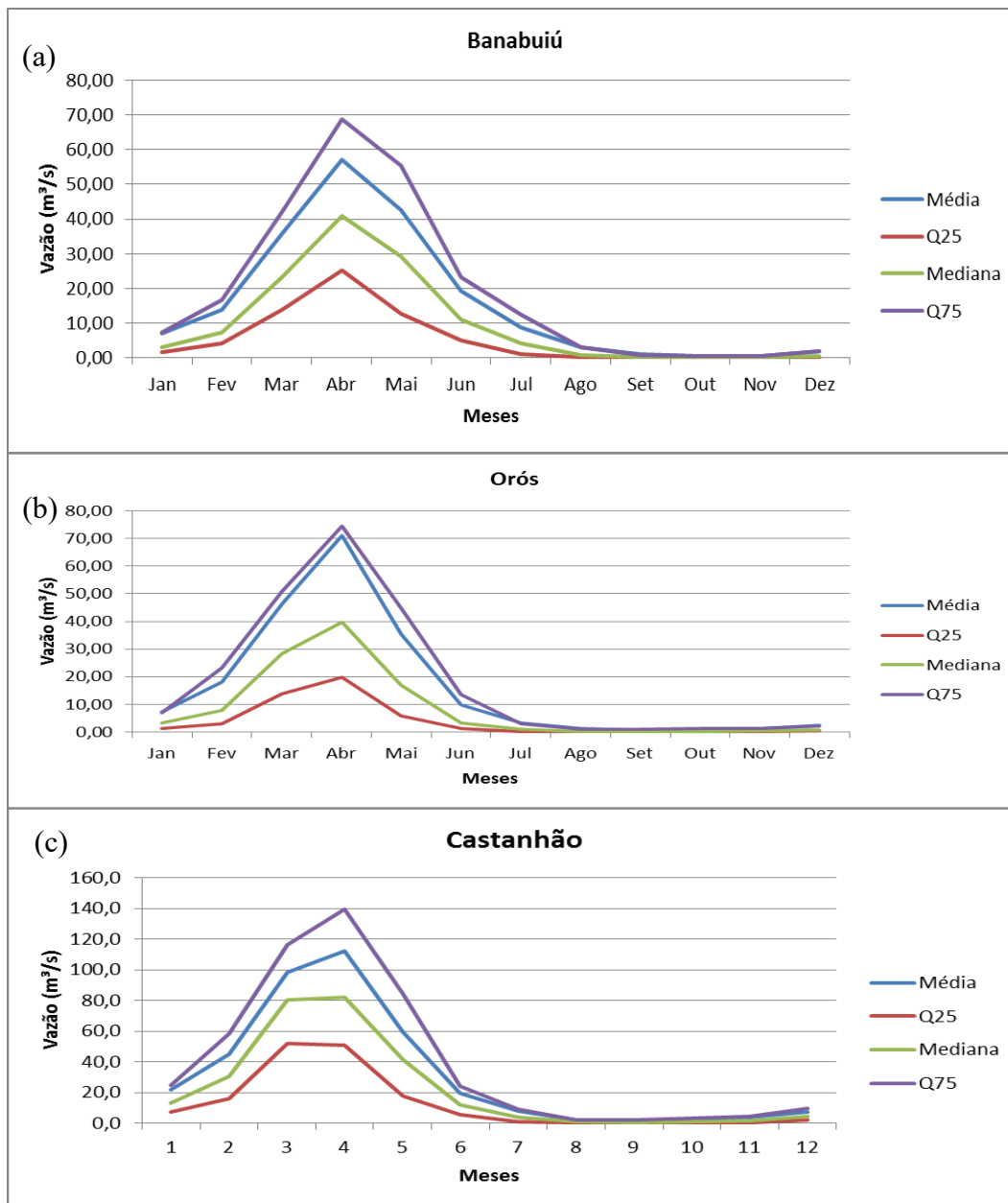
3.1 Oferta

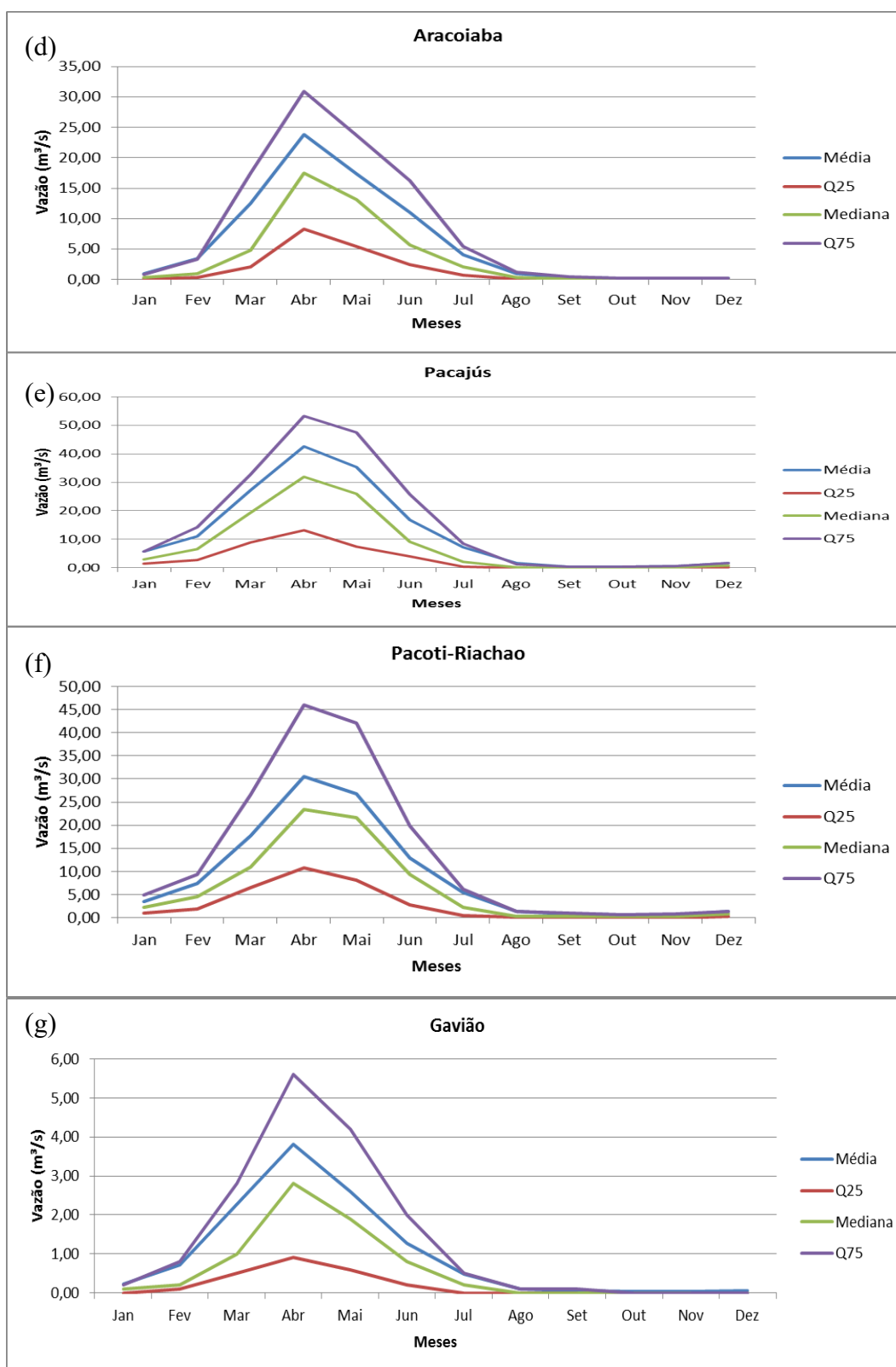
O levantamento da oferta hídrica foi realizado buscando-se conhecer as características do sistema de abastecimento. Nesta seção serão apresentadas as vazões afluentes dos reservatórios, as taxas de evaporação, bem como os volumes máximos e mínimos de cada um dos reservatórios que compõe o sistema Jaguaribe-Metropolitano.

3.1.1 Vazões afluentes

As séries de vazões afluentes utilizadas no desenvolvimento desta dissertação foram obtidas através do relatório de estudos de regionalização de vazões para as bacias dos reservatórios do Estado do Ceará, publicado por UFC/COGERH (2013). Neste relatório, as séries de vazões foram obtidas utilizando-se o modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) mensal, ajustado a um modelo regional para estimar os parâmetros para as bacias dos reservatórios. Os dados compõem uma série mensal de vazões dos reservatórios, do período compreendido entre janeiro de 1912 e dezembro de 2012 e foram utilizados na operação do sistema de reservatórios. A Figura 5 apresenta a variação sazonal das afluições dos reservatórios que compõem o sistema Jaguaribe-Metropolitano e que foram utilizados neste trabalho. A vazão média anual afluente aos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano no período de 1912 a 2012, média móvel de 10 anos e média da série histórica são apresentados na Figura 6.

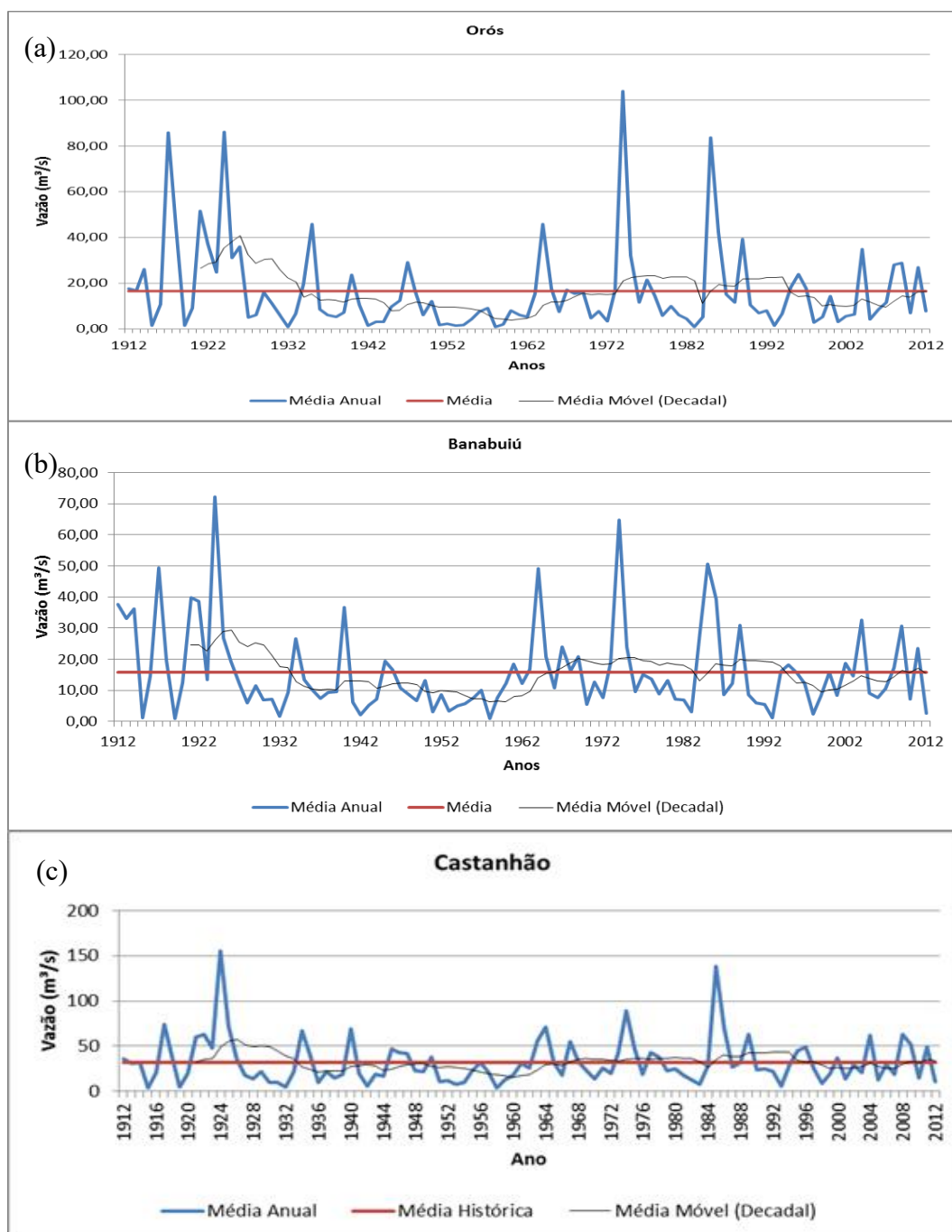
Figura 5 - Variação sazonal das aflúncias dos reservatórios que compõem o sistema Jaguaribe-Metropolitano, representando a média mensal, a mediana e quartis 25%(Q25) e 75% (Q75): (a) Banabuiú; (b) Orós; (c) Castanhão; (d) Aracoiaba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião

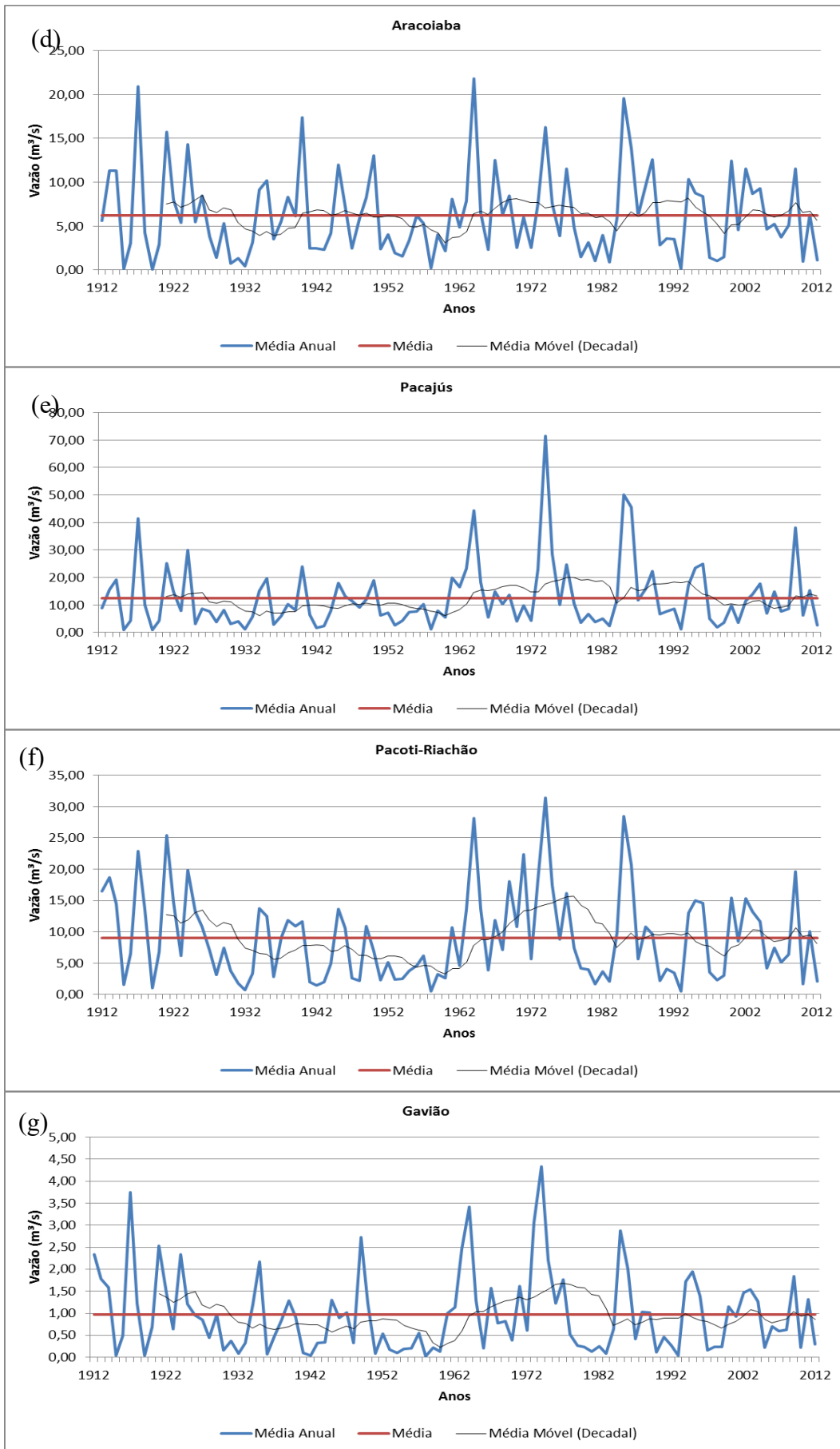




Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6 - Vazão média anual afluyente aos reservatórios que compõem o sistema Jaguaribe-Metropolitano no período de 1912 a 2012, média móvel de 10 anos e média da série histórica: (a) Orós; (b) Banabuiú; (c) Castanhão; (d) Aracoiaíba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião





Fonte: Elaborado pelo autor

As retiradas podem ser traduzidas na forma de vazão regularizada. Segundo Studart e Campos (2006), vazão regularizada é a vazão fornecida anualmente por um reservatório para o suprimento de uma demanda com determinada garantia. Se um reservatório, por exemplo, possui uma vazão regularizada Q90 significa que ele possui disponibilidade de retirada desta vazão em 90% dos anos.

O conceito de vazão regularizada pode ser estendido à disponibilidade mensal de um reservatório atender a certa demanda. Assim, a Q90 mensal seria a vazão associada a um reservatório, de tal forma que em 90% dos meses houve o atendimento da vazão especificada

As vazões regularizadas com garantia de 85%, 90% e firme (100%) para os esses meses reservatórios são encontradas na Tabela 1. Calculou-se, ainda, a eficiência dos reservatórios e são apresentados na Tabela 2 junto com a média e o desvio padrão das vazões afluentes mensais. A eficiência do reservatório foi definida neste trabalho com a razão entre a vazão regularizada (Q90) e a vazão média.

Tabela 1 - Vazões regularizadas (m^3/s) com garantia de 85%, 90% e firme (100%) para os reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Reservatório	Garantia		
	85%	90%	Firme (100%)
Castanhão	28,8	26,0	15,2
Orós	10,7	9,2	4,2
Banabuiú	13,2	11,8	6,6
Aracoiaba	4,5	3,8	2,1
Pacajus	6,9	5,9	3,3
Pacoti-Riachão	6,3	5,3	3,1
Gavião	0,5	0,4	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 – Média das vazões afluentes (m^3/s), desvio padrão (m^3/s) e eficiência dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe – Metropolitano.

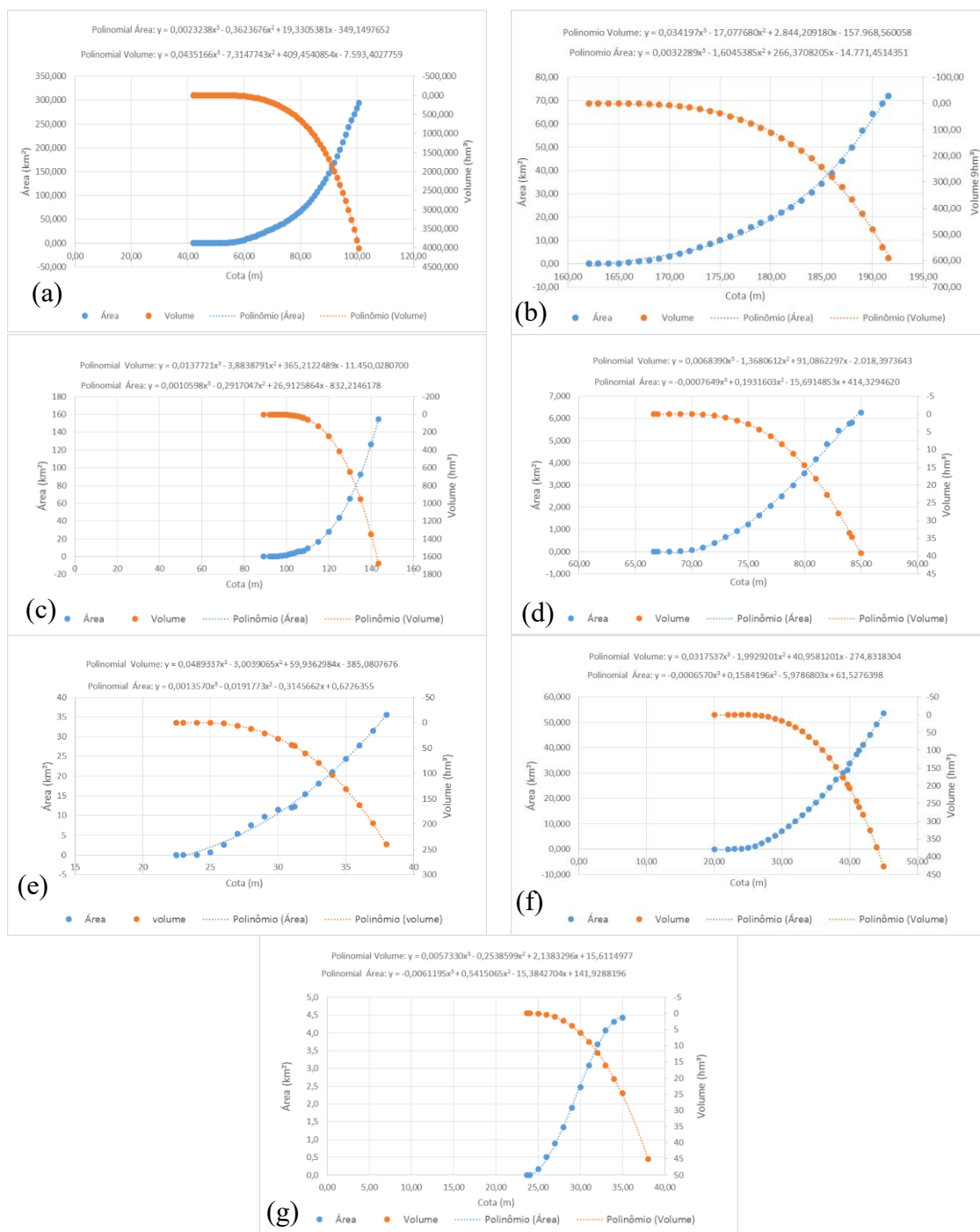
	Média(m^3/s)	Desvio Padrão (m^3/s)	Eficiência
Castanhão	32,2	39,2	80,8%
Orós	16,5	22,7	55,6%
Banabuiú	15,9	19,1	74,4%
Aracoiaba	6,3	8,0	61,2%
Pacajús	12,5	14,8	47,2%
Pacoti-Riachão	9,1	10,6	58,2%
Gavião	1,0	1,3	38,1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Curva Cota-Área-Volume

As curvas de cota-área-volume foram obtidas junto à COGERH e são mostradas na Figura 7.

Figura 7 - Curvas de cota-área-volume dos principais reservatórios das bacias do Jaguaribe e Metropolitano: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaíba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião



Fonte: Elaborado pelo autor com dados fornecidos pela COGERH

3.1.3 Taxa de evaporação

As evaporações médias mensais dos reservatórios foram obtidas na base de dados das normais climatológicas do INMET. Para representar a evaporação sobre os reservatórios, adotou-se oitenta por cento (80%) dos valores de Evaporação Média observadas em evaporímetros de piché das estações mais próximas aos reservatórios. A Tabela 3 apresenta os valores das evaporações utilizadas.

Tabela 3 - Evaporação média(mm) dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano

Reservatório (Cod. Posto)	Castanhão (82588)	Orós (82686)	Banabuiú (82586)	Aracoiaba (82487)	Pacajús (82397)	Pacoti- Riachão (82397)	Gavião (82397)
Jan	209,0	159,0	195,0	55,1	128,0	128,0	128,0
Fev	141,0	104,0	129,0	41,2	93,8	93,8	93,8
Mar	99,2	90,2	95,3	28,0	72,4	72,4	72,4
Abr	95,3	80,2	72,3	25,4	67,5	67,5	67,5
Mai	110,0	95,7	77,9	27,2	80,5	80,5	80,5
Jun	139,0	128,0	101,0	31,6	93,5	93,5	93,5
Jul	189,0	173,0	134,0	44,7	115,0	115,0	115,0
Ago	241,0	205,0	197,0	64,6	153,0	153,0	153,0
Set	265,0	218,0	234,0	71,6	159,0	159,0	159,0
Out	283,0	230,0	265,0	75,1	164,0	164,0	164,0
Nov	257,0	216,0	245,0	73,3	159,0	159,0	159,0
Dez	256,0	203,0	243,0	68,1	149,0	149,0	149,0
Total (mm)	2284,5	1902,1	1988,5	605,9	1434,7	1434,7	1434,7

Fonte: Dados do INMET (1992)

3.1.4 Volumes máximos e mínimos

A capacidade de acumulação de cada reservatório é apresentada na Tabela 4. O reservatório Castanhão possui a maior capacidade de acumulação (Volume máximo) dentre os reservatórios do Estado do Ceará, com capacidade de aproximada 6.650 hm³. Deste, 2.200 hm³ são reservados para controle de cheias, restando 4450 hm³ para os usos conservativos (urbanos, irrigação, industrial), não conservativos (piscicultura) e volume morto.

Tabela 4 - Volumes característicos do sistema de abastecimento de Fortaleza

Reservatório	Volume Máximo (hm³)	Volume mínimo (hm³)
Aracoiaba	162,0	2,9
Banabuiú	1601,0	0,2
Castanhão	6650,0	206,0
Gavião	33,3	22,2
Orós	1940,0	4,2
Pacajús	232,0	0,4
Pacoti	380,0	21,7
Riachão	47,0	3,2

Fonte: Informação concedida pela Gerência de operações da COGERH.

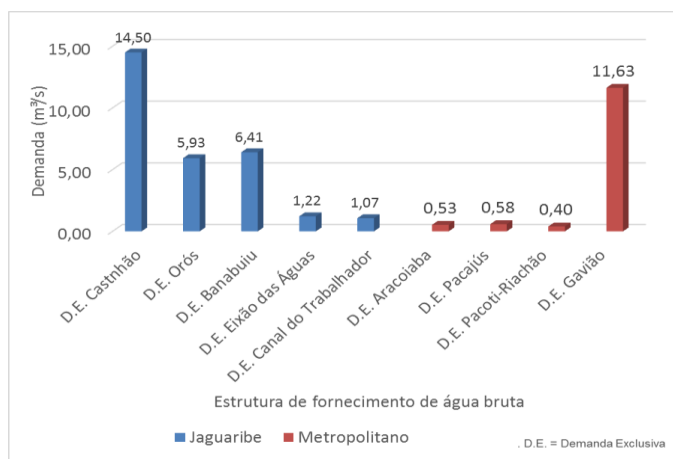
Os volumes mínimos de cada um dos reservatórios também estão apresentados na Tabela 4. Estes volumes constituem as reservas estratégicas do estoque de água, também denominados de volume morto, recebendo esta denominação por estarem estocados abaixo da cota de tomada d'água do reservatório.

3.2 Demanda

Os valores de demanda hídrica foram coletados junto a COGERH considerando as estimativas realizadas para um período sem escassez hídrica. Para efeito de análise, as demandas foram agrupadas conforme a estrutura física que lhe fornece água, e são apresentadas na Figura 8 e na Tabela 5. O sistema Jaguaribe-Metropolitano possui uma demanda total de 42,3 m³/s. Deste total, 69% (29,1 m³/s) estão concentradas na bacia do Jaguaribe e 31% (13,2 m³/s) na Região Metropolitana de Fortaleza.

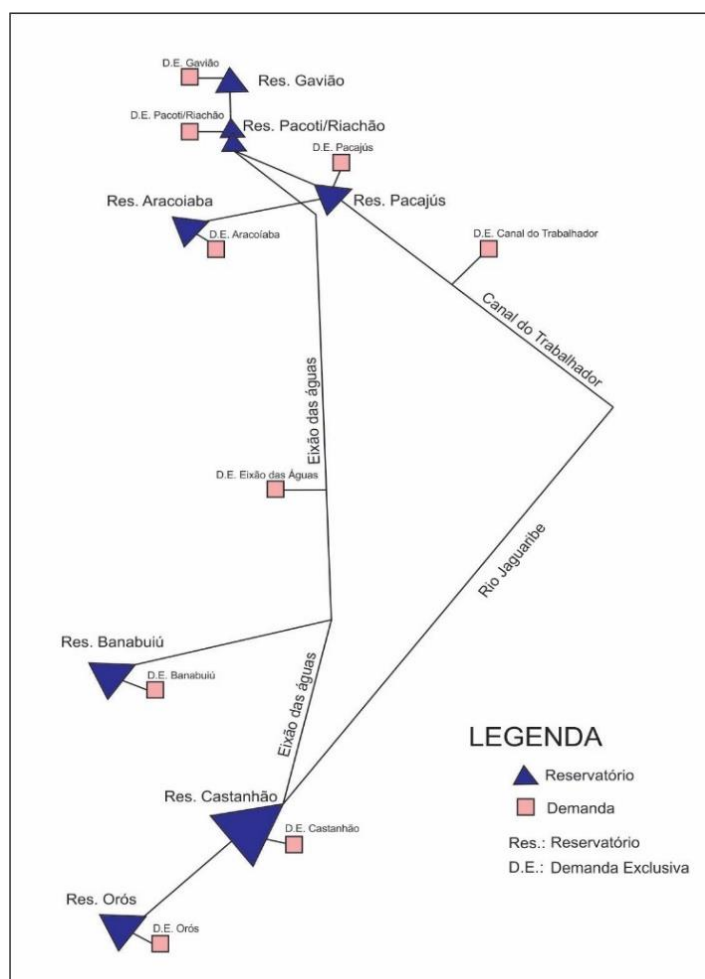
Os usuários de água do Jaguaribe podem ser categorizados como: abastecimento humano, irrigação temporária e permanente, carcinicultura, indústria, dessedentação animal, consumo difuso e ambiental (perenização de rios). Os usos da água na RMF são prioritariamente para o abastecimento urbano, isto é, abastecimento humano, industrial, serviços e turismo. O setor industrial encontra-se distribuído ao sul, entre os municípios de Horizonte e Pacajus, e na porção oeste onde se situa o Complexo Industrial Porto do Pecém (CIPP), destacando-se neste pelo volume demandado: Energia Pecém, Termo Ceará, Endesa e a Companhia Siderúrgica do Pecém. No açude Gavião está situada a retirada de água para o atendimento de Fortaleza com 9,5 m³/s (volume demandado pelas Estações de Tratamento de Água ETA Gavião e ETA Oeste) e do CIPP com 1,4m³/s. Para Fortaleza foi considerado o volume demandado pelas Estações de Tratamento de Água (ETA Gavião e ETA Oeste). A Figura 9 mostra o desenho esquemático da localização das demandas do sistema.

Figura 8- Demandas hídricas em m³/s do sistema Jaguaribe-Metropolitano.



Fonte: Elaborado pelo autor, com dados fornecidos pela Gerência de Operação da COGERH em setembro de 2016

Figura 9 - Diagrama unifilar do sistema Jaguaribe- Metropolitano, com a representação das demandas exclusivas de cada infraestrutura de abastecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5 - Demandas de referência do sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Infra-estrutura de abastecimento	Tipo de uso	Centro de demanda	Demandas (m³/s)	Demandas (hm³/mês)
Castanhão	AH	Abastecimento Humano	0,58	1,50
	ANI	Dessedentação Animal	0,01	0,02
	C	Carcinicultura	0,91	2,36
	IRR	FAPJIA (Culturas Temporárias e Permanentes)	3,66	9,49
	IRR	Arroz Outorgado (401 ha - 1,5 l/s)	0,60	1,56
	IRR	Arroz Não Outorgado (1.338 ha - 1,5 l/s)	2,01	5,20
	IRR	Capim Inundação Outorgado (214 ha - 1,4 l/s)	0,30	0,78
	IRR	Capim Inundação Não Outorgado (286 ha - 1,4 l/s)	0,40	1,04
	IRR	Cana de Açúcar (2.349 ha - 0,97 l/s)	2,28	5,90
	IRR	Culturas Permanentes	0,88	2,29
	IRR	Culturas Temporárias	1,77	4,59
P	Perdas em trânsito	1,10	2,85	
Total Castanhão			14,50	37,57
Orós	AH	Feiteiro	0,01	0,03
	AH	Jaguaribe	0,10	0,26
	AH	Lima Campos	0,05	0,13
	AH	Jaguaretama	0,03	0,08
	AH	Montante Orós	0,03	0,08
	IRR	Montante Orós	0,27	0,70
	IRR	Alagamar	0,10	0,26
	IRR	Feiteiro Difuso	0,49	1,27
	IRR	Lima Campos (Culturas Permanentes)	0,80	2,07
	IRR	Lima Campos (Culturas Temporárias)	1,15	2,98
	P	Difuso e Perdas em Trânsito	2,90	7,52
Total Orós			5,93	15,37
Banabuiú	AH	Banabuiú	0,02	0,05
	AH	Ibicuitinga	0,03	0,06
	AH	Zona rural	0,02	0,05
	ANI	PROMOVALE	0,01	0,03
	IRR	PROMOVALE (Culturas Permanentes)	0,69	1,80
	IRR	PROMOVALE (Culturas Temporárias)	0,20	0,53
	IRR	PIMN (Culturas Permanentes)	0,86	2,24
	IRR	PIMN (Culturas Temporárias)	1,92	4,97
	IRR	DISTAR (Culturas Permanentes)	2,20	5,70
	IRR	DISTAR (Culturas Temporárias)	0,45	1,17
	Total Banabuiú			6,41
Eixão das Águas	AH	Morada Nova	0,10	0,26
	AH	Trecho 3	0,15	0,39
	AH	Trecho 4	0,01	0,01
	ANI	Dessedentação Animal	0,00	0,01
	IND	Indústria Betânia	0,01	0,02
	IRR	Culturas Permanentes (< 5 ha)	0,04	0,10
	IRR	Culturas Temporárias (< 5 ha)	0,02	0,05
	IRR	Xique-Xique (Culturas Permanentes)	0,08	0,21
	IRR	Mandacaru (Culturas Permanentes)	0,23	0,60
	IRR	AgropEsperança (Culturas Permanentes)	0,14	0,37
	IRR	AgropEsperança (Culturas Temporárias)	0,05	0,13
	IRR	Boa Esperança (Culturas Permanentes)	0,04	0,09
	IRR	Itaueiras (Culturas Temporárias)	0,02	0,04
	IRR	Rudolf (Culturas Temporárias)	0,08	0,19
	P	Trecho 3	0,27	0,70
Total Eixão das águas			1,22	3,16
Canal Trabalhador	AU	Abastecimento Humano	0,12	0,31
	ANI	Dessedentação Animal	0,05	0,13
	IRR	Áquino (Culturas Permanentes)	0,05	0,13
	IRR	Morgado (Culturas Permanentes)	0,03	0,06
	IRR	Itaueiras (Culturas Temporárias)	0,50	1,30
	IRR	Difusa (< 5 ha)	0,32	0,83
Total Canal do Trabalhador			1,07	2,76
Aracoiaba	AU	Montante Aracoiaba	0,18	0,47
	IRR	Jusante Aracoiaba	0,35	0,91
Total Aracoiaba			0,53	1,37
Pacajús	AU	CAGECE: Beberibe e Cascavel	0,40	1,04
	IND	Bermas	0,03	0,06
	IND	Sucos Jandaia	0,02	0,04
	IND	Distrito Industrial de Pacajus	0,14	0,36
Total Pacajús			0,58	1,50
Pacoti/ Riachão	AU	CAGECE: Pacajus, Horizonte e Chorozinho	0,25	0,65
	AU	CAGECE: Itaitinga	0,03	0,06
	IND	AMBEV	0,12	0,31
Total Pacoti-Riachão			0,40	1,02
Gavião	AU	ETA GAVIÃO: Fortaleza, Maracaná, Eusébio	8,80	22,81
	AU	EB GAVIÃO I: Maranguape (sede), Pacatuba (sede), Pavuna e Jereissati	0,20	0,52
	IND	EB GAVIÃO I: Kaiser, Marisol, Dacota	0,09	0,23
	AU	ETA OESTE: Fortaleza e Caucaia	1,00	2,59
	IND	EB GAVIÃO II: Distrito Industrial de Maracaná	0,21	0,54
	IND	Complexo Industrial do Porto do Pecém (CIPP)	1,33	3,45
Total Gavião			11,63	30,14
Total			41,72	108,14

Legenda: AH – Abastecimento Humano; AU - Abastecimento Urbano; ANI – Dessedentação de animais; IRR – Irrigação; IND – Indústria; C – Carcinicultura; P – Consumos difusos e perdas.

Fonte: Elaborado pelo autor, com dados fornecidos pela Gerência de Operação da COGERH em janeiro de 2016

4 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos utilizados para o alcance dos objetivos propostos serão apresentados nesta seção.

4.1 Estratégia Metodológica

A metodologia utilizada neste trabalho propõe a criação de um modelo de operação de reservatórios baseado na construção de níveis metas de operação mensal definido, inicialmente, a partir da preferência dos usuários e gestores de água. Estes níveis definem limiares mensais em que os tomadores de decisão devem basear-se para caracterizar o atual estado de seca de um reservatório (ou sistema de reservatórios) e acionar ações e medidas que possam combater e mitigar os prejuízos causados pela escassez de água.

Os estados de secas de um reservatório podem ser definidos de acordo com a vontade dos usuários e gestores de água na definição dos estados de Seca. Neste trabalho propôs-se a definição de cinco estados, caracterizados no Quadro 1.

Quadro 1 - Definição e caracterização dos estados de secas

Estados de Seca	Caracterização
Normal	Caracterizada pela realização de algumas atividades rotineiras e funciona como um estágio de preparação para o estado de Alerta do ponto de vista administrativo e operacional.
Alerta	Constitui-se da preparação administrativa e operacional do início de uma seca. Este nível não atinge nenhum agente social e se restringe as instituições de gestão e de abastecimento público.
Seca	Fase de menor impacto econômico e social. Nela são utilizadas principalmente as ações de comunicação, como a Informação ao consumidor e para a mídia e as ações de acompanhamento da situação do risco (Monitoramento intensivo de consumo e da qualidade de água e Avaliação periódica da situação e do desenvolvimento esperado). Nesta fase, os gestores tentam reduzir o consumo hídrico através de campanhas educacionais e buscam aumentar a disponibilidade hídrica de alguns usos em detrimento a outros.
Seca Severa	Pode acarretar situações críticas de escassez de água nas cidades. Ela impactará a sociedade, o ambiente e a economia por isso, deve ser implementadas limitações para o uso da água com o intuito de reduzir o consumo de todos os setores econômicos e sociais e deve ser realizado o monitoramento do consumo e da qualidade de água. Em sistemas bem concebidos, esta fase só ocorre quando existem episódios de aumento da severidade do clima.
Seca Extrema	Situação mais grave de seca e que pode gerar escassez hídrica generalizada. Ela gera impactos sociais e econômicos de longo alcance e os gestores devem realizar racionamentos com vistas a garantir volumes de água que atendem as necessidades básicas da população. Assim, esta fase tem como ênfase a limitação e o monitoramento do consumo de água e o monitoramento da qualidade de água.

Fonte: Souza Filho (2015)

Assim, a estratégia metodológica utilizada para definir uma regra de operação de reservatórios baseado em níveis metas contará com as seguintes etapas:

- (i) definição da preferência dos usuários e gestores de recursos hídricos;
- (ii) construção de regras de operação utilizando Níveis Metas para caracterização de estados de seca e transferência hídrica entre as bacias;
- (iii) avaliação do impacto da regra de operação definida a longo prazo;
- (iv) construção de novas regras de operação baseada nas anteriores, com vistas a eliminar problemas que dificultariam sua implantação;
- (v) análise do impacto das novas regras na operação real do sistema.

A regra de operação encontrada incorporará a participação dos agentes envolvidos (usuários e gestores) num processo de negociação, contribuindo para a gestão de recursos hídricos participativa e descentralizada. Essa regra visa, ainda, articular a alocação de água de curto e longo prazo à medida que estabelece valores de transferência e coeficientes de restrição de usos para diversos cenários de acumulação de água nos reservatórios das bacias estudadas.

4.2 Definição da preferência dos usuários

Esta etapa metodológica propõe a participação coletiva dos usuários de água, da sociedade civil e do poder público na definição dos riscos toleráveis de desabastecimento e dos valores de transferência hídrica entre as bacias envolvidas, garantindo a gestão descentralizada, participativa e integrada dos recursos hídricos.

4.2.1 *Risco Tolerável*

Os riscos toleráveis serão definidos pelos agentes envolvidos no processo de alocação e expressarão as taxas de racionamento, a frequência de permanência e a frequência das falhas de abastecimento para cada nível de seca. Nesta fase, serão definidos valores quantitativos a partir do reconhecimento das severidades associadas às restrições de uso da água. O Quadro 2 e mostra um exemplo quantitativo de definição de riscos toleráveis dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano para os diferentes estados de seca.

Nesta dissertação, o risco tolerável foi definido em reuniões com técnicos da COGERH, que aconteceram em setembro de 2016. Neste encontro, apresentaram-se aos técnicos o mesmo Quadro 2 e pediu-se que elaborassem outro quadro com valores de acordo com suas próprias preferências. Os valores definidos nesta reunião serão apresentados na sessão 5.1.

Quadro 2 - Exemplo de definição dos riscos toleráveis para os reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano em diferentes estados de seca: Frequência de falha máxima admitida, Frequência de tempo no nível e Coeficientes de racionamento.

Frequência de Falhas * (%)					
Reservatório	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Jaguaribe	60	35	15	5	0
Metropolitano	40	20	10	2	0
* Frequência de valores abaixo do nível meta considerado					
Frequência no Nível (%)					
Jaguaribe	40	25	20	10	5
Metropolitano	60	20	10	8	2
Coeficientes de racionamento**					
Jaguaribe	0,00	0,00	0,10	0,40	0,60
Metropolitano	0,00	0,05	0,15	0,20	0,50
** Porcentagem da demanda de referência					

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Trade-off de transferência entre sistemas/reservatórios

A definição de uma política de transferência entre reservatórios (ou sistemas de reservatórios) é de grande importância para a operação do sistema de abastecimento. Quando iniciar a transferência entre as bacias e o quanto de água transferir são as principais decisões que precisam ser tomadas para garantir a eficiência da transposição.

Dessa forma, buscou-se definir uma regra de transferência baseada no nível de seca de cada um dos sistemas. Assim, a partir do cruzamento do estado de severidade de cada sistema, optou-se pela definição de um valor de água a ser transferido. O início da transferência se dará quando os reservatórios atingirem os limiares de secas estabelecidos. O Quadro 3 apresenta um exemplo de uma matriz de trade-off entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano. Neste exemplo definido pelo autor, observa-se que se ambos sistemas estiverem no estado Normal, não ocorrerão transferências. Se o

sistema Metropolitano estiver no estado Seca e o sistema Jaguaribe no estado Alerta, por exemplo, serão transferidos 9m³/s. Se o estado de ambos os sistemas forem o Seca Extrema, ocorrerá uma transferência de 3m³/s. A matriz de transferência entre os sistemas foi construída pelos agentes da mesma forma do quadro de risco tolerável, apresentada em 4.2.1, utilizando como exemplo o Quadro 3.

Quadro 3 – Exemplo da matriz do trade-off de transferência entre o sistema Jaguaribe-Metropolitano. Valores em m³/s.

		Metropolitano					
		Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	Normal	0,0	6,0	9,0	12,0	15,0	15,0
	Alerta	0,0	6,0	9,0	12,0	12,0	12,0
	Seca	0,0	6,0	9,0	9,0	9,0	9,0
	Seca Severa	0,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
	Seca Extrema	0,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	Colapso	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

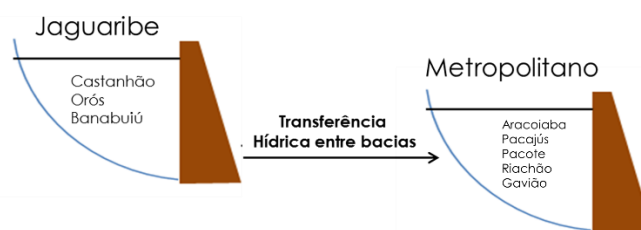
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Definição da Regra de operação utilizando Níveis Metas

O sistema Jaguaribe-Metropolitano foi estudado de forma agregada, tomando-se os três principais reservatórios da bacia do Jaguaribe (Castanhão, Orós e Banabuiú) e os cinco principais da bacia Metropolitana (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti, Riachão e Gavião) construindo-se dois reservatórios equivalentes. Optou-se por essa simplificação do sistema para que se diminuísse o número de variáveis de decisões na otimização do processo construção dos níveis metas.

Assim, agregaram-se as vazões afluentes, evaporações, CAV e demandas dos reservatórios para a construção do Reservatório Equivalente Jaguaribe (REJ) e o Reservatório Equivalente Metropolitano (REM), conforme mostra o desenho esquemático na Figura 10.

Figura 10 – Desenho esquemático do sistema Jaguaribe-Metropolitano agregado.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.1 Construção do Reservatório Equivalente

O sistema de reservatórios Jaguaribe-Metropolitano foi modelado como dois reservatórios equivalentes. Para a construção do REJ, considerou-se os reservatórios Castanhão e Orós em série e o Banabuiú paralelo a estes dois. No REM, os reservatórios foram considerados em série. As vazões, as taxas de evaporação e a curva área-volume são apresentados no Apêndice A deste trabalho e foram calculados da seguinte forma:

4.3.1.1 Vazão

Considerou-se a vazão do reservatório equivalente igual à soma das afluições dos reservatórios isolados.

$$Q_{eqv\ k,j} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4)$$

Onde,

$Q_{eqv\ k,j}$ = Vazão afluyente do reservatório equivalente k no mês j ($\text{hm}^3/\text{mês}$);

$Q_{i,j}$ = Vazão afluyente do reservatório i no mês j ($\text{hm}^3/\text{mês}$);

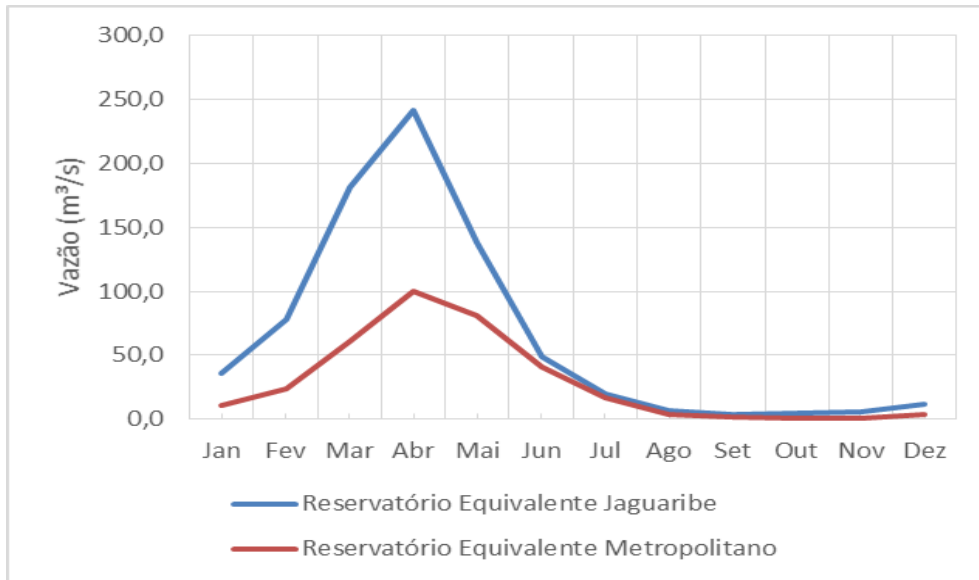
n = quantidade de reservatórios do sistema;

j = mês.

As vazões médias mensais dos reservatórios equivalentes são apresentadas na Figura 11. Os reservatórios apresentam vazões máximas no mês de abril, tendo o reservatório Jaguaribe em média $240 \text{ m}^3/\text{s}$ de vazão afluyente neste mês, enquanto o reservatório Metropolitano apresenta $100 \text{ m}^3/\text{s}$ de vazão afluyente média. Ambos

apresentam vazão próxima a zero nos meses de setembro e outubro, demonstrando claramente a variabilidade interanual da região.

Figura 11 - Vazão média mensal (m³/s) dos reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.1.2 Evaporação

O cálculo da evaporação média mensal do reservatório equivalente foi realizado tomando-se a média das evaporações mensais de cada reservatório do sistema.

$$E_{eqv\ k,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{i,j} \quad (5)$$

Onde,

$E_{eqv\ k,j}$ = Evaporação média do reservatório equivalente k no mês j (m);

$E_{i,j}$ = Evaporação média do reservatório i no mês j (m);

n=quantidade de reservatórios do sistema;

j = mês.

4.3.1.3 Curva Área – Volume (CAV)

Inicialmente, criou-se uma regra de prioridade de esvaziamento para cada reservatório do sistema. No REJ, definiu-se que o reservatório Banabuiú iniciará seu esvaziamento em paralelo com o Castanhão, esvaziando-se completamente quando este último estiver com acumulação em torno de 450 hm³. O reservatório Orós tem seu esvaziamento iniciado em série com o Castanhão, chegando ao volume mínimo de 100 hm³ quando o Castanhão estiver em 450 hm³. No REM, com os reservatórios considerados em série, optou-se pelo esvaziamento completo do Aracoiba e do Pacajús quando o Pacoti-Riachão estiver com 50 hm³. Neste mesmo volume, o reservatório Gavião iniciará o esvaziamento. Quando o Pacoti-Riachão atingir o colapso, o volume do Gavião estará em 5 hm³.

Agruparam-se os reservatórios de acordo com a prioridade de esvaziamento definida, criando-se cotas de referência. O volume máximo e o volume mínimo de cada reservatório são colocados nesse sistema de cotas, e, em seguida, faz-se a distribuição dos volumes no sistema de referência. Dessa forma, para cada cota do reservatório equivalente, teremos um volume associado de cada reservatório. Calcula-se a área referente a cada volume de cada reservatório através da relação entre Área-Volume. O cálculo do volume e da área do reservatório equivalente se dará, então, pela soma dos volumes e áreas de cada uma das cotas do sistema de referência. No Apêndice A desta dissertação são apresentados os valores das CAV dos reservatórios do sistema e a CAV resultante dos REJ e REM.

4.3.1.4 Demanda

Considerou-se a demanda do reservatório equivalente igual a soma das demandas dos reservatórios isolados.

$$D_{eqv} = \sum_{i=1}^n D_i \quad (6)$$

Onde,

n = quantidade de reservatórios do sistema

D_i = Demanda do reservatório i (hm³/mês);

4.3.2 *Balanço Hídrico do Reservatório*

Para se determinar o volume de acumulação do reservatório foi aplicada a equação do balanço hídrico, dada por:

$$V_{t+\Delta t} = V_t + I_t - E_t \cdot A_t - R_t - P_t - S_t \quad (7)$$

Onde,

$V_{t+\Delta t}$ = Volume do reservatório no período de tempo $t+\Delta t$, onde $\Delta t=1$ mês (hm^3);

V_t = Volume armazenado no início do período de tempo t (hm^3);

I_t = Volume afluente ao reservatório durante o período de tempo t (natural e de transferência) (hm^3);

E_t = Lâmina evaporada durante o período de tempo t , suposta constante ao longo do período (hm);

A_t = Área do espelho d'água no início do período t , suposta constante para intervalos de tempos pequenos (hm^2);

R_t = Retiradas operacionais visando suprimento das demandas e transferências do período de 1 mês (hm^3);

S_t = Vertimento (hm^3);

P_t = Perdas por infiltração (hm^3), consideradas nulas neste trabalho.

4.3.3 *Operação com salvaguardas*

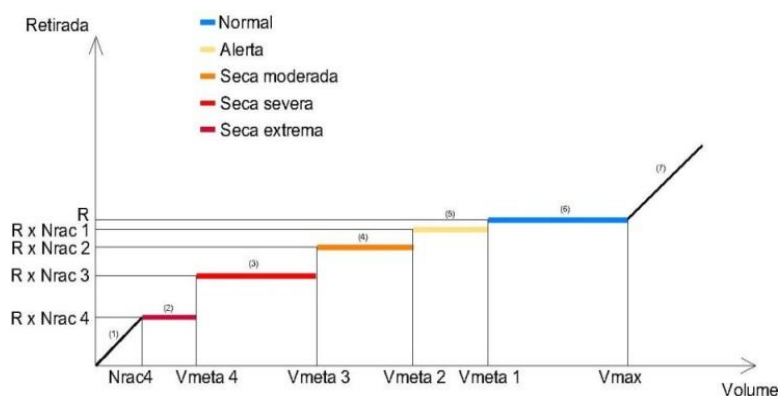
A regra de operação dos reservatórios foi baseada em sete estágios de liberação descritos a seguir:

- (i) no primeiro estágio (1) o reservatório está com volume menor que o necessário no período para suprir a retirada no nível de racionamento 4 ($R \cdot \text{Nrac}_4$). Nesta situação libera-se o volume de água disponível no reservatório, secando-o.
- (ii) No segundo estágio (2) há um volume do reservatório (V) menor que o nível meta 4. Utiliza-se um coeficiente de racionamento Nrac_4 , que multiplicado a retirada R , irá definir o valor da retirada naquela situação. O mesmo acontece para os estágios (3), (4), (5), quando o estoque está abaixo dos respectivos volumes metas (3, 2 e 1), aplicando-se um coeficiente de racionamento Nrac_3 , Nrac_2 , Nrac_1 , respectivamente para os três níveis.

- (iii) No sexto estágio (6), há um volume do reservatório (V) suficiente para o suprimento de toda a vazão regularizada, neste caso a liberação é igual à vazão de referência.
- (iv) No sétimo estágio (7) o volume do reservatório é maior que o volume máximo de conservação (caso não haja comportas) o volume liberado será a vazão de referência (R) somada ao vertimento, (V-V_{max}).

A Figura 12 mostra o desenho esquemático da regra de operação. Os coeficientes de racionamentos serão definidos pelos usuários e gestores de água, conforme descrito na seção 4.2.1.

Figura 12 - Regra de operação com salvaguardas



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.4 Construção dos níveis metas

A definição dos níveis metas baseia-se na construção de uma curva calculada da seguinte forma:

- (i) O primeiro nível meta é construído, inicialmente, a partir de uma curva de disponibilidade tomando como ponto inicial um volume V1 do reservatório no mês de janeiro. Utiliza-se a equação do balanço hídrico com vazão afluyente zero, transferência mensal zero e retirada mensal desejada para o cálculo da acumulação dos onzes meses subsequentes. Esta curva indica ao limite inferior de acumulação do reservatório partindo do ponto inicial V1.
- (ii) uma segunda curva é construída tomando-se como o volume do décimo segundo mês o mesmo valor V1. Utiliza-se a equação do balanço para o cálculo dos onzes meses anteriores, novamente desconsiderando as

afluências e as transferências dos reservatórios. Essa segunda curva indica o limite superior da curva meta e tem por objetivo reduzir a transição busca entre os estados de secas.

- (iii) partindo novamente do ponto V1, uma terceira curva é construída utilizando a equação do balanço de massa com o volume afluente igual ao volume correspondente de um determinado quantil da série histórica de vazões. Neste trabalho, o valor da afluência mensal foi igual ao da mediana da série histórica de vazões. Assim, construiu-se uma matriz de probabilidade de não excedência, e selecionou o ano corresponde a mediana das vazões da série histórica. Tomou-se o valor de vazões afluentes deste ano correspondente. Aplicou-se a equação do balanço hídrico com retirada mensal igual ao da curva 1.
- (iv) a definição do nível meta (VMeta) se dará pela utilização dos valores correspondentes, mês a mês, pelo máximo entre a curva 1 (C1) e curva 3 (C3), e o mínimo entre esse resultado (CR) e a curva 2 (C2).

$$CR = \text{máximo}(C1, C3) \quad (8)$$

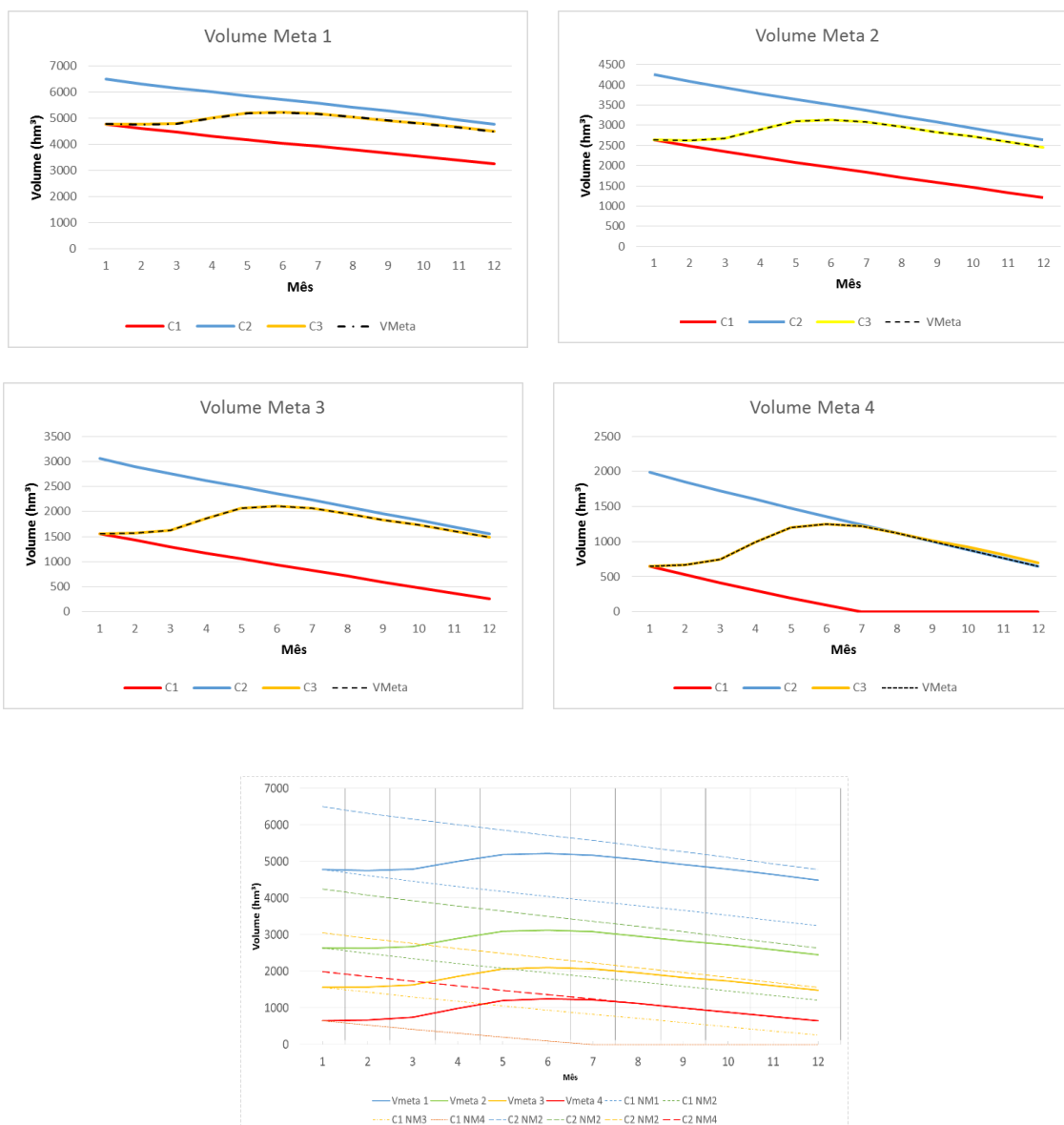
$$VMeta = \text{mínimo}(CR, C2) \quad (9)$$

- (v) Na sequência, são construídos os outros níveis metas inferiores, repetindo-se o procedimento adotado em (i) a (iv), e modificando os valores do ponto inicial.

Optou-se por escolher a mediana das afluências na construção da curva em (iii) de forma Ad-Hoc. Esta escolha implica principalmente na definição dos níveis metas nos meses de maiores precipitações. Sugere-se que em trabalhos futuros estes valores sejam modificados para a verificação de quais quantis geram melhores níveis metas.

A Figura 13 apresenta uma aplicação da metodologia de construção dos níveis metas do reservatório equivalente do Jaguaribe.

Figura 13 - Construção de Níveis Metas do reservatório equivalente Jaguaribe: (a) Volume Meta 1; (b) Volume Meta 2; (c) Volume Meta 3; (d) Volume Meta 4; (e) Níveis Metas



Fonte: Elaborada pelo autor

4.3.5 Modelo de Otimização

Aplicou-se um modelo de otimização para encontrar os níveis metas ótimos do reservatório. Para tanto, definiu-se a otimização de oito parâmetros através de duas funções objetivos.

Os parâmetros a serem otimizados correspondem ao volume do ponto inicial no mês de julho de cada um dos reservatórios equivalentes. Na construção do nível meta 1, o algoritmo seleciona um valor para o ponto inicial h_1 , podendo variar entre 30% e 50% do volume máximo do reservatório. Na construção dos níveis metas inferiores, o

algoritmo seleciona como ponto inicial uma fração do ponto inicial da curva meta superior. Esta construção permite que as curvas guias não se sobreponham umas às outras, nem que as inferiores sejam construídas acima das superiores.

Após a construção das curvas de níveis metas, o sistema é simulado e verifica-se a garantia (frequência nos níveis) em cada um dos níveis. O algoritmo de otimização usa uma função objetivo para aproximar a garantia encontrada nesta simulação com a garantia desejada indicada pelos usuários e gestores na seção 5.1.

As funções objetivos deram-se pelo somatório da diferença quadrática entre as garantias desejadas e calculadas em cada um dos reservatórios equivalentes. Essas garantias representam a porcentagem do tempo que o volume do reservatório teve valores acima da curva meta de cada nível. O período de tempo simulado corresponde a janeiro de 1912 a dezembro de 2012. A definição de garantia é apresentada em 4.4.1.

$$FO = \sum_{t=1}^n (Gd_{m,t} - Gc_{m,t})^2 \quad (10)$$

Onde:

$Gd_{m,t}$ = Garantia desejada no nível m no tempo t ;

$Gc_{m,t}$ = Garantia calculada no nível m no tempo t ;

n = Número de meses da simulação.

O modelo de otimização utilizado foi desenvolvido por Vrugth *et. Al* (2003), denominado de MOSCEM (Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis). Esse algoritmo tem a capacidade de resolver problemas de otimização com múltiplos objetivos para modelos hidrológicos, utilizando o conceito de dominância de Pareto. O algoritmo parte de uma população inicial e evolui na direção de um conjunto de soluções possíveis, formadoras da Frente de Pareto (Vrugt *et al.*, 2003).

O algoritmo MOSCEM inicia processo de otimização com a definição dos limites máximos e mínimos dos valores que os n parâmetros iniciais podem ter. Em seguida são gerados, a partir de uma distribuição de probabilidades definida, diferentes conjuntos de parâmetros que definirão uma população de possíveis soluções. Cada ponto é dado pelos valores dos n parâmetros e para cada um dos pontos as nf funções-objetivo são avaliadas. Após a avaliação das funções-objetivo, os conjuntos de

parâmetros são hierarquizados pelos critérios de dominância e de não dominância. (Vrugt *et al.*, 2003; Bravo *et al.*, 2009).

4.4 Avaliação do impacto da regra em longo prazo

A modelagem do sistema em reservatórios equivalentes não é feita na operação real do sistema. Diante disso, aplicou-se a regra de operação encontrada ao sistema de reservatórios desagregado, visando analisar os impactos em longo prazo da definição dos níveis metas para os diferentes reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

Para tanto, optou-se por desenvolver uma planilha de cálculo, utilizando o software Excel®, que desse suporte a modelagem do sistema Jaguaribe – Metropolitano com a incorporação dos níveis metas para os reservatórios desagregados.

Os dados de Afluência, Taxa de evaporação, Curva Cota-Área-Volume (CAV), Capacidade Máxima de acumulação e Demanda necessários para operação do sistema são os mesmos apresentados na sessão 3.

Algumas regras de transferência entre os reservatórios dentro da mesma bacia foram incorporadas nesse processo. Esta regra visa a utilização das águas dos reservatórios mais a jusante pelos reservatórios mais a montante num momento em que estes últimos sinalizem a possibilidade de não atenderem suas demandas. Cabe destacar que essa regra de transferência foi criada de modo Ad-Hoc e indica o início e o fim das transferências somente entre os reservatórios dentro da mesma bacia.

Assim, criou-se uma regra baseada nos níveis de acumulação dos reservatórios doadores (montante) e receptores (jusante) para o acionarem o gatilho da transferência entre eles, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 - Gatilhos de transferência entre os reservatórios dentro da mesma bacia

Montante	Jusante	Gatilho de início	Gatilho de fim	Vazão de transferência (m ³ /s)
Orós	Castanhão	Volume Castanhão < 400 hm ³ e Volume Orós > 150 hm ³	Volume Castanhão > 400 hm ³ ou Volume Orós < 150 hm ³	16,0
Banabuiú	Castanhão (eixão)	Volume Castanhão < 1000 hm ³ e Volume Banabuiú > 500 hm ³	Volume Castanhão > 1000 hm ³ ou Volume Banabuiú < 500 hm ³	5,0
Aracoiaba	Pacajús	Volume Pacajús < 120 hm ³ e Volume Aracoiaba > 10 hm ³	Volume Pacajús > 120 hm ³ ou Volume Aracoiaba < 10 hm ³	4,0
Pacajús	Pacoti-Riachão	Volume Pacoti-Riachão < 300hm ³ e Volume Pacajús > 20 hm ³	Volume Pacoti-Riachão > 300hm ³ e Volume Pacajús < 20 hm ³	10,0
Pacoti-Riachão	Gavião	Sempre que não houver vertimento no Gavião	Quando houver vertimento no Gavião	12,0

Fonte: Elaborado pelo autor

A transferência entre os sistemas Jaguaribe Metropolitano ocorreu baseado na matriz de trade-off de transferências hídrica, respeitando os valores propostos para cada cenário construído. Além disso, tomou-se como os níveis metas para cada reservatório isolado integrante da bacia do Jaguaribe o mesmo definido para o seu reservatório equivalente. Na bacia do Metropolitano, definiu-se o estado de seca mensal a partir da soma dos estoques de cada um dos reservatórios integrantes dessa bacia.

A análise de desempenho foi realizada verificando a acumulação dos reservatórios e o atendimento das demandas. Para isso, utilizou-se os critérios de frequência de falhas em cada nível, frequência de permanência no nível e resiliência do sistema para análise dos reservatórios e severidade das falhas da operação e vulnerabilidade para a análise do suprimento das demandas. As análises foram realizadas para as todas as regras de operação definidas. Ao fim, compararam-se as diferentes regras de operações para saber o impacto de cada uma na operação real do sistema.

4.4.1 *Frequência de falhas no nível*

A frequência de falhas no nível (FFn) é definida como a frequência do tempo de simulação em que o reservatório permaneceu num nível inferior ao nível observado.

$$FFn = \frac{\sum f}{n} \quad (11)$$

Onde,

n é o período de tempo da simulação (t=1,2,3...n);

$$f = \begin{cases} 1, & \text{se nível 't+1' for inferior ao nível no mês 't';} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

4.4.2 *Garantia no nível*

A garantia no nível (Gn) é definida como a frequência do tempo de simulação em que o reservatório permaneceu num nível igual ou superior ao nível observado.

$$Gn = \frac{\sum g}{n} = 1 - FF \quad (12)$$

Onde,

n é o período de tempo da simulação (t=1,2,3...n);

$$g = \begin{cases} 1, & \text{se nível 't+1' for o mesmo ou superior ao nível no mês 't';} \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

FF = Frequência de falhas;

4.4.3 *Resiliência do sistema*

A resiliência irá medir o tempo que um sistema irá se recuperar de uma falha, caso ela venha ocorrer. Alguns efeitos podem ocorrer ao sistema caso aconteçam falhas prolongadas com uma recuperação lenta. Deseja-se que o sistema retorne a um estado regular o quão rápido. Hashimoto et al. (1982) definem a resiliência (γ) como o

inverso do valor esperado do tempo médio em que o sistema permanece em falha, e pode ser calculado por:

$$\gamma = \left[\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (1 - Z_t) \right)}{\left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_t \right)} \right] \quad (13)$$

Onde,

n é o período de tempo da simulação ($t=1,2,3\dots n$);

$$Z_t = \begin{cases} 0, & \text{se ocorrer falha no tempo 't';} \\ 1, & \text{se não ocorrer falha no tempo 't'.} \end{cases}$$

$$W_t = \begin{cases} 1, & \text{se não ocorrer falha no tempo 't' e ocorrer falha no tempo 't+1';} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

4.4.4 Severidade das falhas

A severidade (S) denota o déficit de atendimento (dD) a um determinado uso. Ela pode ser definida como o volume que faltou para o reservatório atender a demanda de referência de um determinado mês.

$$S = dD = D_r - D_a \quad (14)$$

Onde,

D_r = Demanda de referência do mês (hm^3);

D_a = Demanda atendida no mês (hm^3).

4.4.5 Vulnerabilidade do sistema

A vulnerabilidade (V) mede a severidade das falhas a que o sistema está sujeito, podendo ser expressa como sendo o somatório da severidade em um determinado período de tempo.

$$V = \sum_{i=k}^m S_i \quad (15)$$

Onde,

S = Severidade da falha (hm^3);

k = mês de início do período de tempo desejado;

m = mês do fim do período de tempo desejado.

4.4.6 Transição entre os níveis de seca

A verificação da transição entre os níveis de seca será feita a partir da matriz de transição de níveis dos reservatórios ou do sistema de reservatórios (Tabela 6). Na tabela, a quantidade de meses da simulação em que ocorreu a mudança de um nível específico para outro.

A linha da matriz representa o mês presente e a coluna, o mês subsequente. Assim, os valores que aparecem na linha 1 e coluna 1 dessa matriz representam o número de vezes em que o reservatório estava no estado normal e permaneceu no estado normal. Os elementos da matriz que aparecem na linha 1 e coluna 2 representam os meses que estavam no estado normal e foram para o estado alerta. Na linha 3 e coluna 5 mostram a quantidade de meses que partiram de um estado seco e foram para um estado de seca extrema, por exemplo.

Tabela 6 - Matriz de transição dos estados de secas dos reservatórios. A linha representa o nível no mês 't' enquanto a coluna representa o nível no mês 't+1'.

		Mês 't + 1'				
		1-Normal	2-Alerta	3-Seca	4-Seca Severa	5-Seca Extrema
Mês 't'	1 -Normal	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)
	2- Alerta	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)
	3 -Seca	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)
	4 -Seca Severa	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)	(4,5)
	5- Seca Extrema	(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	(5,5)

4.5 Construção de novas regras de operação a partir das anteriores

Na análise da operação dos cenários anteriormente apresentados, percebeu-se uma rápida transição entre os níveis de secas. Os reservatórios entravam em um estado de seca, e nesse permanecia por apenas um ou dois meses, mudando novamente

de estado. Essa transição não é viável na operação real do sistema de reservatórios, haja vista que esta regra imporá diferentes racionamentos durante o ano.

Outra percepção levou em conta a transição brusca de um nível de seca para outro dois ou três níveis abaixo. Os reservatórios saíram em um mês do estado de alerta para o estado de seca extrema no mês seguinte, por exemplo. Percebeu-se, então, que essas falhas apresentadas na operação comprometeriam a operação real do sistema. Diante disso, propôs-se a elaboração de outras duas regras de operação apresentadas a seguir.

4.5.1 Tomada de decisão sobre racionamento e transferência.

Esta regra visa incorporar na operação do sistema o momento (mês) da tomada de decisão sobre o racionamento das demandas e a transferência entre as bacias. Dessa forma, criou-se um novo cenário de operação baseado na seguinte regra de alocação:

- i) a transferência mensal entre os sistemas se dará com base nos estados de seca dos reservatórios, à partir da matriz de trade-off de transferência que será mostrada em 5.2.3.
- ii) a definição do racionamento será feito duas vezes ao ano, nos meses de abril e julho. Para isso, deverá ser observado em que nível o reservatório se encontra no mês de abril e assim proposto o racionamento referente a este nível, tomando como coeficiente de racionamento o mesmo apresentado em 5.2.3. A permanência desse racionamento ocorrerá até o mês de julho, quando se tomará uma nova decisão sobre o nível de seca em que se encontra e, conseqüentemente, a retirada, a permanência ou a intensificação da restrição de uso, restando a mesma até o mês de março do ano seguinte, quando acontecerá a nova decisão sobre o nível de racionamento do sistema.

Esta regra, definida como Nível Meta 4, impede a variação de diferentes cenários de racionamentos no ano, permitindo a preparação de ações e medidas para um estágio de seca mais intensa.

4.5.2 Regra de bombeamento mínimo para RMF

A utilização da regra de operação anterior possibilitou maiores tempos de permanência num nível, evitando a imposição de diferentes racionamentos durante o ano. Entretanto, esta regra não foi capaz de resolver o problema da transição brusca de um nível para dois ou três abaixo em um único mês. Essa falha da regra de operação anterior pôde ser observada no reservatório equivalente metropolitano. Portanto, optou-se pela elaboração de uma regra de operação que pudesse transferir um valor mínimo de água para a RMF que pudesse resolver, ou pelo menos amenizar o problema da transição brusca nesse sistema.

Essa regra diferencia-se das outras pois impõe transferência de água para a RMF mesmo quando os reservatórios estão no estado normal. Esses valores transferidos contribuem para a permanência dos reservatórios da RMF em cotas elevadas, em contrapartida ao maior vertimento destes nos períodos úmidos, e na transferência de riscos entre as bacias. À medida que uma maior vazão é bombeada para a RMF, mantendo-se a água próxima a Fortaleza e diminuindo o risco de uma falha operacional, por exemplo, aumenta-se o risco de desabastecimento ou imposições de restrições mais severas dos usos na região do Jaguaribe.

Dessa forma, criou-se uma matriz de trade-off de bombeamento, apresentado no Quadro 5, para a criação de uma nova regra de operação do sistema, denominada de Nível Meta 5.

Quadro 5 - Trade-off de bombeamento entre os sistemas Jaguaribe – Metropolitano para a construção da regra de operação Nível Meta 5, com vistas a aumentar os estoques de água na RMF e reduzir o impacto provocado pela transição brusca entre os níveis.

		Metropolitano					
		Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	Normal	3,0	4,0	4,5	5,0	6,0	9,0
	Alerta	2,0	3,0	4,0	4,0	6,0	9,0
	Seca	3,0	3,0	5,0	5,0	6,0	9,0
	Seca Severa	3,0	4,0	5,0	7,5	6,5	7,7
	Seca Extrema	3,0	4,0	5,0	4,0	4,0	6,3
	Colapso	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os principais resultados da simulação do sistema Jaguaribe-Metropolitano, demonstrando o comportamento dos reservatórios e o atendimento às demandas do sistema para as diferentes regras de operação propostas. Serão apresentadas ainda os riscos toleráveis de desabastecimento e os valores de transferência hídrica propostos para a obtenção dos volumes metas.

5.1 Definição da preferência dos usuários

A preferência dos usuários foi definida, nesta dissertação, através de reuniões exclusivas com técnicos da COGERH. Estas reuniões aconteceram nos dias 22 e 26 de setembro de 2016.

O primeiro dia de encontro foi utilizado para a apresentação do projeto da dissertação. Neste encontro foram apresentados os dados utilizados, bem como a metodologia de desenvolvimento do trabalho. O segundo encontro ocorreu para a definição dos valores dos riscos toleráveis de desabastecimento e de transferência hídrica entre os sistemas. Nesta segunda reunião estavam presentes quatro técnicos da companhia de Fortaleza e outros três técnicos das regionais dos interiores (Limoeiro e Quixeramobim), que participaram por videoconferência. Neste dia optou-se pela definição de duas tabelas que, em uma, incorporou a preferência dos técnicos da capital e noutra a preferência dos técnicos do interior. Os valores definidos são apresentados no Quadro 6 e no Quadro 7.

Um cenário adicional foi construído pelo pesquisador e apresentado no Quadro 6. Este cenário diferenciou-se dos outros, principalmente, nos valores de transferência feito entre as regiões Jaguaribe e Metropolitana. Com as outras simulações, percebeu-se após as simulações que os reservatórios da RMF tinham volumes acumulados extremamente baixos, com alguns chegando ao colapso enquanto os da região Jaguaribe mantinham-se em volumes elevados. Resolveu-se, então, simular uma regra de operação que transpusesse maiores valores de água entre as duas bacias.

Quadro 6 - Definição dos riscos toleráveis de desabastecimento e os valores de transferência hídrica propostos de técnicos da COGERH Fortaleza

% Falha (Porcentagem do tempo em que o reservatório se encontra abaixo do nível considerado)							
Reservatório	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema		
Jaguaribe	66	41	21	6	0		
Metropolitano	33	18	8	3	0		
Coefficientes de racionamento (fração da demanda de referência)							
Reservatório	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema		
Jaguaribe	0,00	0,05	0,15	0,50	0,95		
Metropolitano	0,00	0,00	0,10	0,25	0,35		
Trade-off de transferência entre sistemas (m ³ /s)							
		Metropolitano					
		Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	Normal	0,00	4,50	8,10	9,00	9,00	9,00
	Alerta	0,00	4,50	8,10	9,00	9,00	9,00
	Seca	0,00	2,25	8,10	7,20	6,75	6,75
	Seca Severa	0,00	0,00	7,20	6,75	6,30	6,30
	Seca Extrema	0,00	0,00	6,75	6,30	5,85	5,85
	Colapso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro 7 - Definição dos riscos toleráveis de desabastecimento e os valores de transferência hídrica propostos de técnicos da COGERH Interior

% Falha (Porcentagem do tempo em que o reservatório se encontra abaixo do nível considerado)							
Reservatório	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema		
Jaguaribe	66	41	21	6	0		
Metropolitano	33	18	8	3	0		
Coefficientes de racionamento (fração da demanda de referência)							
Reservatório	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema		
Jaguaribe	0	0,05	0,15	0,50	0,95		
Metropolitano	0	0,05	0,10	0,20	0,30		
Trade-off de transferência entre sistemas (m ³ /s)							
		Metropolitano					
		Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	Normal	0,00	4,50	8,10	9,00	9,00	9,00
	Alerta	0,00	4,05	7,65	8,55	8,55	8,55
	Seca	0,00	3,15	6,75	7,65	7,65	7,65
	Seca Severa	0,00	0,45	3,60	4,50	4,50	4,50
	Seca Extrema	0,00	0,00	0,36	0,45	0,45	0,45
	Colapso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Quadro 8 - Definição dos riscos toleráveis de desabastecimento e os valores de transferência hídrica propostos pelo pesquisador

% Falha (Porcentagem do tempo em que o reservatório se encontra abaixo do nível considerado)							
Reservatório	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema		
Jaguaribe	60	35	15	5	0		
Metropolitano	40	20	10	2	0		
Coefficientes de racionamento (fração da demanda de referência)							
Reservatório	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema		
Jaguaribe	0,0	0,0	0,1	0,4	0,7		
Metropolitano	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6		
Trade-off de transferência entre sistemas (m ³ /s)							
		Metropolitano					
		Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	Normal	0,00	3,15	6,30	7,65	9,00	9,00
	Alerta	0,00	3,15	6,30	7,65	9,00	9,00
	Seca	0,00	3,15	6,30	7,65	7,65	9,00
	Seca Severa	0,00	3,15	6,30	6,30	6,30	7,65
	Seca Extrema	0,00	3,15	3,15	3,15	3,15	6,30
	Colapso	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

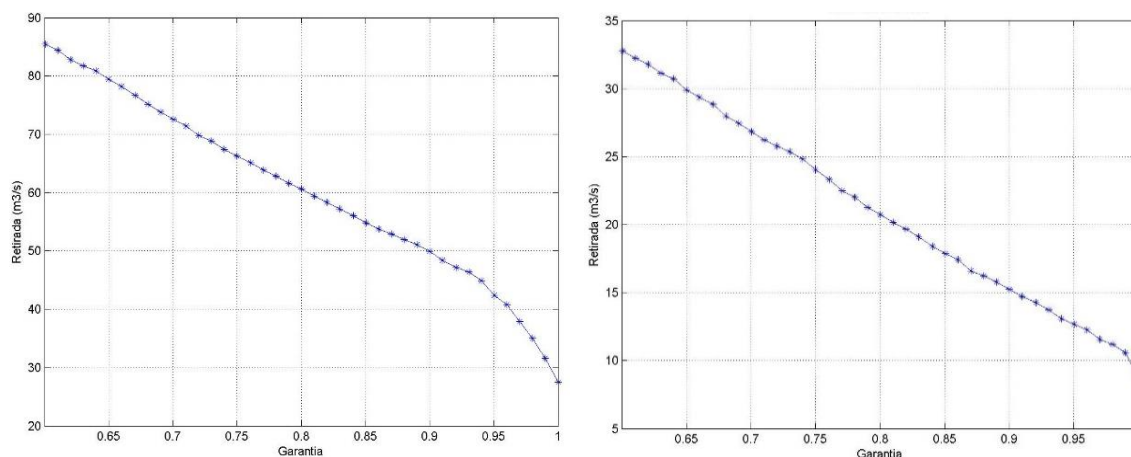
5.2 Definição da Regra de operação utilizando Níveis Metas

Os reservatórios componentes do sistema Jaguaribe-Metropolitano foram agregados em dois reservatórios equivalentes para a definição dos níveis metas de operação. Essa proposição permitiu a simplificação do modelo de operação do sistema.

Assim, os reservatórios Castanhão, Orós e Banabuiú foram agregados formando o reservatório equivalente Jaguaribe (REJ) enquanto os reservatórios Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião formaram o reservatório equivalente Metropolitano (REM)

Calculou-se a vazão regularizada dos reservatórios para diferentes garantias de atendimentos, apresentando-se na Figura 14. O REJ apresentou vazão regularizada com 90% de garantia em torno de 50 m³/s enquanto o REM, 15m³/s. A vazão firme dos reservatórios foram 27,5 m³/s e 8,5 m³/s, respectivamente para REJ e REM. Sabendo-se que as demandas equivalentes dos reservatórios são 29,1 m³/s e 13,2 m³/s (REJ e REM respectivamente), as garantias de abastecimento estariam em torno de 99% (Jaguaribe) e 93 % (Metropolitano). Percebe-se, então, que a demanda instalada na RMF é superior a sua capacidade de atendimento, necessitando de água da transposição da bacia do Jaguaribe. A bacia do Jaguaribe, por sua vez, possui atualmente uma demanda equivalente a sua garantia firme. O aumento do consumo de água de água nessa região irá impor falhas no suprimento de suas demandas em algum momento. Assim, percebe-se que transferência de água para a região metropolitana configura-se uma troca de riscos entre as duas bacias: a garantia de água para a RMF irá impor riscos de falhas no Jaguaribe.

Figura 14 - Vazão regularizada dos Reservatórios equivalentes Jaguaribe (a) e Metropolitano (b) para garantias de 60% a firme (100%)



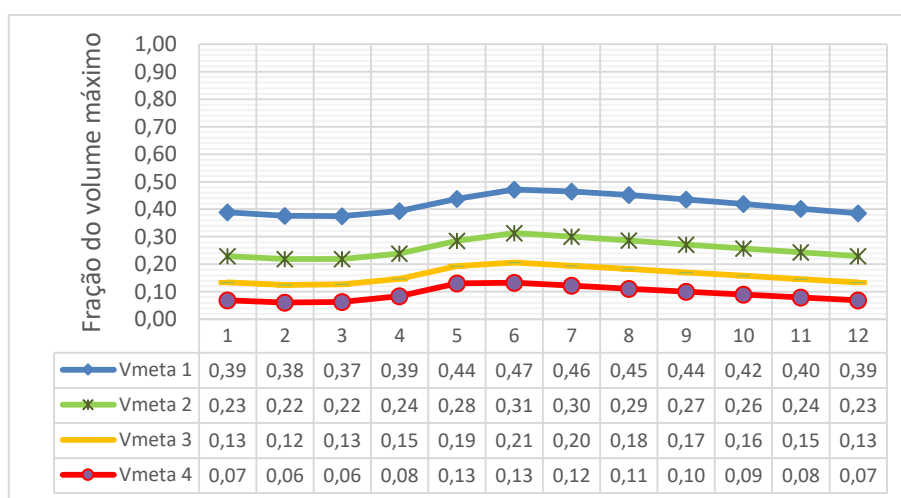
Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados dos reservatórios equivalentes foram combinados com os valores de riscos toleráveis de desabastecimento e transferência hídrica propostos na seção 5.1 e inseridos num algoritmo programado em Matlab® para geração dos níveis metas. As curvas são apresentadas nas subseções seguintes.

5.2.1 Níveis Metas 1

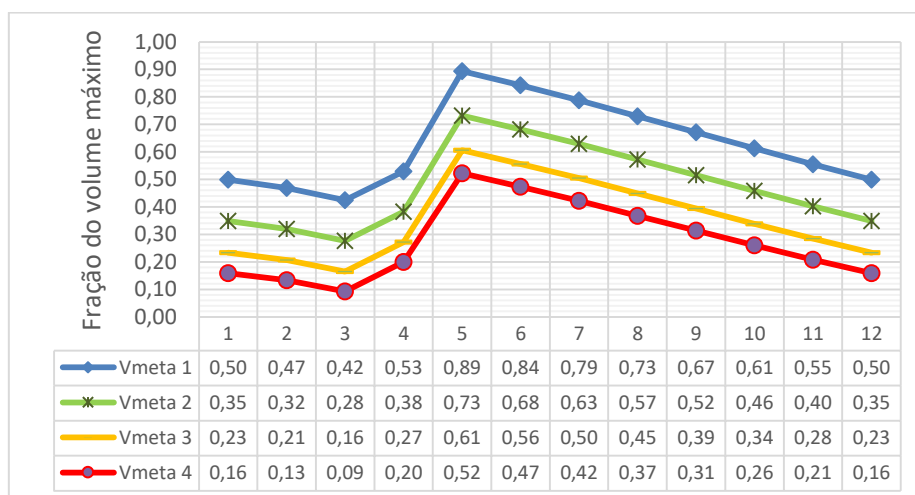
Os níveis metas 1 são resultados das preferências propostas por técnicos da COGERH de Fortaleza e são apresentados na Figura 15 e na Figura 16.

Figura 15 – Níveis Metas 1 do reservatório Equivalente Jaguaribe definido a partir da preferência dos Técnicos COGERH Fortaleza.



Fonte: Elaborado pelo autor

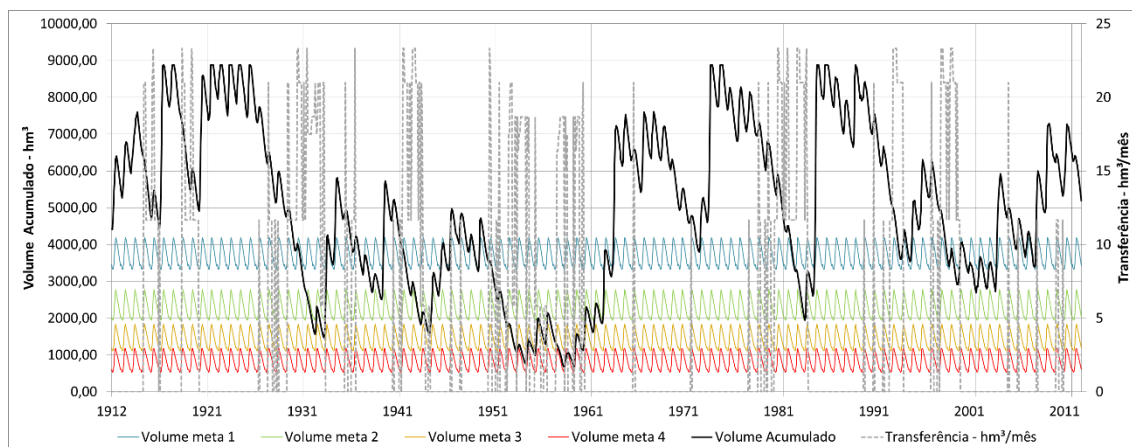
Figura 16 - Níveis Metas 1 do reservatório Equivalente Metropolitano definido a partir da preferência dos Técnicos COGERH Fortaleza.



Fonte: Elaborado pelo autor

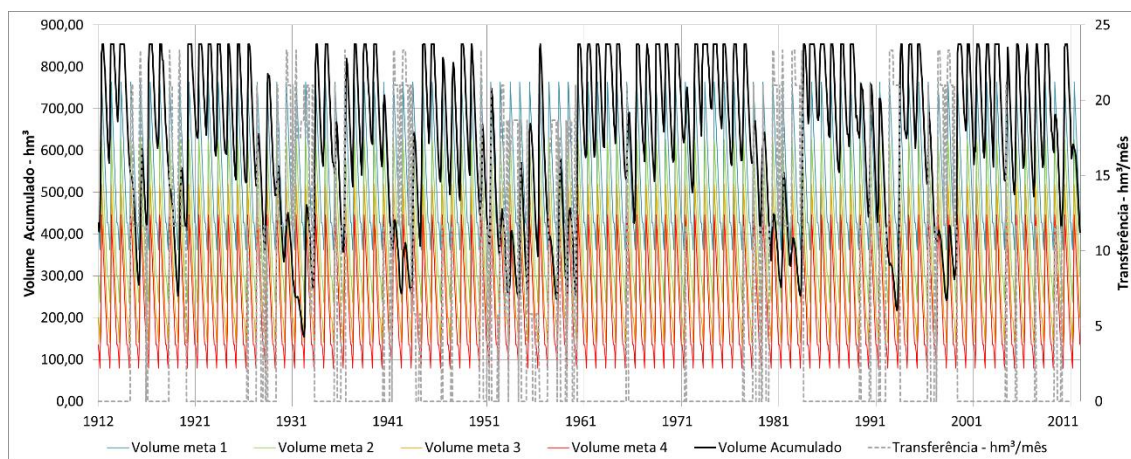
A operação do sistema equivalente a partir da regra de operação formada com os níveis metas 1 apresentou a evolução mostrada na Figura 17 (Jaguaribe) e na Figura 18 (Metropolitano). O reservatório Jaguaribe apresentou o volume mínimo acumulado de, aproximadamente, 680 hm³ no ano fevereiro de 1959, estando inserido no estado de Seca Severa. Neste estado, o reservatório apresentou a frequência de 4,7% do tempo. No estado de Seca Extrema, o reservatório permaneceu por 0,25% do tempo, enquanto que no estado de seca e alerta, 8,5% e 16,3%, respectivamente. O reservatório esteve em 70,3% no estado de normalidade do sistema. A Tabela 7 apresenta resumidamente esses valores e inclui também a frequência de permanência em cada estado de seca do reservatório metropolitano. Nesta simulação, nenhum dos reservatórios atingiu o colapso.

Figura 17 - Simulação da operação do reservatório equivalente Jaguaribe com os níveis metas 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 - Simulação da operação do reservatório equivalente Metropolitano com os níveis metas 1



Fonte: Elaborado pelo autor

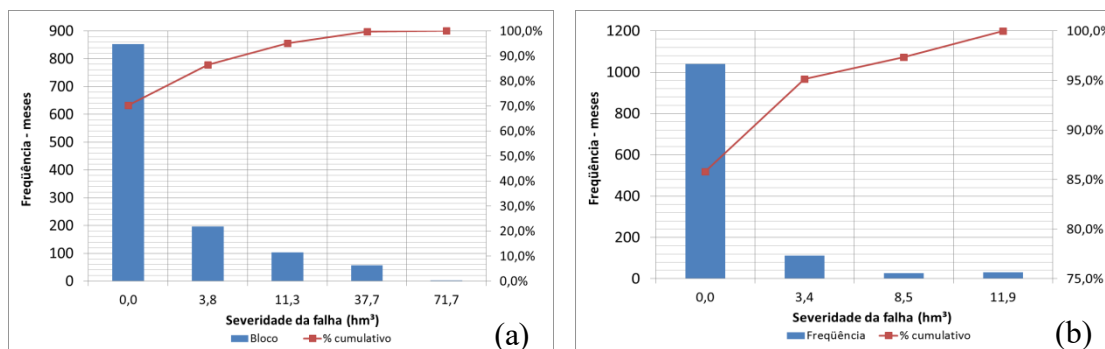
Tabela 7 - Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 1

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	70,30%	16,25%	8,50%	4,70%	0,25%	0,00%
Metropolitano	71,04%	14,77%	9,32%	2,23%	2,64%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 19 apresenta o histograma das severidades dessa operação, indicando o déficit de atendimento da demanda. Nela é possível observar que a falha acontece em grande parte nos estados de seca que representam menores severidades. No Metropolitano 9% dos meses tiveram falhas que ocasionaram uma severidade de apenas 3,6 hm³ no mês. No Jaguaribe, a falha de 3,8 hm³ esteve presente em 16% dos meses em ocorreram alguma falha. A maior severidade desta simulação ocorreu no reservatório Jaguaribe, no valor de 71,7 hm³ ocorrendo em apenas 0,2% do período simulado.

Figura 19 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 1: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano

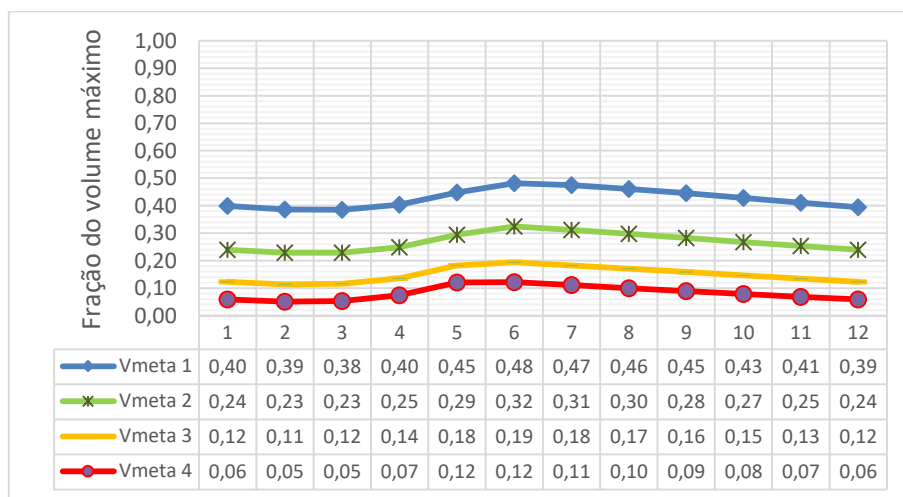


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.2 Níveis Metas 2

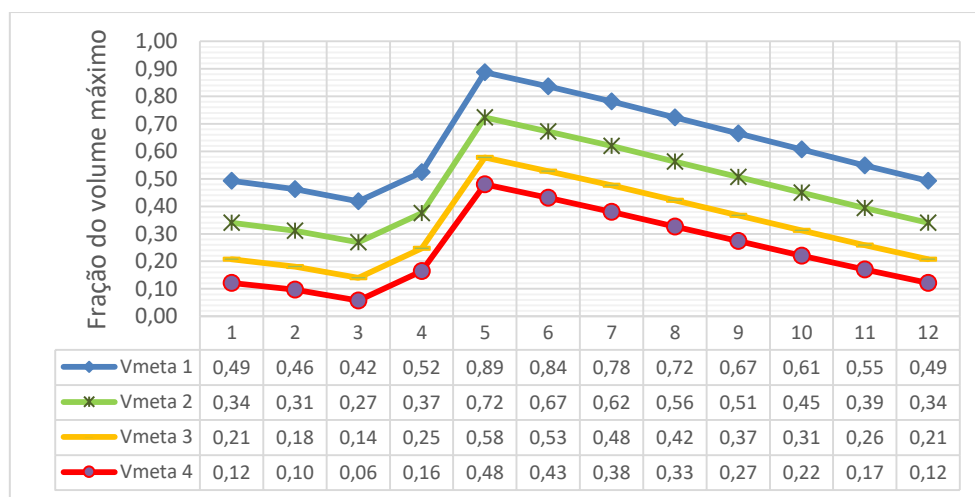
Os níveis metas 2 são resultados das preferências propostas por técnicos da COGERH das gerências do interior e são apresentados na Figura 20 e na Figura 21.

Figura 20 – Níveis Metas 2 do reservatório Equivalente Jaguaribe definido a partir da preferência dos Técnicos COGERH gerência interior



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 - Níveis Metas 2 do reservatório Equivalente Metropolitano definido a partir da preferência dos Técnicos COGERH gerência interior

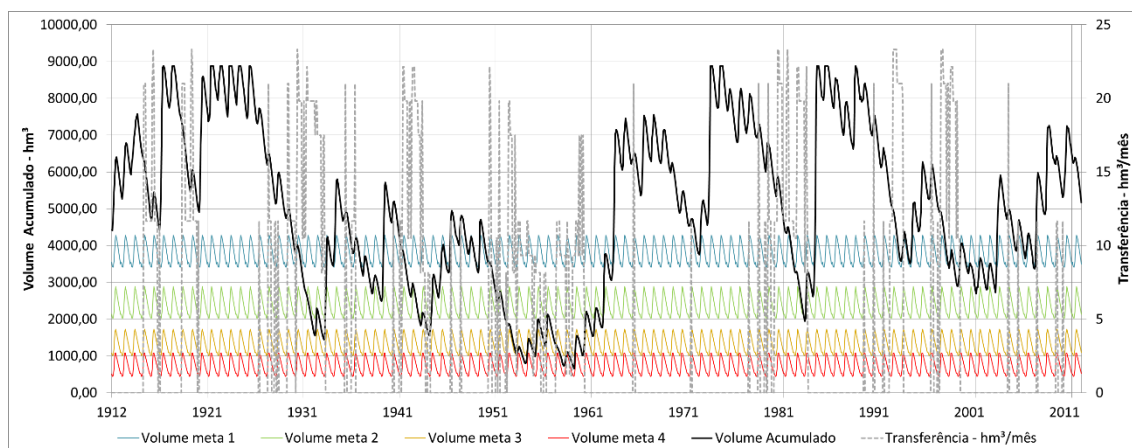


Fonte: Elaborado pelo autor

A operação do sistema equivalente Jaguaribe e Metropolitano, a partir da regra de operação formada com os níveis metas 2, é apresentada na Figura 22 (Jaguaribe) e na Figura 23 (Metropolitano). O reservatório Jaguaribe apresentou o volume mínimo acumulado de, aproximadamente, 580 hm³ no ano de 1960, estando

inserido no estado de Seca Extrema. Neste estado, o reservatório apresentou a frequência de apenas 0,08% do tempo. No estado de Seca Severa, o reservatório permaneceu por 4,37 % do tempo, enquanto que no estado de seca e alerta, 9,65 % e 17,49 %, respectivamente. O reservatório esteve em 68,4% no estado normal. A Tabela 8 apresenta resumidamente esses valores e inclui também a frequência de tempo do reservatório metropolitano.

Figura 22 - Simulação da operação do reservatório equivalente Jaguaribe com os níveis metas 2



Fonte: Elaborado pelo autor

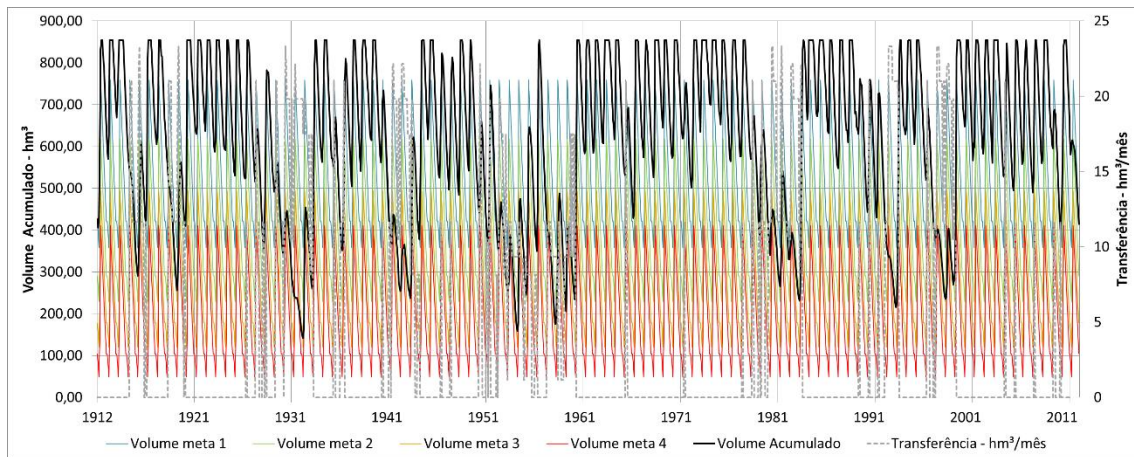
Tabela 8 - Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 2

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	68,40%	17,49%	9,65%	4,37%	0,08%	0,00%
Metropolitano	71,70%	12,95%	10,64%	2,72%	1,98%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

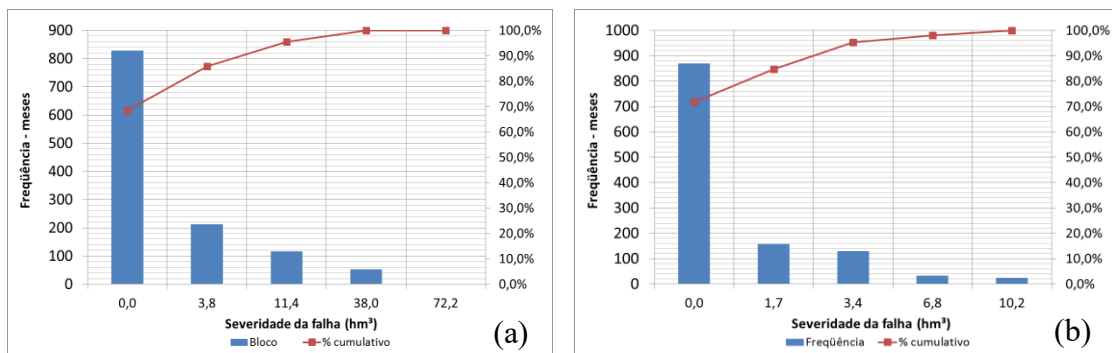
A Figura 24 apresenta o histograma das severidades dessa operação, indicando o déficit de atendimento da demanda. Nela é possível observar que a falha acontece em grande parte nos estados de seca que representam menores severidades. No Metropolitano 13% dos meses tiveram severidade igual a 1,7 hm³ no mês. Em 71,7% não acontece nenhuma falha na demanda. No Jaguaribe, a falha de 3,8 hm³ esteve presente em 18% dos meses simulados. A maior severidade ocorreu neste reservatório, no valor de 72,2 hm³ ocorrendo em menos de 1% do período simulado.

Figura 23 - Simulação da operação do reservatório equivalente Metropolitano com os níveis metas 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 2: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano

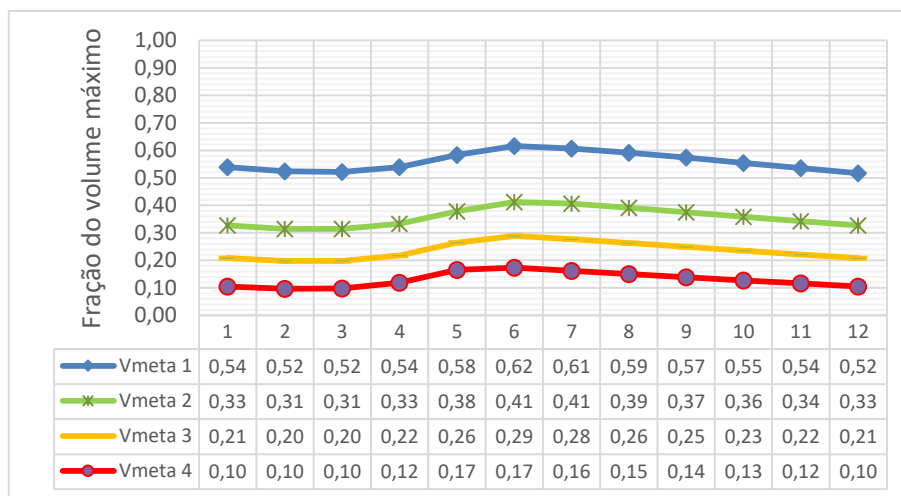


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.3 Níveis Metas 3

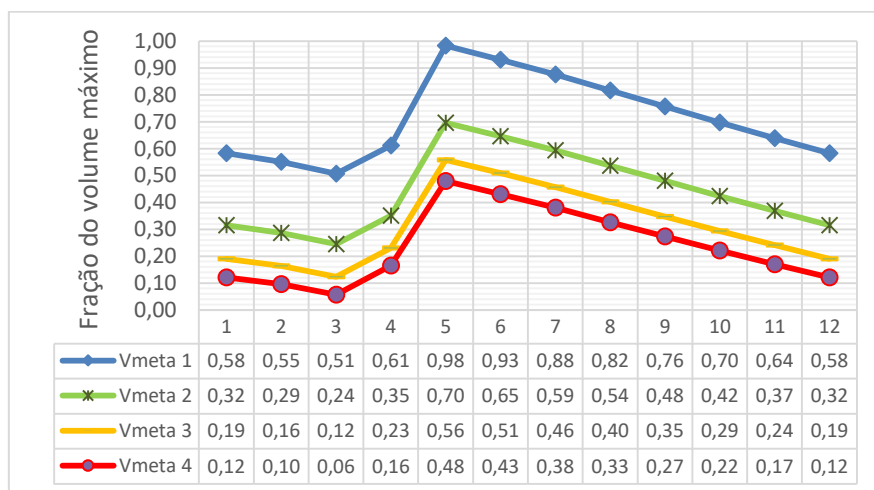
Observou-se os resultados gerados pelas regras de operação Nível Meta 1 e Níveis metas 2 e optou-se por simular uma nova regra de operação, denominada Níveis metas 3. Esta regra diferenciou-se das outras, principalmente, nos valores de transferência feito entre as regiões Jaguaribe e Metropolitana. Os níveis metas estabelecidos são apresentados na Figura 25 e na Figura 26.

Figura 25 – Níveis Metas 3 do reservatório Equivalente Jaguaribe definido a partir da preferência proposta nesta dissertação



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 - Níveis Metas 3 do reservatório Equivalente Metropolitano definido a partir da preferência proposta nesta dissertação

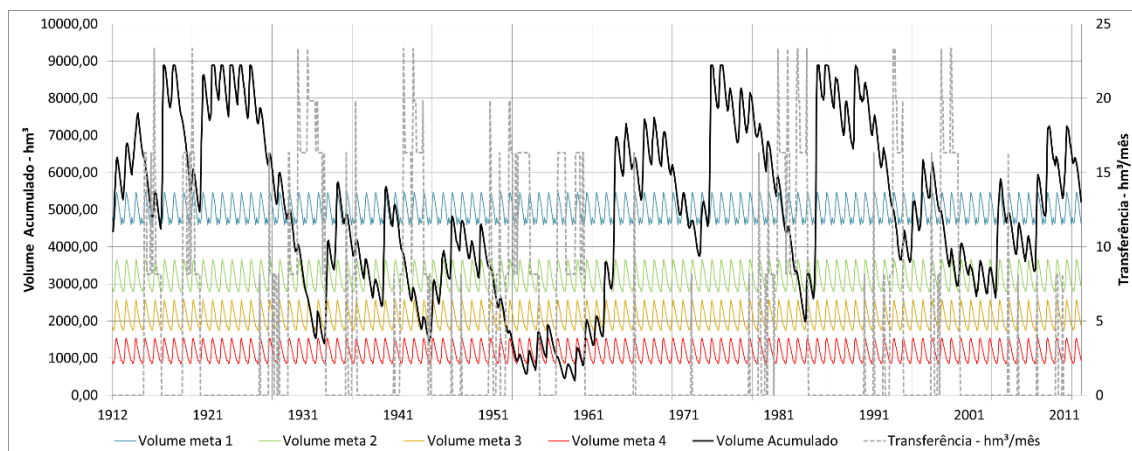


Fonte: Elaborado pelo autor

A operação do sistema equivalente a partir da regra de operação formada com os níveis metas 3 apresentou a evolução mostrada na Figura 27 (Jaguaribe) e na Figura 28 (Metropolitano). O reservatório Jaguaribe apresentou baixa acumulação no ano de 1960, em torno de 600 hm³, estando inserido no estado de Seca Extrema. Neste estado, o reservatório apresentou a frequência de 4,7 % do tempo. No estado de Seca Severa, o reservatório permaneceu por 8,1% do tempo, enquanto que no estado de seca e alerta, 10,81% e 25,66%, respectivamente. O reservatório esteve em 50,7% no estado de normalidade do sistema. A Tabela 9 apresenta resumidamente esses valores e inclui

também a frequência de tempo do reservatório metropolitano. Nesta simulação, o nenhum dos reservatórios do sistema atingiu o colapso.

Figura 27 - Simulação da operação do reservatório equivalente Jaguaribe com os níveis metas 3



Fonte: Elaborado pelo autor

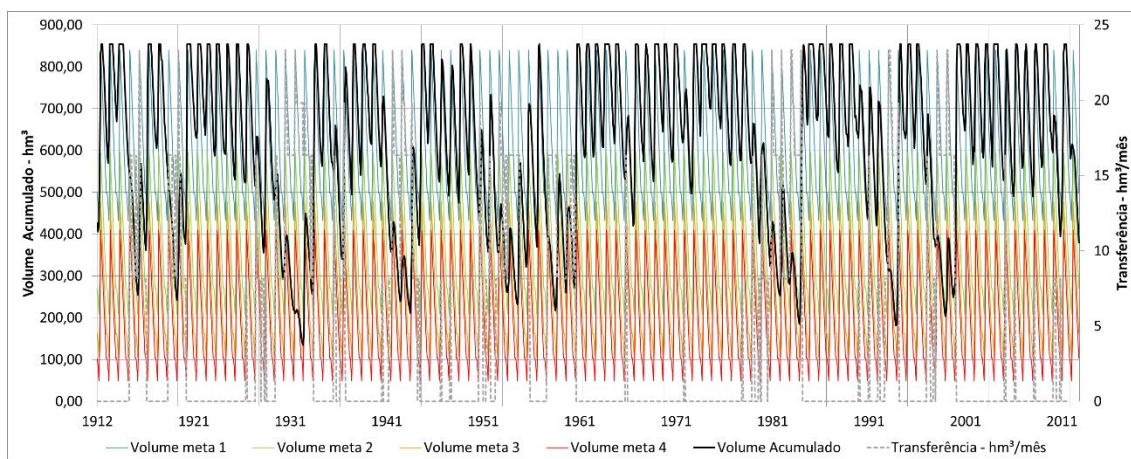
Tabela 9 - Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 3

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	50,74%	25,66%	10,81%	8,09%	4,70%	0,00%
Metropolitano	62,54%	24,17%	9,08%	1,90%	2,31%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

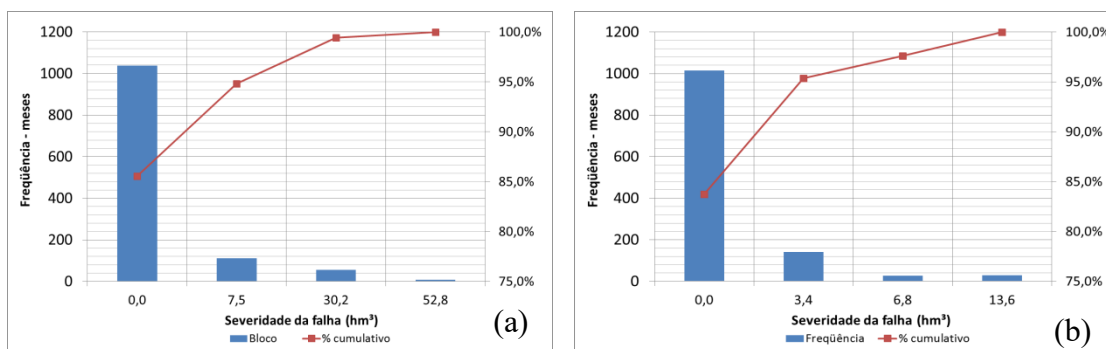
A Figura 29 apresenta o histograma das severidades dessa operação, indicando o déficit de atendimento da demanda. No sistema Jaguaribe é possível observar que a falha acontece em grande parte nos estados de seca que representam menores severidades. A falha de 7,5 hm³ esteve presente em 9,2% dos meses simulados, e a maior severidade neste reservatório, no valor de 52,8 hm³ (70% da demanda de referência) ocorreu em menos de 1% do período simulado. No Metropolitano 11,6% dos meses tiveram falhas que ocasionaram uma severidade de apenas 3,4 hm³ no mês e em 2,5% do tempo deixou de atender 13,6 hm³. Nenhum dos dois sistemas deixaram de atender 100% de suas demandas.

Figura 28 - Simulação da operação do reservatório equivalente Metropolitano com os níveis metas 3



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 3: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Avaliação do impacto da regra em longo prazo

Esta seção irá apresentar a análise do impacto das regras de operações simuladas para o sistema Jaguaribe-Metropolitano com os reservatórios desagregados. Desenvolveu-se uma planilha eletrônica com o auxílio do software Excel[®] para a simulação desse sistema, procurando simulá-lo o mais próximo da realidade atual, visando avaliar os níveis críticos dos reservatórios, bem como as falhas e os riscos associado ao desabastecimento do sistema.

5.3.1 Regra Níveis Metas 1

Inicialmente resolve-se comparar a operação do sistema em suas formas agregada (com reservatórios equivalentes) e desagregada (com o sistema de reservatórios) com o intuito de se verificar se a hipótese simplificadora de tratar os reservatórios como equivalentes diferenciava-se de tratá-los como um sistema desagregado. Na Figura 30 e na Figura 31 é possível observar a posição das curvas Equivalente e Desagregado. Cabe destacar que para os reservatórios desagregados, somou-se o volume acumulado do mês dos reservatórios integrantes de suas respectivas bacias. A operação com o Jaguaribe resultou em uma correlação de 0,96 enquanto a do Metropolitano 0,94, demonstrando a boa aproximação entre as duas curvas. As diferenças desses valores podem ser explicadas, em grande parte, pela diferença do vertimento entre os reservatórios isolados e equivalente: no reservatório equivalente, o vertimento só acontece quando todos os reservatórios isolados vertem. Dessa forma, o reservatório equivalente consegue manter uma maior acumulação em relação aos isolados.

A utilização da simplificação da modelagem do sistema em um reservatório de reservatório equivalente demonstrou, nesta simulação, uma boa aproximação ao sistema desagregado.

Figura 30 - Operação do sistema Jaguaribe com os níveis metas 1 para o sistema equivalente e desagregado

Fonte: Elaborado pelo autor

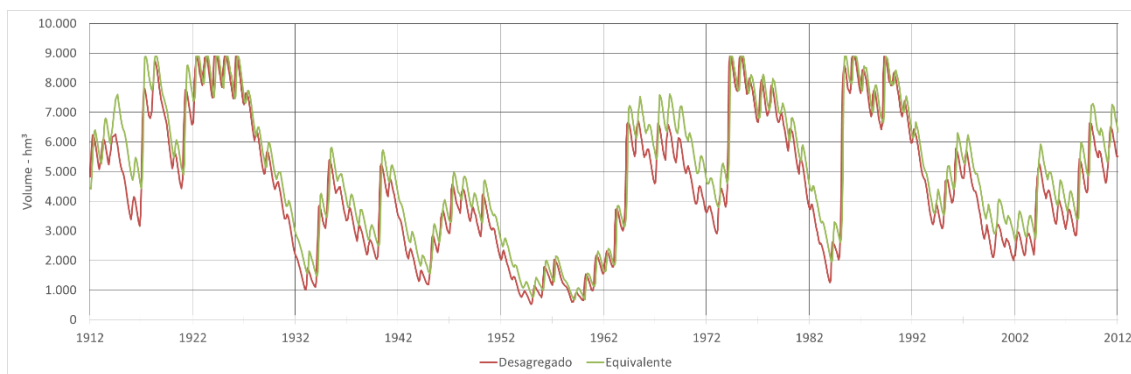
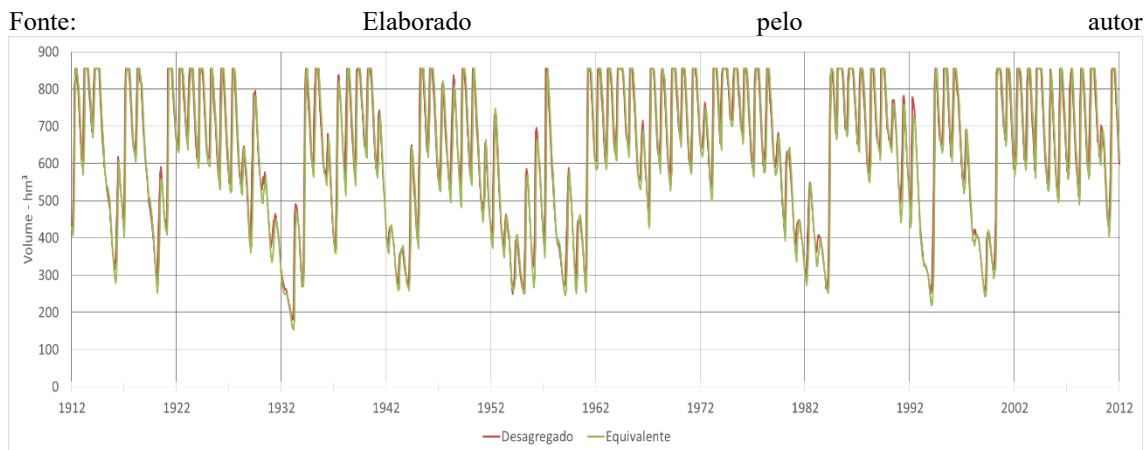


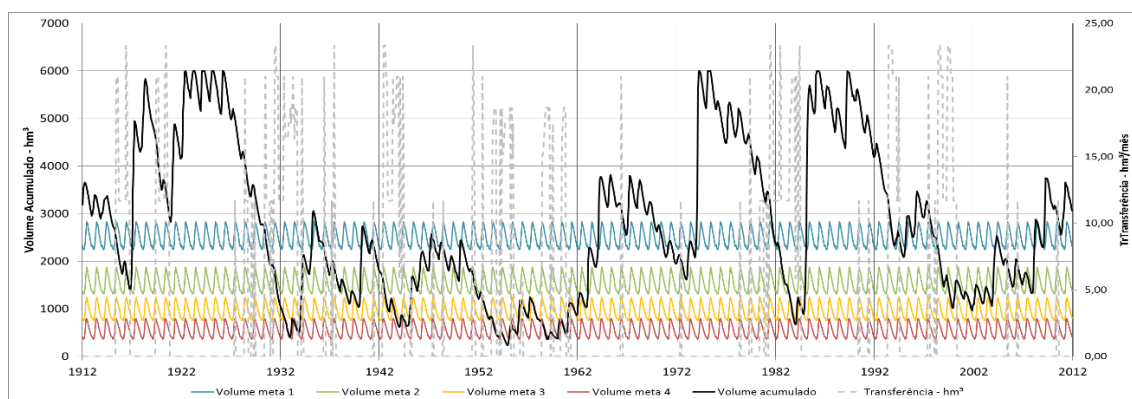
Figura 31 - Operação do sistema Metropolitano com os níveis metas 1 para o sistema equivalente e desagregado



A Figura 32 e a Figura 33 apresentam o resultado da operação com Níveis metas 1 do reservatório Castanhão e Pacoti-Riachão, respectivamente. Decidiu-se por apresentar a acumulação apenas desses dois reservatórios devido as suas importâncias para os sistemas estudados. O reservatório Castanhão é o principal reservatório da bacia do Jaguaribe, pois além de ter a maior capacidade de acumulação é o grande responsável pela transferência de água para a RMF. O reservatório Pacoti-Riachão recebe a maior parte das águas transpostas para a bacia Metropolitana, além de ser o responsável pelo suprimento da maior demanda da região.

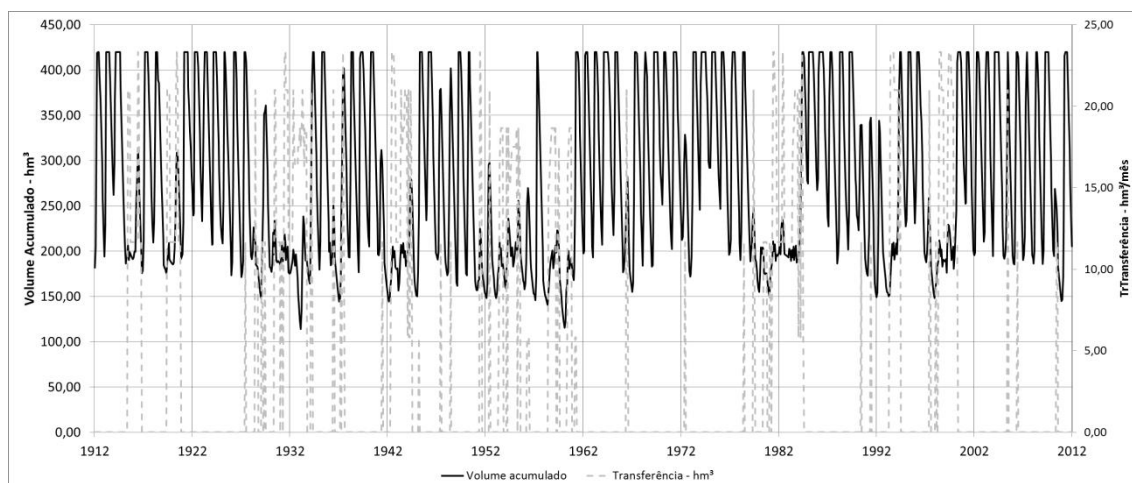
O reservatório Castanhão apresenta os menores volumes acumulados, aproximadamente 235 hm³, no ano de 1954. Este ano está inserida na década que apresentou menor acumulação dos reservatórios (1952 – 1962). No reservatório Pacoti-Riachão é possível observar uma acumulação mínima de 115 hm³ no ano de 1932.

Figura 32 - Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 1.



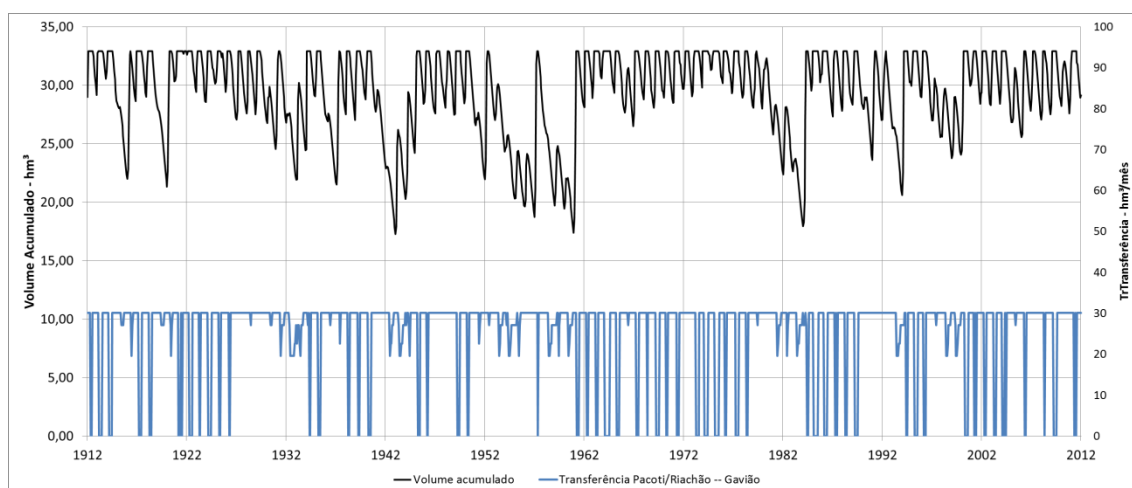
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 - Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 1.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 - Operação do reservatório Gavião para a regra de operação Nível Meta 1.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 10 apresenta a frequência do tempo de permanência em cada nível de seca e a Tabela 11 mostra a falha em cada um desses níveis para todos os reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe e para o sistema Metropolitano. Como a definição do estado de seca dos reservatórios do Metropolitano foi feita com base no somatório dos volumes acumulados no mês de todos os reservatórios, a falha e frequência no nível são as mesmas para todos os reservatórios.

O Castanhão apresentou as maiores falhas de todo o sistema. Nesta operação, observa-se que este reservatório tem algum tipo de falha em 51% do período simulado. Isso significa que em 49% do tempo o reservatório atendeu plenamente a sua demanda exclusiva. Os reservatórios do Metropolitano, no entanto, apresentam, aproximadamente, 88% do tempo em estado de normalidade e alerta, significando o a

atendimento pleno das demandas da região. Um estado de seca mais intenso, apresenta-se em 2,6% do tempo simulado. A severidade de cada um desses níveis pode ser observada nos histogramas apresentados na Figura 35. Todos os reservatórios do sistema apresentaram as maiores falhas de atendimento, em grande parte, nos estados de seca que representam menores severidades.

Tabela 10 - Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Sistema Jaguaribe	60,9%	22,3%	8,9%	6,1%	1,8%	0,0%
Castanhão	49,0%	23,9%	16,1%	7,3%	3,6%	0,0%
Orós	72,7%	11,5%	7,8%	6,7%	1,3%	0,0%
Banabuiú	80,0%	11,7%	5,3%	3,1%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	74,3%	13,9%	7,3%	1,9%	2,6%	0,0%

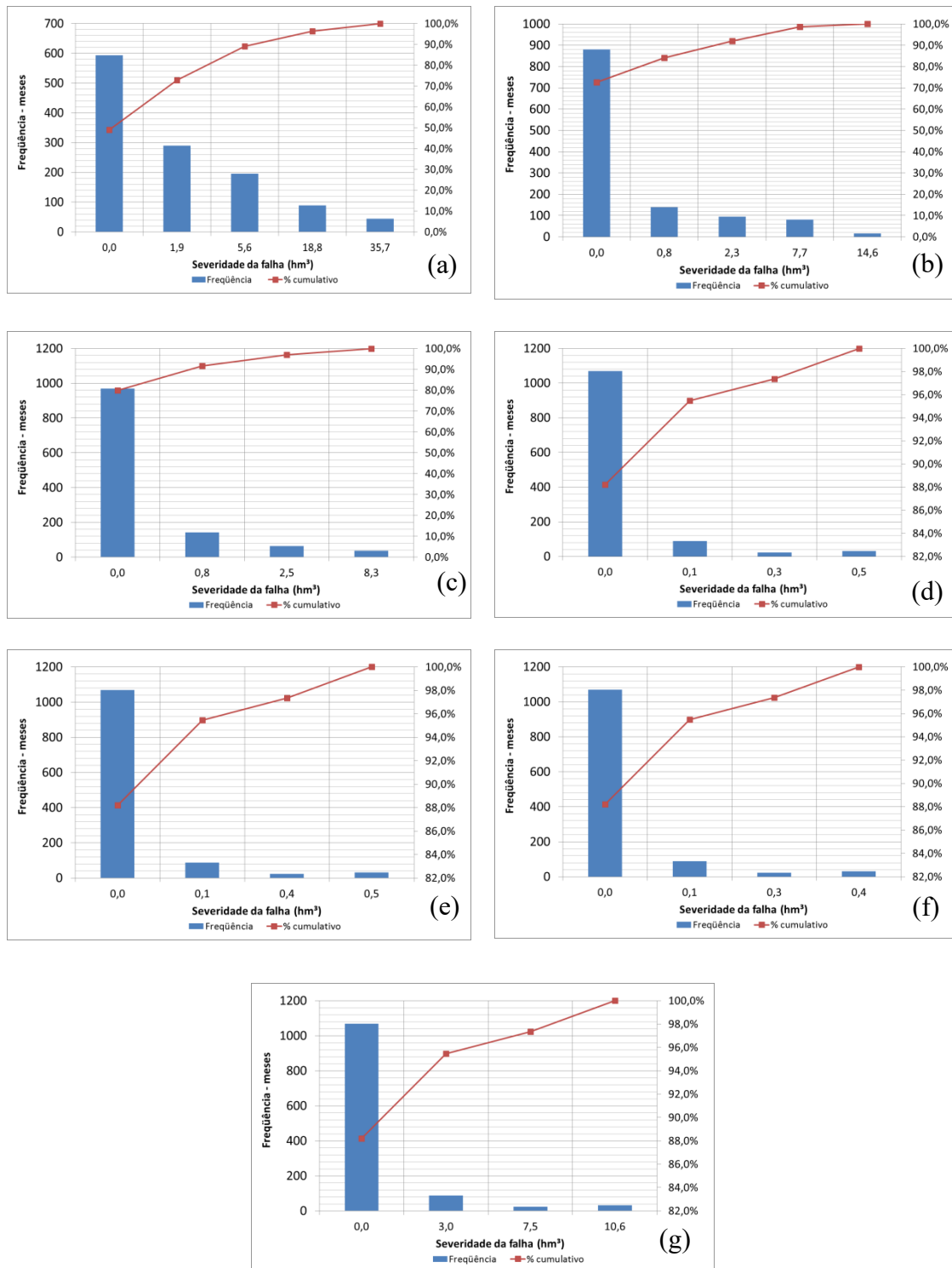
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11 - Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	39,1%	16,8%	7,9%	1,8%	0,0%
Castanhão	51,0%	27,1%	11,0%	3,6%	0,0%
Orós	27,3%	15,8%	8,0%	1,3%	0,0%
Banabuiú	20,0%	8,3%	3,1%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	25,7%	11,8%	4,5%	2,6%	0,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 1 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaíba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.



Fonte: Elaborada pelo autor

A vulnerabilidade mede a severidade das falhas a que o sistema está sujeito, podendo ser expressa como sendo o somatório da severidade de um determinado período de tempo. Esta informação representa a pior falha ocorrida na operação do reservatório. O reservatório Castanhão apresentou um período máximo de 166 meses (maio de 1950 a fevereiro de 1964) em que ocorreu alguma falha no atendimento de sua demanda. Nesse período, o reservatório deixou de atender um valor total de 2545 hm³, resultando em 15,3 hm³/mês (5,9 m³/s) em média. O reservatório Gavião apresentou uma vulnerabilidade máxima de 114,6 hm³ em um período de 17 meses, resultando em 2,6 m³/s de déficit médio no período de maio de 1932 a setembro de 1933. Tabela 12 apresenta a maior vulnerabilidade e o período de tempo em que esta ocorreu para cada um dos reservatórios integrantes do sistema.

Tabela 12 - Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 1.

	Máxima	Período em que ocorreu	Média do período	
	(hm³)	(meses)	(hm³/mês)	(m³/s)
Castanhão	2545,4	166,0	15,3	5,9
Orós	863,8	137,0	6,3	2,4
Banabuiú	469,9	123,0	3,8	1,5
Aracoiaba	5,2	17,0	0,3	0,1
Pacajús	5,7	17,0	0,3	0,1
Pacoti-Riachão	3,9	17,0	0,2	0,1
Gavião	114,6	17,0	6,7	2,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Calculou-se a resiliência dos reservatórios para a regra de operação dada. Esta informação mede o tempo médio que o reservatório demora para retornar a um determinado nível após ir para um nível inferior. O reservatório Gavião demora, em média quatro meses para retomar o atendimento a sua demanda plena a partir de um momento em que a deixou de atender. O tempo que o reservatório Castanhão, em média, precisa para retornar ao seu estado de normalidade é de 44 meses após deixá-lo, e cerca de quatro meses para voltar ao estado de seca Severa após entrar no estado de Seca extrema. A Tabela 13 mostra a resiliência em meses dos reservatórios analisados em cada um dos níveis de seca.

Tabela 13 - Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 4

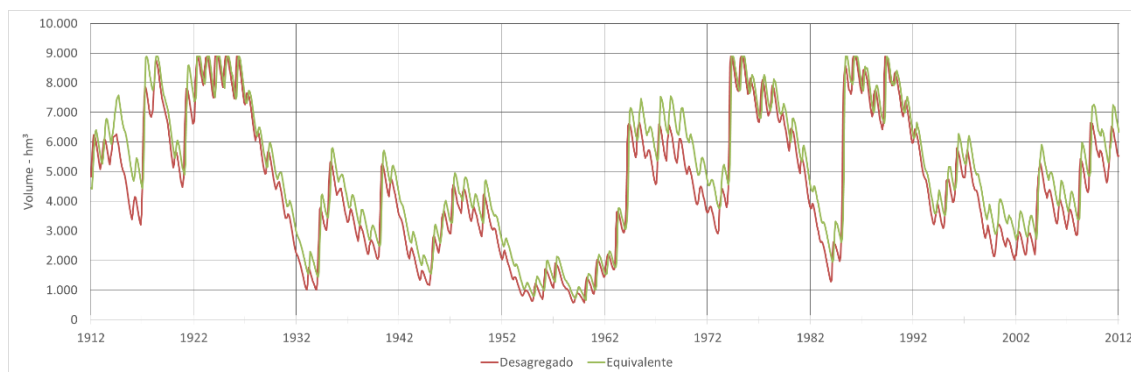
	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	24,9	22,7	12,0	3,7	0,0
Castanhão	44,1	29,8	12,1	3,7	0,0
Orós	33,1	21,3	5,4	2,7	0,0
Banabuiú	17,4	14,4	3,7	0,0	0,0
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	8,0	3,7	2,2	1,5	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.2 Regra Níveis Metas 2

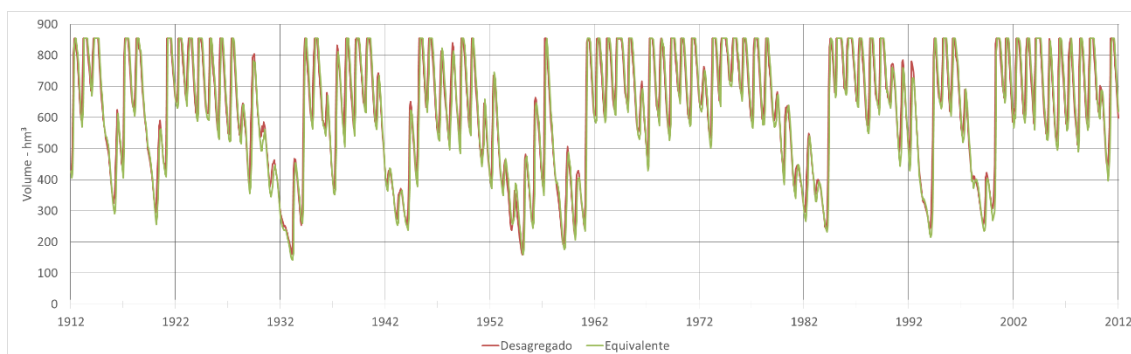
Comparou-se a operação do sistema em suas formas agregada e desagregada para esta regra de operação, com o mesmo intuito de se verificar se a hipótese simplificadora de tratar os reservatórios como equivalentes diferenciava-se de tratá-los como um sistema desagregado. Na Figura 36 e na Figura 37 é possível observar a relação das curvas do sistema operado de forma Equivalente e Desagregado. Para os reservatórios desagregados, somou-se o volume acumulado do mês dos reservatórios integrantes de suas respectivas bacias, resultando no valor para o sistema. A operação com o reservatório Jaguaribe resultou em uma correlação de 0,96 entre as duas curvas, enquanto a do Metropolitano resultou em 0,94, demonstrando a boa aproximação entre as duas curvas. Assim, a utilização da hipótese simplificadora de reservatório equivalente demonstrou uma boa aproximação ao sistema desagregado nesta simulação.

Figura 36 - Operação do sistema Jaguaribe com os níveis metas 2 para o sistema equivalente e desagregado



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 37 - Operação do sistema Metropolitano com os níveis metas 2 para o sistema equivalente e desagregado

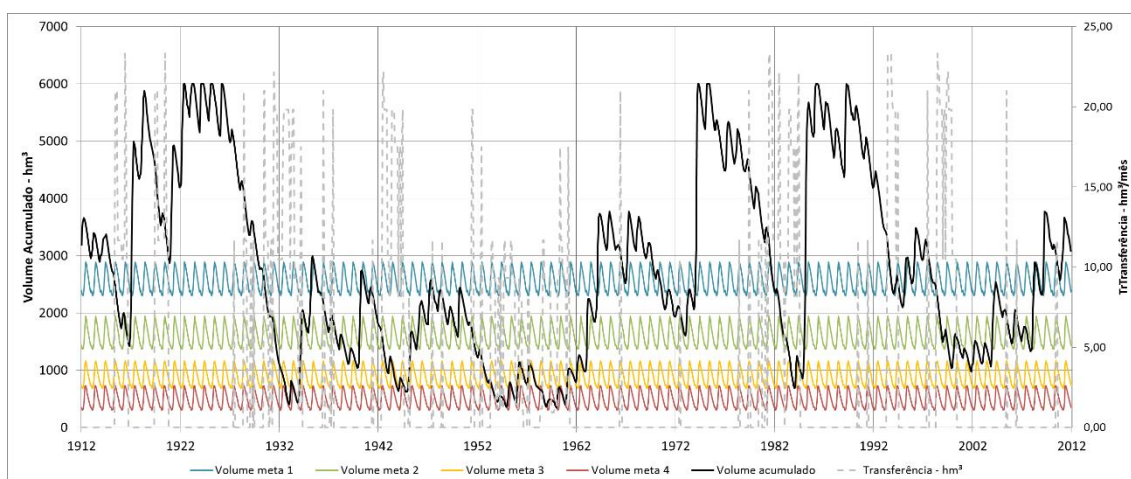


Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado da operação com os Níveis metas 2 do reservatório Castanhão e Pacoti-Riachão podem ser vistos na Figura 38 e na Figura 39, respectivamente. Como dito anteriormente, decidiu-se por apresentar a acumulação apenas desses dois reservatórios devido as suas importâncias para os sistemas estudados.

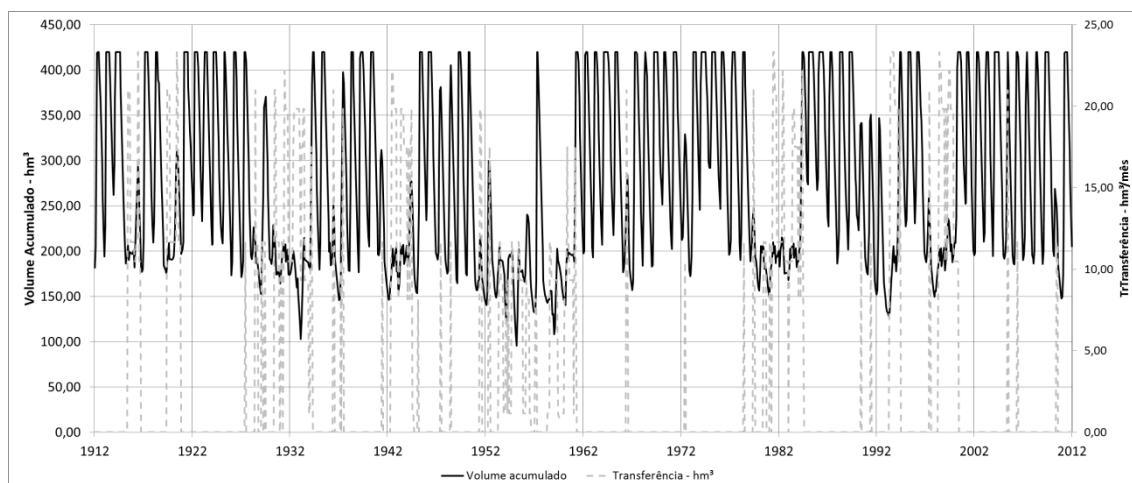
O reservatório Castanhão apresenta, nesta operação, a menor acumulação no em janeiro de 1960, resultando em aproximadamente 340 hm³. O reservatório Pacoti-Riachão manteve-se, em média, com estoques acima de 50% de sua capacidade máxima. O mesmo aconteceu no reservatório Gavião (Figura 40). Nenhum reservatório atingiu o colapso nesta simulação.

Figura 38 - Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 2.



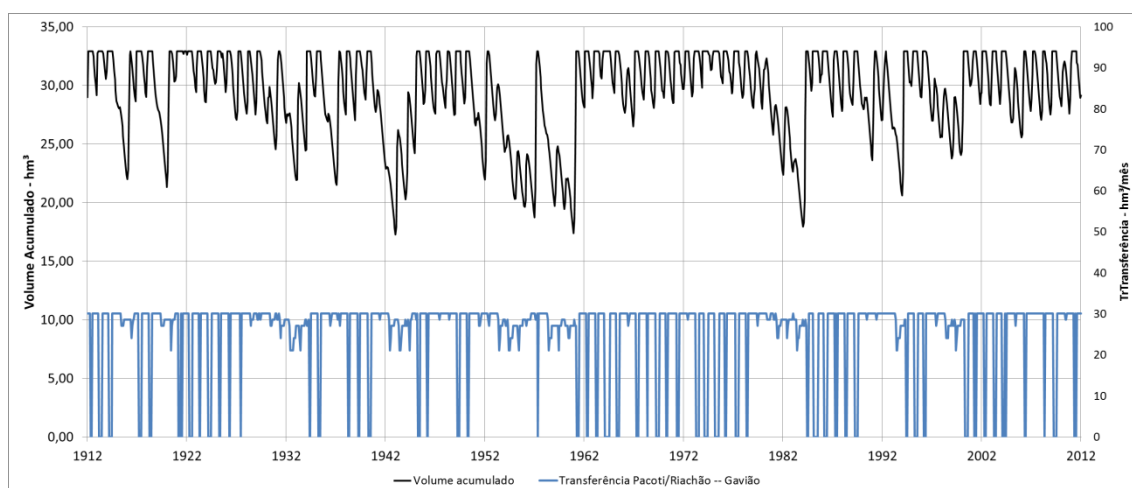
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39 - Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 2.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40 - Operação do reservatório Gavião para a regra de operação Nível Meta 2.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 14 apresenta a frequência do tempo de permanência em cada nível de seca e a Tabela 15 mostra a falha em cada um desses níveis para todos os reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe e para o sistema Metropolitano (a falha e frequência no nível são as mesmas para todos os reservatórios desse sistema).

O Castanhão apresentou as maiores falhas de todo o sistema. Nesta operação, observa-se que este reservatório tem algum tipo de falha em 52% do período simulado, significando que em 48% do tempo o reservatório atendeu plenamente a sua demanda exclusiva. Os reservatórios da RMF, no entanto, apresentam, aproximadamente, 74% do tempo em estado Normal, significando o atendimento pleno

das demandas da região. Um estado de seca mais intenso, apresenta-se em 1,7% do período simulado. A severidade de cada um desses níveis pode ser observada nos histogramas apresentados na Figura 41.

Tabela 14 - Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Sistema Jaguaribe	59,3%	22,9%	10,7%	6,3%	0,7%	0,0%
Castanhão	47,9%	24,2%	17,7%	8,7%	1,5%	0,0%
Orós	72,4%	10,8%	9,1%	6,8%	1,0%	0,0%
Banabuiú	79,4%	10,6%	7,5%	2,5%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	74,5%	11,7%	9,6%	2,5%	1,7%	0,0%

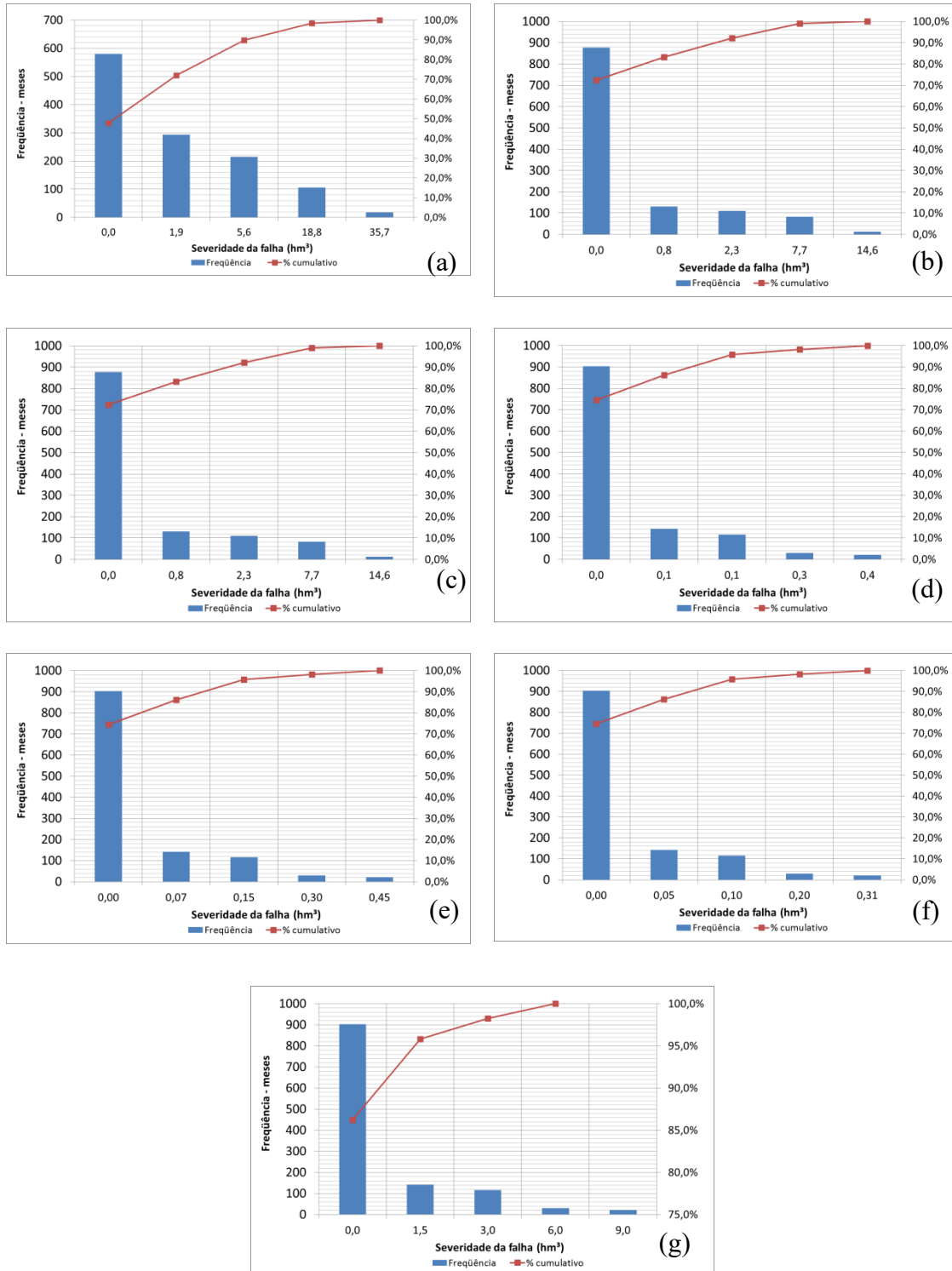
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 - Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	40,7%	17,7%	7,0%	0,7%	0,0%
Castanhão	52,1%	28,0%	10,2%	1,5%	0,0%
Orós	27,6%	16,8%	7,8%	1,0%	0,0%
Banabuiú	20,6%	10,0%	2,5%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	25,5%	13,8%	4,2%	1,7%	0,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 2 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaíba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.



Fonte: Elaborado pelo autor

A pior falha ocorrida na operação do reservatório pode ser medida através da vulnerabilidade do período. Ela é calculada através do somatório das severidades ocorridas no período determinado. O reservatório Castanhão apresentou um período máximo de 166 meses (maio de 1950 a fevereiro de 1964) em que ocorreu alguma falha no atendimento de sua demanda. Nesse período, o reservatório deixou de atender um valor total de 2211 hm³, resultando em 13,3 hm³/mês (5,1 m³/s) em média. O reservatório Gavião apresentou uma vulnerabilidade máxima de 138,7 hm³ em um período de 40 meses, resultando em 3,5 m³/s de déficit médio neste período (maio de 1953 a agosto de 1956). Tabela 16 apresenta a maior vulnerabilidade e o período de tempo em que esta ocorreu para cada um dos reservatórios integrantes do sistema.

Tabela 16 - Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 2.

	Máxima	Período em que ocorreu	Média do período	
	(hm ³)	(meses)	(hm ³ /mês)	(m ³ /s)
Castanhão	2211,1	166,0	13,3	5,1
Orós	867,7	149,0	5,8	2,2
Banabuiú	439,2	123,0	3,6	1,4
Aracoiaba	6,3	40,0	0,2	0,1
Pacajús	6,9	40,0	0,2	0,1
Pacoti-Riachão	4,7	40,0	0,1	0,0
Gavião	138,7	40,0	3,5	1,3

Fonte: Elaborado pelo autor

Calculou-se a resiliência dos reservatórios para a regra de operação dada. Esta informação mede o tempo médio que o reservatório demora para retornar a um determinado nível após ir para um nível inferior. A Tabela 17 mostra a resiliência em meses dos reservatórios analisados em cada um dos níveis de seca. Nela é possível observar que o reservatório Gavião demora, aproximadamente, 8 meses em média para retornar o atendimento a sua demanda plena, quando este deixa em algum momento de atender. O reservatório Castanhão necessita de quase 40 meses para retornar ao estado Normal. Este fica, em média, 3,6 meses no estado de Seca Extrema antes de retornar ao estado de Seca Severa.

Tabela 17 - Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 2

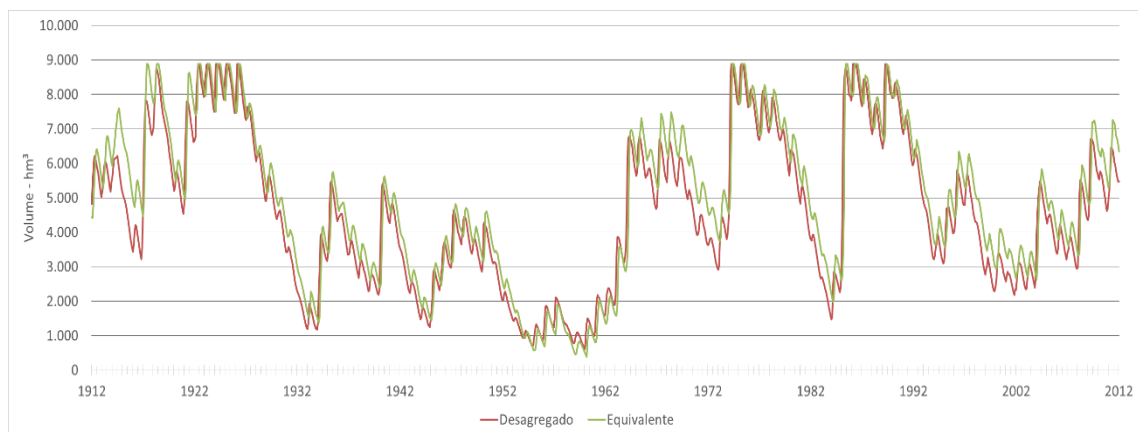
	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	25,9	19,5	12,1	2,3	0,0
Castanhão	39,5	28,3	10,3	3,6	0,0
Orós	33,5	22,7	7,8	2,4	0,0
Banabuiú	17,9	20,2	3,0	0,0	0,0
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	7,7	4,3	2,3	1,3	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.3 Regra Níveis Metas 3

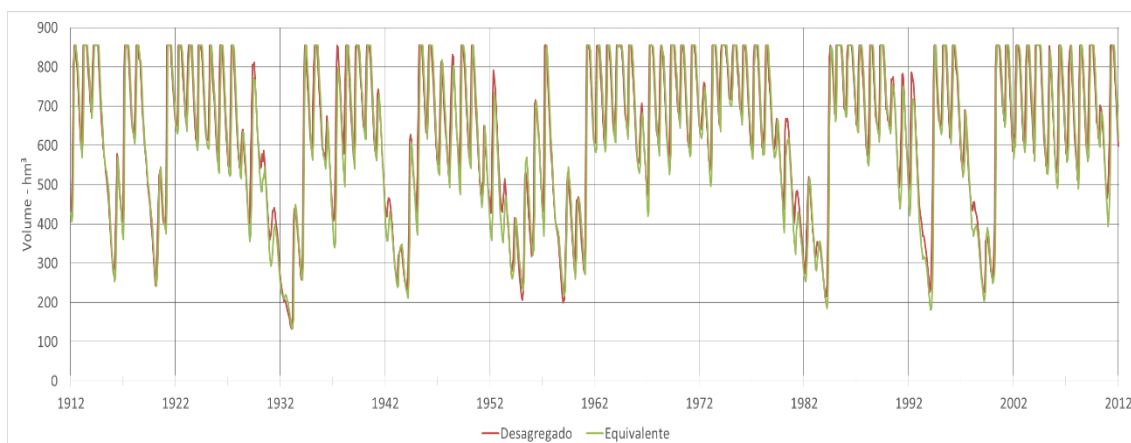
O resultado da operação do sistema em suas formas agregada (com reservatórios equivalentes) e desagregada (com o sistema de reservatórios) foram comparadas como nas regras anteriores. Na Figura 42 e na Figura 43 é possível observar a posição das curvas Equivalente e Desagregado para a regra esta regra de operação. Como dito anteriormente, para os reservatórios desagregados, somou-se o volume acumulado do mês dos reservatórios integrantes de suas respectivas bacias. A operação com o Jaguaribe resultou em uma correlação de 0,96 enquanto a do Metropolitano 0,94, demonstrando a boa aproximação entre as duas curvas. A utilização do reservatório equivalente demonstrou, como nas outras simulações, uma boa aproximação ao sistema desagregado.

Figura 42 - Operação do sistema Jaguaribe com os níveis metas 3 para o sistema equivalente e desagregado



Fonte: Elaborado pelo autor

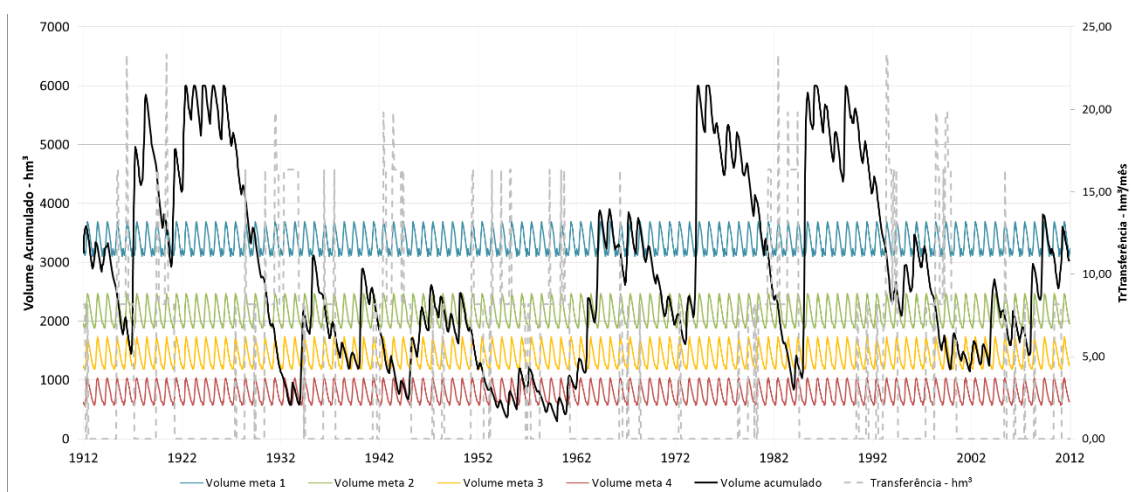
Figura 43 - Operação do sistema Metropolitano com os níveis metas 3 para o sistema equivalente e desagregado



Fonte: Elaborado pelo autor

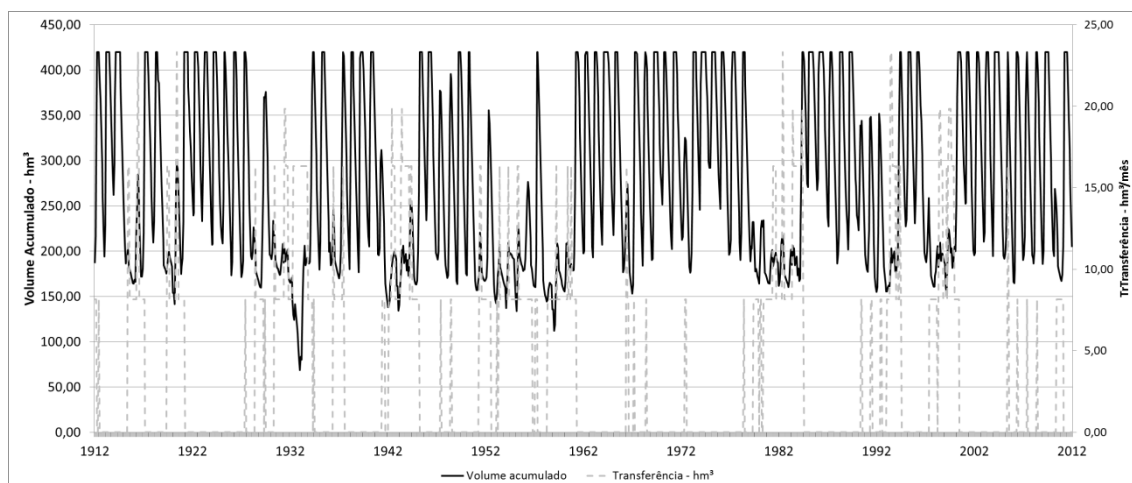
A Figura 44 e a Figura 45 e a Figura 46 apresentam o resultado da operação com Níveis metas 3 do reservatório Castanhão, Pacoti-Riachão e Gavião, respectivamente. O reservatório Castanhão apresenta os menores volumes acumulados, aproximadamente 300 hm^3 , no ano 1960. Este representa o ano de menor acumulação da simulação para este reservatório. Observou-se que 1932 foi o ano com baixa acumulação para o Pacoti-Riachão, restando um com volume de 70 hm^3 neste ano. Nesta simulação, nenhum reservatório atingiu o colapso.

Figura 44 - Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 3.



Fonte: Elaborado pelo autor

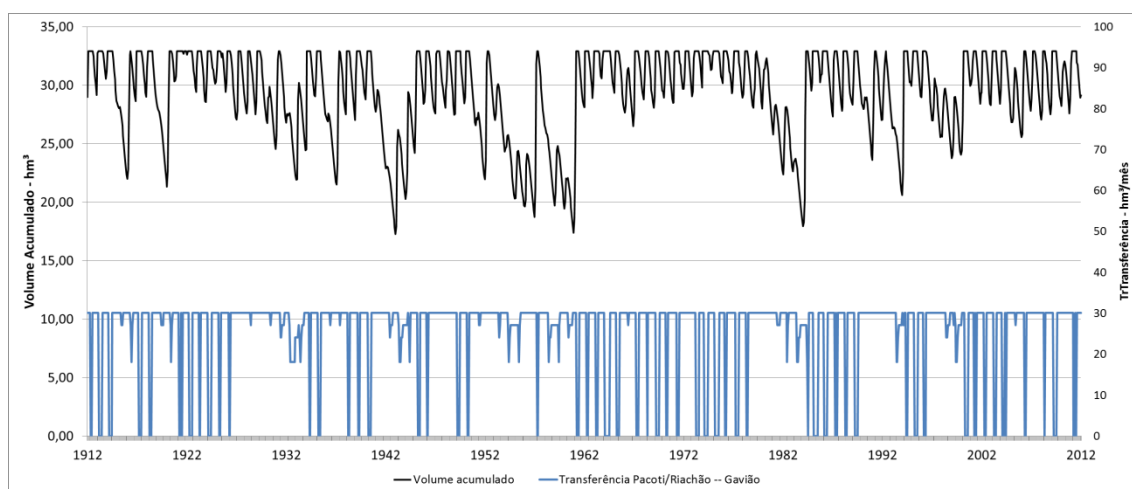
Figura 45 - Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 3.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 18 apresenta a frequência do tempo de permanência em cada nível de seca e a Tabela 19 mostra a falha em cada um desses níveis para todos os reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe e para o sistema Metropolitano (a falha e frequência no nível são as mesmas para todos os reservatórios desse sistema).

Figura 46 - Operação do reservatório Gavião para a regra de operação Nível Meta 3.



Fonte: Elaborado pelo autor

O Castanhão apresentou as maiores falhas de todo o sistema. Nesta operação, observa-se que este reservatório tem algum tipo de falha em 41,4% do período simulado, significando que em 58,6% do tempo o reservatório atendeu plenamente a sua demanda exclusiva. Esse valor é dado pela soma da frequência do tempo do estado normal e alerta, haja vista que na formulação desta regra racionamento acontece somente a partir do estado de Seca. Os reservatórios da RMF, no entanto, apresentam, aproximadamente, 88,6% do tempo em estado Normal e Alerta,

significando o atendimento pleno das demandas da região. Um estado de seca mais intenso, apresenta-se em 2,0% do período simulado nesta bacia.

Tabela 18 - Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Sistema Jaguaribe	42,3%	30,0%	13,2%	10,7%	3,8%	0,0%
Castanhão	31,0%	27,6%	20,2%	14,1%	7,1%	0,0%
Orós	60,5%	17,2%	9,1%	10,1%	3,1%	0,0%
Banabuiú	62,3%	23,6%	8,1%	6,0%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	66,0%	22,6%	7,6%	1,8%	2,0%	0,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

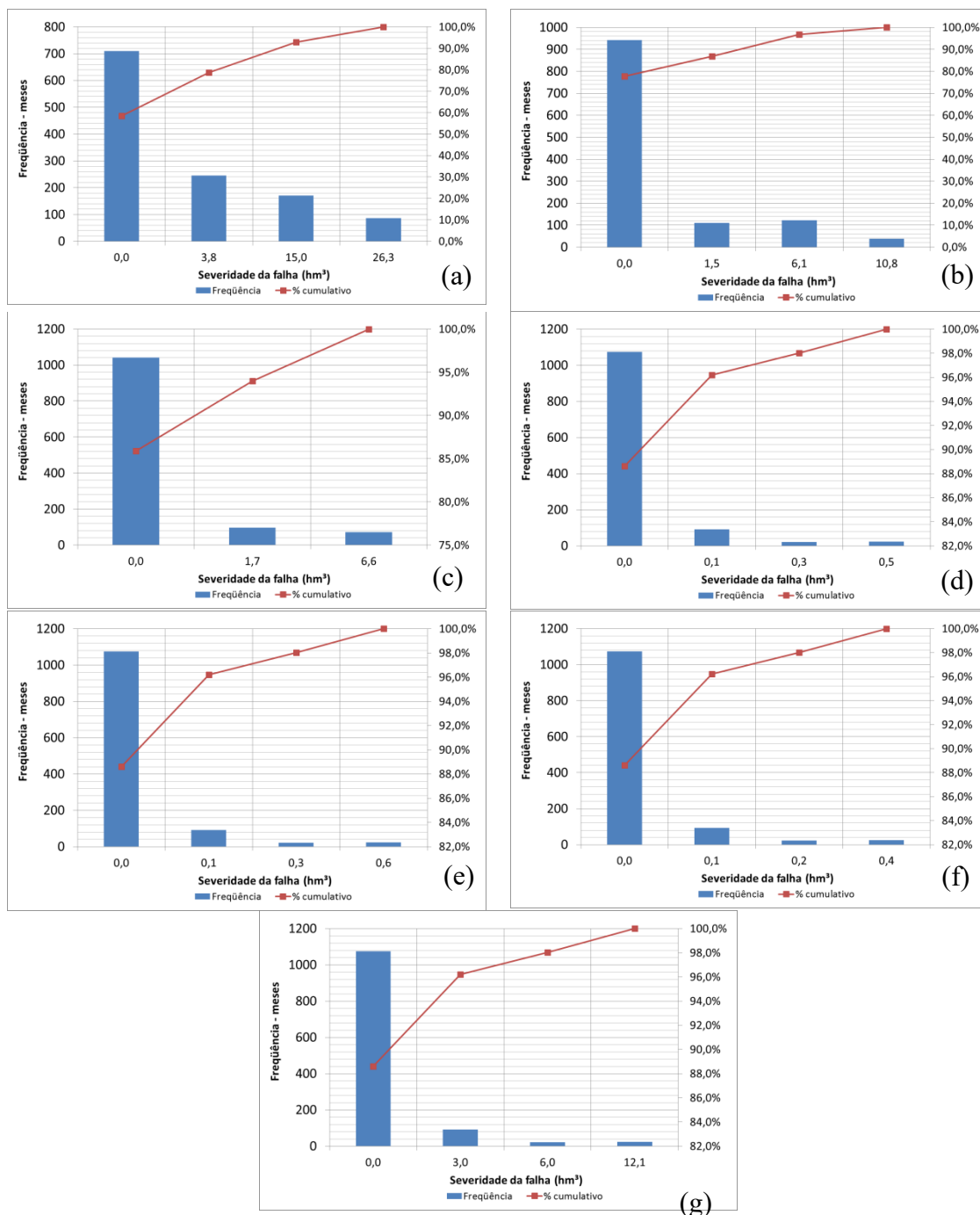
Tabela 19 - Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 1

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	57,7%	27,7%	14,5%	3,8%	0,0%
Castanhão	69,0%	41,4%	21,2%	7,1%	0,0%
Orós	39,5%	22,3%	13,2%	3,1%	0,0%
Banabuiú	37,7%	14,1%	6,0%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	34,0%	11,4%	3,8%	2,0%	0,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

A severidade de cada um desses níveis pode ser observada nos histogramas apresentados na Figura 47. A apresenta os histogramas das severidades para cada reservatório do sistema. A exceção dos reservatórios Orós, todos os outros reservatórios do sistema apresentaram a maior frequência de falhas de atendimento nos estados de seca que representam menores severidades.

Figura 47 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 3 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaíba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.



Fonte: Elaborado pelo autor

A pior falha ocorrida na operação do reservatório pode ser representada pela vulnerabilidade. Esta mede a severidade das falhas a que o sistema está sujeito, podendo ser expressa como sendo o somatório das severidades de um determinado período de tempo. O reservatório Castanhão apresentou um período máximo de 146 meses (julho de 1950 a fevereiro de 1963) em que ocorreu alguma falha no atendimento de sua demanda. Nesse período, o reservatório deixou de atender um valor total de 2769,0 hm³,

resultando em 7,3 m³/s (19,0 hm³/mês) em média de falha. O reservatório Gavião apresentou uma vulnerabilidade máxima de 135,7 hm³ em um período de 18 meses, resultando em 2,9 m³/s de déficit médio neste período (maio de 1932 a outubro de 1933). Tabela 20 apresenta a maior vulnerabilidade e o período de tempo em que esta ocorreu para cada um dos reservatórios integrantes do sistema.

Tabela 20 - Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 3.

	Máxima	Período em que ocorreu	Média do período	
	(hm³)	(meses)	(hm³/mês)	(m³/s)
Castanhão	2769,0	146,0	19,0	7,3
Orós	909,9	130,0	7,0	2,7
Banabuiú	559,6	118,0	4,7	1,8
Aracoiaba	6,2	18,0	0,3	0,1
Pacajús	6,7	18,0	0,4	0,1
Pacoti-Riachão	4,6	18,0	0,3	0,1
Gavião	135,7	18,0	7,5	2,9

Fonte: Elaborado pelo autor

Calculou-se, por fim, a resiliência dos reservatórios para a regra de operação dada. Esta informação mede o tempo médio que o reservatório demora para retornar a um determinado nível após ir para um nível inferior. Os reservatórios do sistema Metropolitano demoram, em média 4,6 meses para retomar o atendimento a sua demanda plena a partir de um momento em que a deixou de atender. O tempo que o reservatório Castanhão, em média, precisa para retornar ao seu estado de normalidade é de 60 meses após deixá-lo, e cerca de 11 meses para voltar ao estado de seca Severa após entrar no estado de Seca extrema. A Tabela 21 mostra a resiliência em meses dos reservatórios analisados em cada um dos níveis de seca.

Tabela 21 - Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 3

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	43,7	33,6	25,1	6,6	0,0
Castanhão	59,7	23,9	18,4	10,8	0,0
Orós	26,6	24,5	17,8	5,4	0,0
Banabuiú	28,6	19,0	18,3	0,0	0,0
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	10,8	4,6	2,2	1,5	0,0

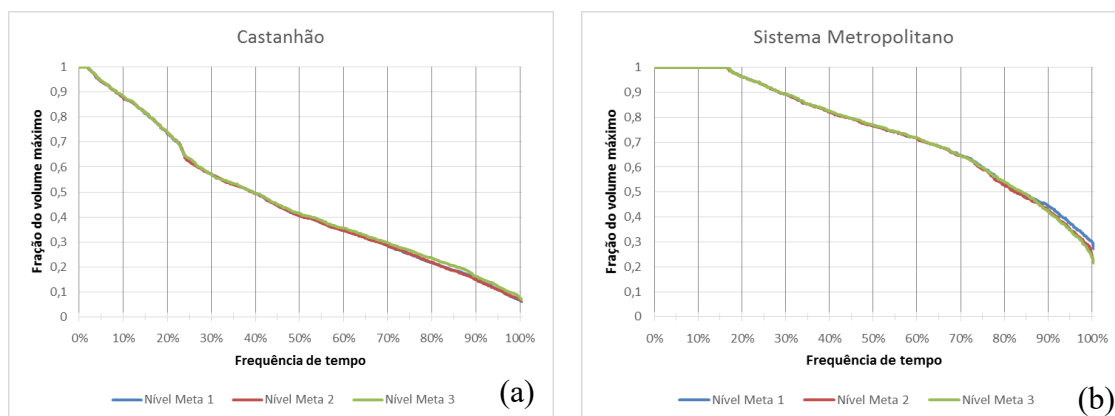
Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.4 Comparação entre regras

Comparou-se as regras de operação Nível Meta 1, Níveis Metas 2 e Níveis Metas 3 com o intuito de observar como as diferenças existentes na construção das regras modificaria o comportamento e a eficiência do sistema Jaguaribe-Metropolitano. A seguir serão apresentadas as análises feitas para o reservatório Castanhão e para o sistema Metropolitano com a observação da acumulação dos reservatórios, da severidade das falhas de atendimento das demandas, e da transferência de água entre os dois sistemas.

A Figura 48 apresenta a curva de permanência da acumulação do reservatório Castanhão e do sistema Metropolitano para as regras de operação 1, 2 e 3. Nela é possível observar que as acumulações dos reservatórios permanecem bastantes próximos em todo o período simulado. No Castanhão, a operação Nível Meta 1 apresentou o menor volume mínimo entre as regras de operações, cerca de 350 hm³, enquanto no sistema Metropolitano, a operação Nível Meta 3 apresentou a menor. 135hm³, aproximadamente.

Figura 48 - Curva de permanência da acumulação dos reservatórios Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b) para as regras de operação Nível Meta 1, 2 e 3.

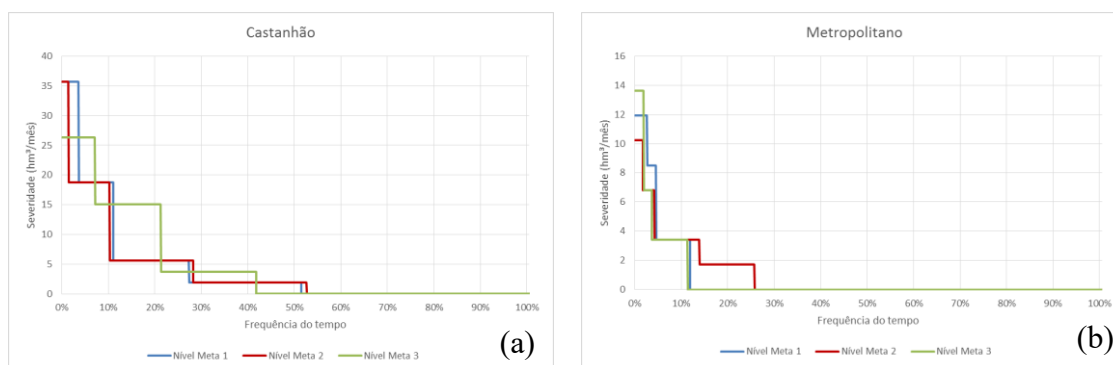


Fonte: Elaborado pelo autor

As severidades das falhas ao longo de todo o tempo simulado podem ser vistas na Figura 49. No reservatório Castanhão, a regra Níveis Metas 3 produz algum tipo de falha no atendimento em 41% do tempo, enquanto as outras regras em torno de 52%. A falha máxima ocorre com a regra Níveis metas 1, produzindo um déficit de 36 hm³ em 4% do período aproximadamente. No sistema Metropolitano, a regra Níveis

Metas 2 produz maior severidade, chegando a 25% do período apresentando algum tipo de falha. As outras duas apresentam tempo de falha similar, aproximadamente 11%, entretanto a regra nível Meta 3 apresentou maior falha máxima dentre as três regras apresentadas.

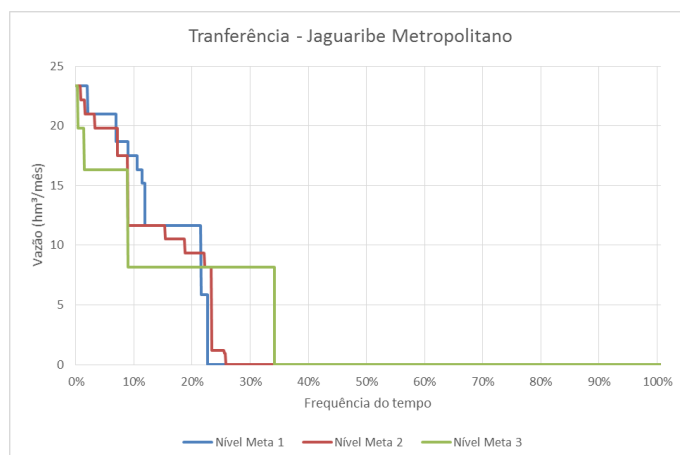
Figura 49 - Curva de permanência da severidade das falhas de atendimento das demandas do reservatório Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b) para as operações Níveis Metas 1,2 e 3.



Fonte: Elaborado pelo autor

As transferências entre os sistemas são mostradas na Figura 50. Nela percebemos que a operação 3 transfere alguma vazão em 34% do tempo, enquanto as regras 1 e 2, em torno de 23%. Percebe-se ainda que, para valores mais altos, as regras 1 e 2 transferem água em mais tempo. A regra de operação Nível Meta 1 transferiu em média 3,47 hm³/mês, enquanto as regras 2 e 3 transferiram 3,44 hm³/mês e 3,56 hm³/mês, respectivamente, entre as duas bacias.

Figura 50 - Curva de permanência das transferências ocorridas entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano para as regras de operação Nível Meta 1,2 e 3.



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Construção de novas regras de operações

Na análise da operação das regras apresentadas anteriormente, percebeu-se dois problemas que poderiam comprometer a implantação destas num sistema real de abastecimento: (i) a imposição de diferentes valores de racionamento em um mesmo ano e, (ii) a transição brusca do estado de seca, com o reservatório partindo de um determinado nível e chegando em outro dois ou três abaixo no mês seguinte.

No Quadro 9 é possível observar os estados de seca mensais dos reservatórios Castanhão e do sistema Metropolitano para a regra de Nível Meta 3, exemplificado os problemas apresentados anteriormente.

No reservatório Metropolitano, no ano de 1954, por exemplo, o sistema de reservatórios encontra-se no estado de Alerta nos meses de janeiro a março. Em abril, o sistema desce para o nível de Seca e no mês seguinte para o estado de Seca Extrema. Em junho do mesmo ano, o nível passa a ser o de Seca Severa e no seguinte Seca novamente. Essa variação dos estados de seca impõe diferentes valores de racionamento durante o ano para os usuários, impossibilitando a implantação na operação real de quaisquer das regras apresentadas.

Diante disso, partiu-se para a incorporação de algumas estratégias operacionais visando a minimização destes problemas. Os resultados são apresentados nas sessões seguinte.

Quadro 9 - Estados de seca mensais dos reservatórios Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b) para a regra de Nível Meta 3.

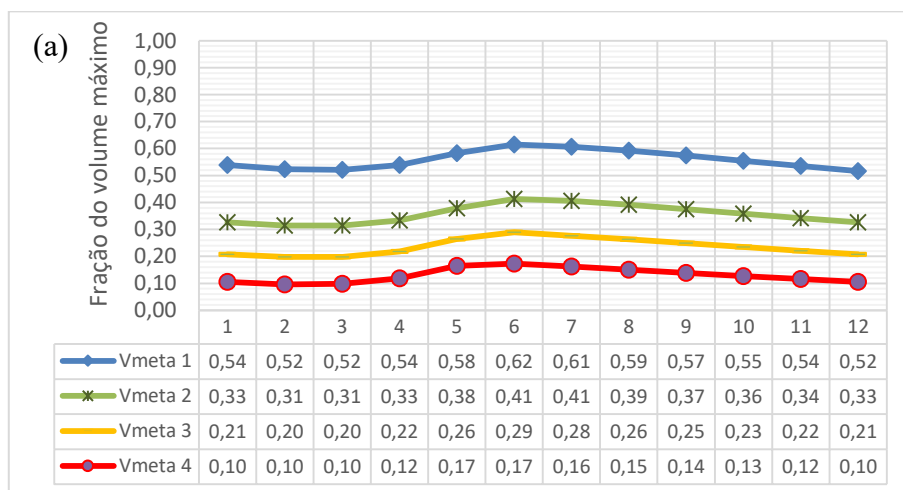
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
(a) 1912	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
1913	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1914	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2
1915	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
1916	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3
1917	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1918	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1919	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1920	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
1921	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1922	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1923	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1924	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1925	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1926	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1927	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1928	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1929	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
1930	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1931	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4
1932	4	4	4	4	4	5	5	5	4	5	5	5
1933	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
1934	5	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1935	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1936	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
1937	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1938	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
1939	4	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
1940	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1941	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2
1942	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
1943	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
1944	4	4	4	4	5	5	5	5	4	4	4	4
1945	4	4	4	4	3	4	3	3	3	3	3	3
1946	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3
1947	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1948	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
1949	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
1950	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	2
1951	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1952	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1953	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
1954	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1955	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
1956	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1957	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1958	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
1959	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1960	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1961	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1962	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1963	4	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2
1964	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1965	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1966	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
1967	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1968	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1
1969	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1970	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1971	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2
1972	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
1973	3	3	3	2	2	3	3	2	2	2	2	2
1974	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1975	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1976	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1977	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1978	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1979	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1980	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1981	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
1982	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
1983	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
1984	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
1985	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1986	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1987	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1988	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1989	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1990	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1991	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1992	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1993	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
1994	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1995	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1996	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1997	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1998	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
1999	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
2000	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2001	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
2002	3	3	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3
2003	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
2004	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2005	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
2006	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3
2007	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2008	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2009	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
2010	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2011	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
2012	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Legenda: 1 Normal 2 Alerta 3 Seca 4 Seca Severa 5 Seca Extrema

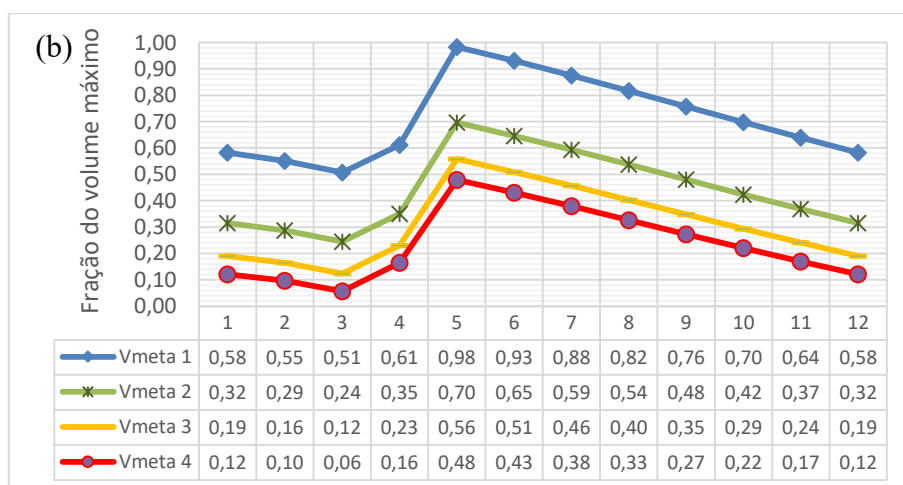
5.4.1 Regra Níveis Metas 4

Esta regra incorporou à regra Nível Meta 3 o momento da tomada de decisão sobre o racionamento e a transferência entre os sistemas. Assim, utilizou os mesmo valores propostos no Quadro 8 e definiu-se que o momento da tomada de decisão sobre o racionamento acontecerá duas vezes ao ano, ao fim de abril e de julho. O momento da transferência mensal entre as bacias será definido mensalmente, da mesma forma como em Nível Meta 3. A Figura 51 apresenta, respectivamente, as curvas guias para os reservatórios Jaguaribe e Metropolitano, resultante dessa regra de operação.

Figura 51 - Níveis metas 4 dos reservatórios Equivalentes Jaguaribe e Metropolitano definido a partir das mesmas preferências de Níveis Metas 3, incorporando o momento da tomada de decisão sobre a restrição dos usos nos meses de abril e julho.



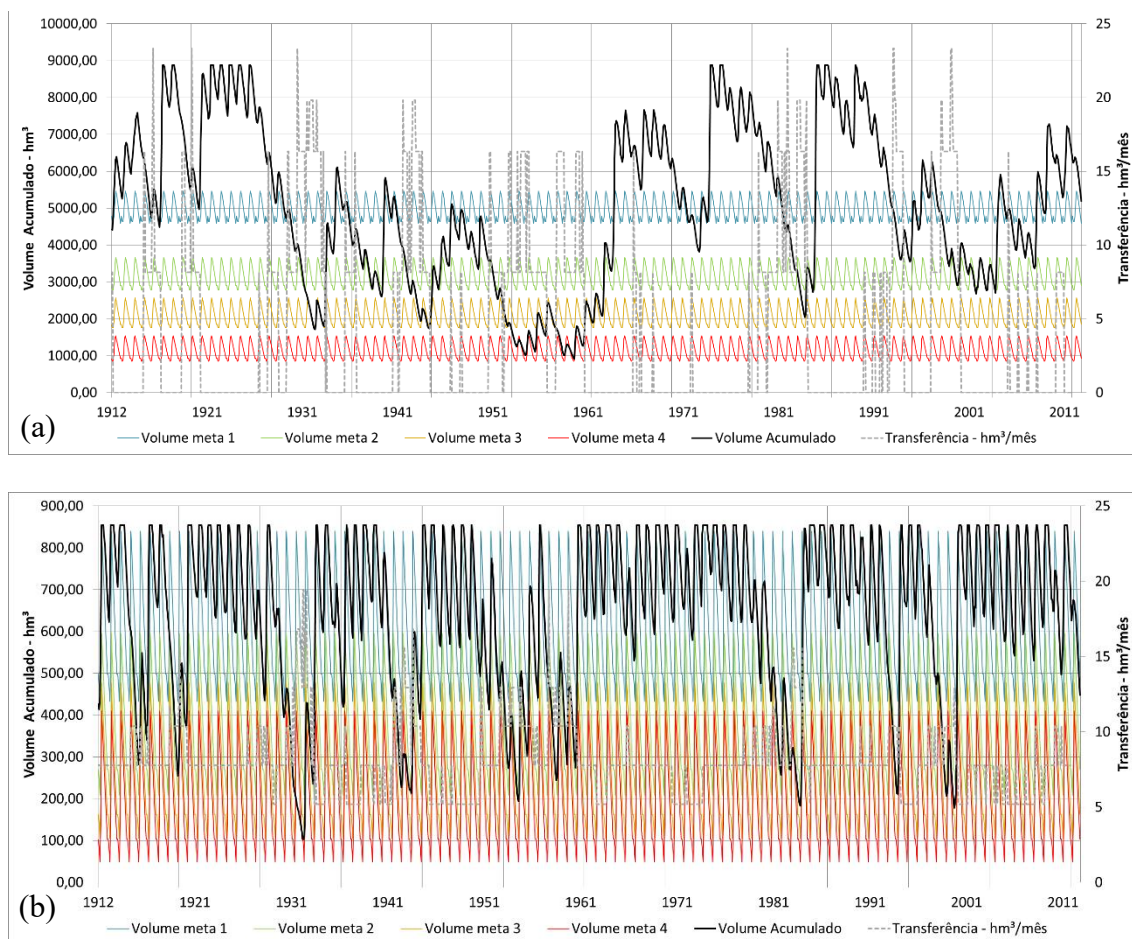
Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborada pelo autor

A regra de operação formada com os níveis metas 4 proporcionou a evolução da acumulação do sistema Jaguaribe e Metropolitano mostrada na Figura 52 (a e b). O reservatório Jaguaribe apresentou o volume mínimo acumulado de, aproximadamente, 920 hm³ em março de 1960, estando inserido no estado de Seca Extrema. O reservatório apresentou neste estado frequência de 1,5%. No estado de Seca Severa, permaneceu por 9,65% do tempo, enquanto que no estado de seca e alerta, 9,41% e 27,72%, respectivamente. O reservatório esteve em 51,7% no estado normal do sistema. A Tabela 22 apresenta resumidamente esses valores e inclui também a frequência de tempo do reservatório metropolitano. Nesta simulação, o reservatório metropolitano atinge um valor mínimo de 100 hm³, no ano de 1932.

Figura 52 - Simulação da operação dos reservatórios equivalente Jaguaribe e Metropolitano com os níveis Metas 4



Fonte: Elaborada pelo autor

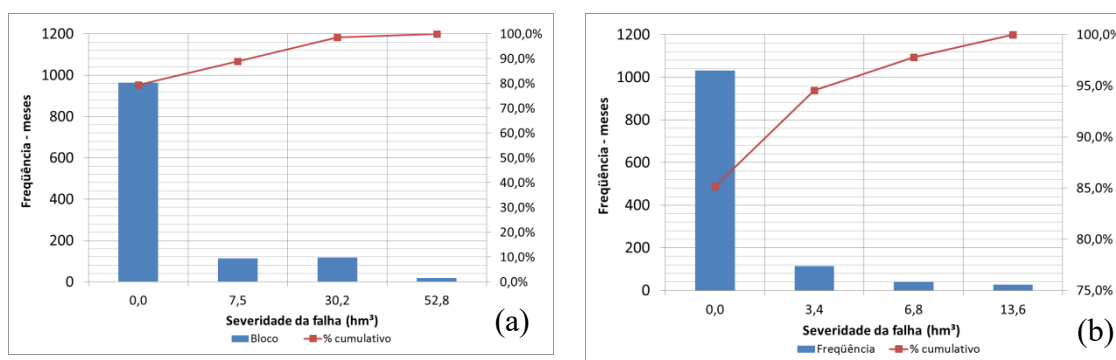
Tabela 22 - Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 4

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	51,73%	27,72%	9,41%	9,65%	1,49%	0,00%
Metropolitano	65,35%	19,80%	9,41%	3,22%	2,23%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

O histograma das severidades desta operação é apresentado na Figura 53 e indicando o déficit de atendimento da demanda. Nesta figura observa-se que a falha acontece, em grande parte, nos estados de seca que representam as menores severidades. No Metropolitano, 85% dos meses simulados não apresentaram nenhuma falha. Em 9,5% do tempo, a severidade da falha foi de 3,4 hm³. As maiores falhas deste reservatório, 13,6 hm³, ocorreram em 2% do período simulado. No Jaguaribe, a falha de 7,5 hm³ esteve presente em 9,5% dos meses simulados. A maior severidade ocorreu neste reservatório, no valor de 52,8 hm³ em 1,5% do período. Em 80% do tempo não ocorreu nenhuma falha no atendimento da demanda do Jaguaribe.

Figura 53 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 4: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano



Fonte: Elaborado pelo autor

Para melhor avaliar o impacto da regra desta operação, simulou-se o sistema Jaguaribe-Metropolitano com seus reservatórios desagregados, como feito anteriormente. As regras de transferência entre os reservatórios dentro da mesma bacia foram feitas, também, como mostrada no Quadro 4. A transferência entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano ocorreu baseado na matriz de trade-off de transferências hídrica, respeitando os valores propostos neste cenário e definidos mensalmente. Além disso, para a bacia do Jaguaribe, tomou-se como os níveis metas para cada reservatório isolado o mesmo definido para o reservatório equivalente. Na bacia Metropolitana, os

estados de seca foram definidos como na simulação agregada, ou seja, pelo somatório dos volumes acumulados em cada um dos reservatórios integrantes dessa bacia. Por fim, a tomada de decisão para racionamento dos reservatórios foi feita duas vezes no ano, ao fim de abril e julho, com o intuito de impedir a imposição de vários estados de secas ao longo de um ano.

Na Figura 54 é possível observar a posição das curvas do sistema simulado de forma Equivalente e simulado de forma Desagregado. Cabe destacar que para os reservatórios desagregados, somou-se o volume acumulado do mês dos reservatórios integrantes de suas respectivas bacias. A observação das figuras demonstra uma boa aproximação entre os dois tipos de simulação.

Figura 54 - Operação do sistema Jaguaribe (a) e Metropolitano (b) com os níveis metas 4 para o sistema equivalente e desagregado

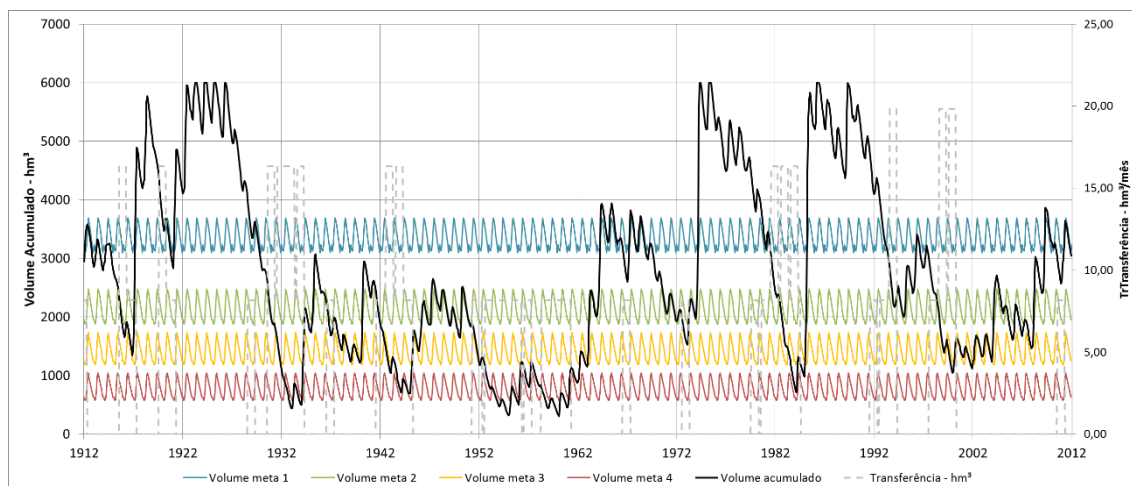


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 55 apresenta o resultado da operação com Níveis metas 4 do reservatório Castanhão. Este reservatório apresenta os menores volumes acumulados, aproximadamente 300 hm³, nos anos de 1954 e 1960. Esses anos estão inseridos numa década (1952 a 1962) em que o reservatório apresenta os menores estoques da simulação. No reservatório Pacoti-Riachão, é possível observar que sua acumulação se mantém em

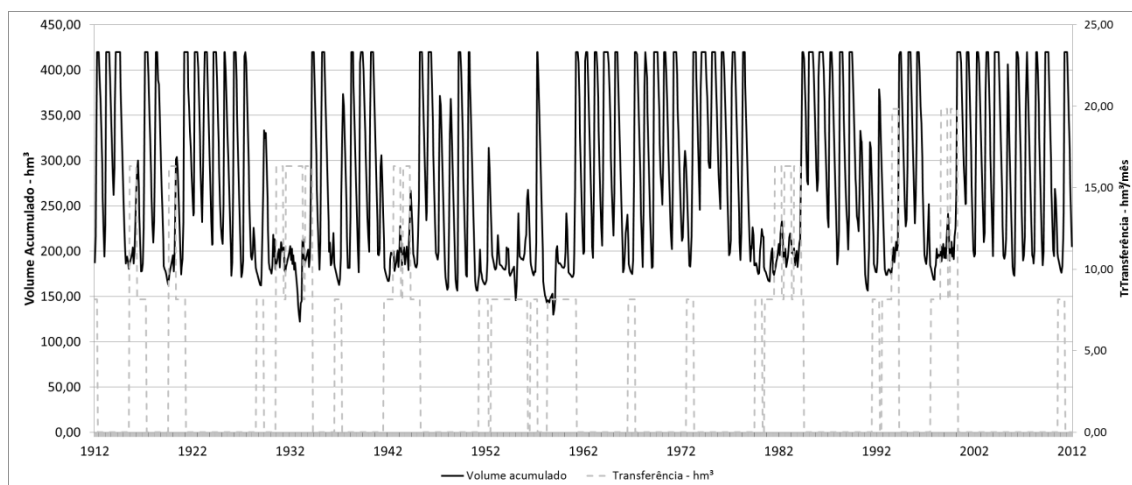
torno de 50% do seu volume máximo, garantindo a estocagem de uma boa quantidade de água na RMF. Não se observa colapso em nenhum dos reservatórios da RMF. Além disso, esta operação possibilitou a transferência média de 3,6 hm³/mês entre os dois sistemas.

Figura 55 - Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 4



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 56 - Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 4



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 23 apresenta a frequência do tempo de permanência em cada nível de seca e a Tabela 24 mostra a falha em cada um desses níveis para todos os reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe e para o sistema Metropolitano. Como a definição do estado de seca dos reservatórios do Metropolitano foi feita com base no somatório dos volumes acumulados no mês de todos os reservatórios, a falha e frequência no nível são as mesmas para todos os reservatórios.

O Castanhão apresentou as maiores falhas de todo o sistema. Nesta operação, a imposição de racionamento acontece apenas a partir do estado de Seca (acionamento em Alerta é zero). Diante disso, observa-se que este reservatório tem algum tipo de falha em 41% do período simulado. Isso significa que em 59% do tempo o reservatório atendeu plenamente a sua demanda exclusiva. Os reservatórios do Metropolitano, no entanto, apresentam, aproximadamente, 85% do tempo em estado de normalidade e alerta, significando o atendimento pleno das demandas da região. Um estado de seca mais intenso, apresenta-se em menos de 1% do tempo simulado. A severidade de cada um desses níveis pode ser observada nos histogramas apresentados na Figura 57. Todos os reservatórios do sistema apresentaram as maiores falhas de atendimento, em grande parte, nos estados de seca que representam menores severidades.

Tabela 23 - Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 4

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Sistema Jaguaribe	43,6%	30,0%	12,4%	9,2%	5,0%	0,0%
Castanhão	30,9%	28,0%	18,8%	14,4%	7,9%	0,0%
Orós	62,6%	16,1%	9,2%	8,4%	3,7%	0,0%
Banabuiú	64,1%	22,5%	7,2%	6,2%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	66,3%	18,6%	9,2%	5,2%	0,7%	0,0%

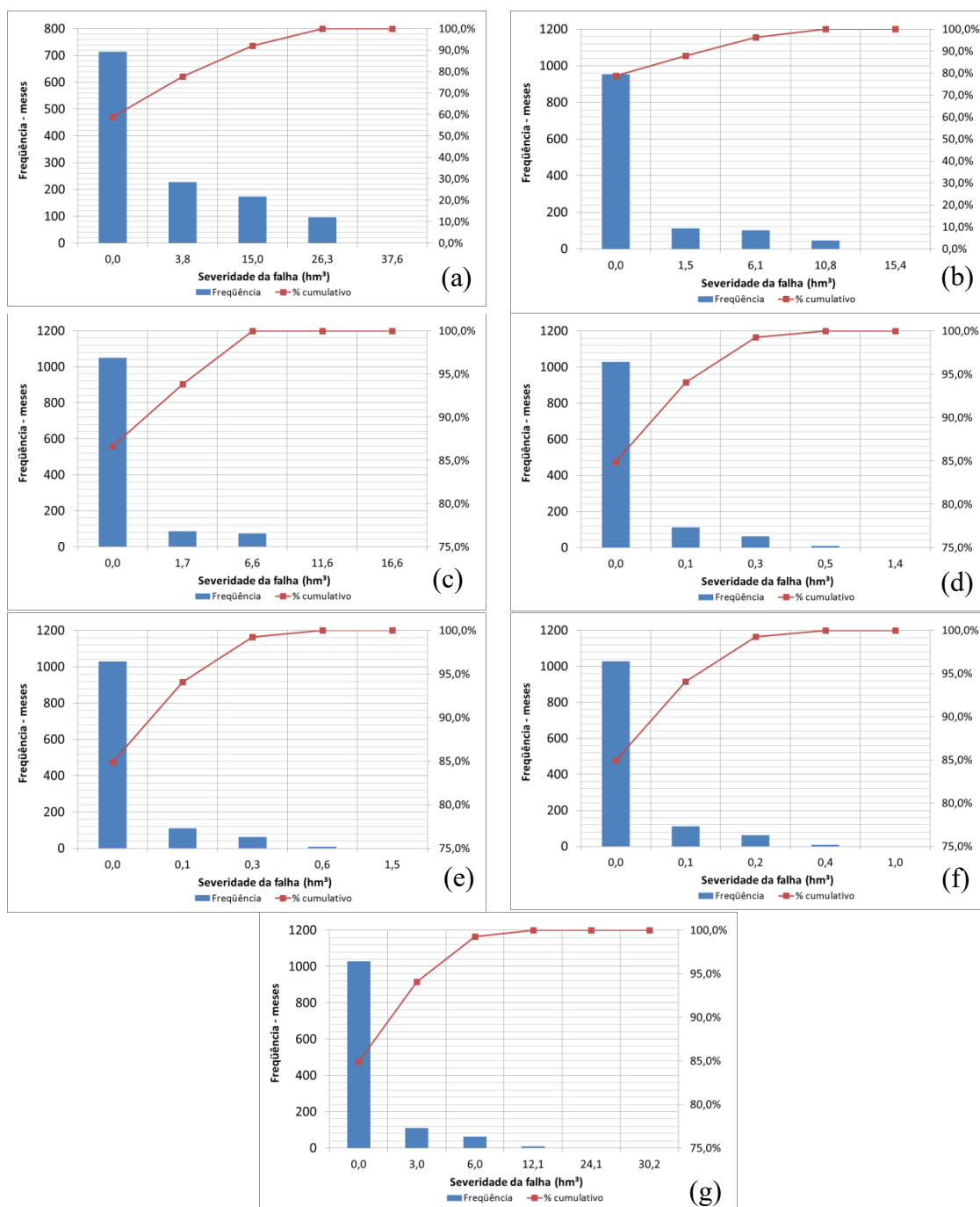
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 24 - Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 4

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	56,4%	26,5%	14,1%	5,0%	0,0%
Castanhão	69,1%	41,1%	22,3%	7,9%	0,0%
Orós	37,4%	21,3%	12,1%	3,7%	0,0%
Banabuiú	35,9%	13,4%	6,2%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	33,7%	15,1%	5,9%	0,7%	0,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 57 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 4 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaiba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.



Fonte: Elaborado pelo autor

O somatório das severidades do reservatório em um período de tempo é representado pela vulnerabilidade. Esta medida representa a pior falha ocorrida na operação do reservatório. O reservatório Castanhão apresentou um período máximo de 144 meses (abril de 1951 a março de 1963) em que ocorreu alguma falha no

atendimento de sua demanda. Nesse período, o reservatório deixou de atender um valor total de 2773 hm³, resultando em 19,3 hm³/mês (7,9 m³/s) em média. O reservatório Gavião apresentou uma vulnerabilidade máxima de 145 hm³ em um período de 21 meses, resultando em 2,7 m³/s de déficit médio neste período (julho de 1931 a março de 1933). Na Tabela 25 pode ser visto os valores referentes as maiores vulnerabilidades e o período de tempo em que estas ocorreram para cada um dos reservatórios integrantes do sistema.

Tabela 25 - Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 4

	Máxima	Período em que ocorreu	Média do período	
	(hm³)	(meses)	(hm³/mês)	(m³/s)
Castanhão	2772,7	144,0	19,3	7,4
Orós	917,6	129,0	7,1	2,7
Banabuiú	572,9	120,0	4,8	1,8
Aracoiaba	6,6	21,0	0,3	0,1
Pacajús	7,2	21,0	0,3	0,1
Pacoti-Riachão	4,9	21,0	0,2	0,1
Gavião	144,7	21,0	6,9	2,7

Fonte: Elaborado pelo autor

A resiliência dos reservatórios para a regra de operação dada é mostrada na Tabela 26. Nela é possível observar que os reservatórios da RMF demoram, em média, 22 meses para retornar ao estado Normal, depois de ir para um nível inferior. Além disso, observa-se que esses reservatórios demoram cinco meses para retornar ao estado seca severa, após ir para o estado de seca extrema. O reservatório Castanhão permanece, em média, 19 meses no estado de Seca Extrema antes de retornar ao estado de Seca Severa. Quando este sai do estado Normal, demora, em média, 105 meses para retornar para ele.

Tabela 26 - Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 4

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	68,4	35,7	24,4	12,0	0,0
Castanhão	104,6	38,3	24,5	19,2	0,0
Orós	37,8	36,9	29,4	15,0	0,0
Banabuiú	54,4	27,0	25,0	0,0	0,0
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	21,5	9,2	8,0	4,5	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor

As mudanças dos estados de secas para a imposição dos racionamentos do reservatório Castanhão e do sistema Metropolitano podem ser vistos na matriz de transição de níveis apresentados na Tabela 27 e na Tabela 28. Nestas tabelas são imediatas as observações das quantidades de meses que os reservatórios mudaram de determinado nível para outro em um mês.

No reservatório Castanhão não se observa a transição brusca de um nível para outro dois ou três abaixo. Em todos os meses da simulação, sempre que o reservatório desceu de nível, a transição aconteceu para um nível imediatamente inferior. O que não pôde ser observado no sistema Metropolitano. Verificou-se que este sistema passa diretamente do estado Normal para o estado de Seca em três meses, e do estado alerta para o estado de seca severa em 7 meses. Considerando que a tomada de decisão sobre o racionamento acontece duas vezes, e que o período simulado compreendeu 100 anos, temos a probabilidade de 1,5% $\left(\frac{3}{200}\right)$ e 3,5% $\left(\frac{7}{200}\right)$ de acontecer essa transição brusca entre os níveis citados anteriormente, respectivamente.

Tabela 27 - Matriz de transição de níveis de seca para racionamento do reservatório Castanhão, utilizando a regra de operação Nível Meta 4.

Reservatório Castanhão	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Normal	367	8	0	0	0
Alerta	7	319	12	0	0
Seca	1	8	209	10	0
Seca Severa	0	3	7	160	4
Seca Extrema	0	0	0	4	92

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 28 - Matriz de transição de níveis de seca para racionamento do sistema Metropolitano, utilizando a regra de operação Nível Meta 4.

Sistema Metropolitano	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Normal	785	16	3	0	0
Alerta	14	194	9	7	0
Seca	3	8	99	0	1
Seca Severa	2	5	0	56	0
Seca Extrema	0	1	0	0	8

Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.2 Regra Níveis Metas 5

Esta regra utilizou os níveis metas construído em 5.4.1 e alterou-se manualmente os valores da tabela de trade-off com o intuito de minimizar a transição brusca entre os níveis de secas no sistema Metropolitano.

A matriz de transição de estados de seca do reservatório Castanhão e do sistema Metropolitano são apresentados na Tabela 29 e na Tabela 30. No Castanhão, sempre que o reservatório desceu de nível, a transição aconteceu para um nível imediatamente inferior. No sistema metropolitano, a transição brusca é menor que na operação Nível Meta 4, entretanto, a vazão média transferida no período simulado é superior ao dobro da anterior (7,98 hm³/mês). Esse acréscimo da transferência hídrica é devido, em grande parte, as que acontecem quando o sistema metropolitano está no estado Normal e Alerta. Essa afirmação pode é entendida quando se compara as tabelas de trade-off das duas regras (Nível meta 4 e 5) e percebe-se que nos estados de seca mais intenso a regra Níveis metas 5 transfere menores valores de água.

Tabela 29 - Matriz de transição de níveis de seca para racionamento do reservatório Castanhão, utilizando a regra de operação Nível Meta 5.

Reservatório Castanhão	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Normal	298	5	0	0	0
Alerta	4	271	10	0	0
Seca	0	6	247	10	0
Seca Severa	1	2	7	206	6
Seca Extrema	0	0	0	6	132

Fonte: Elaborado pelo autor

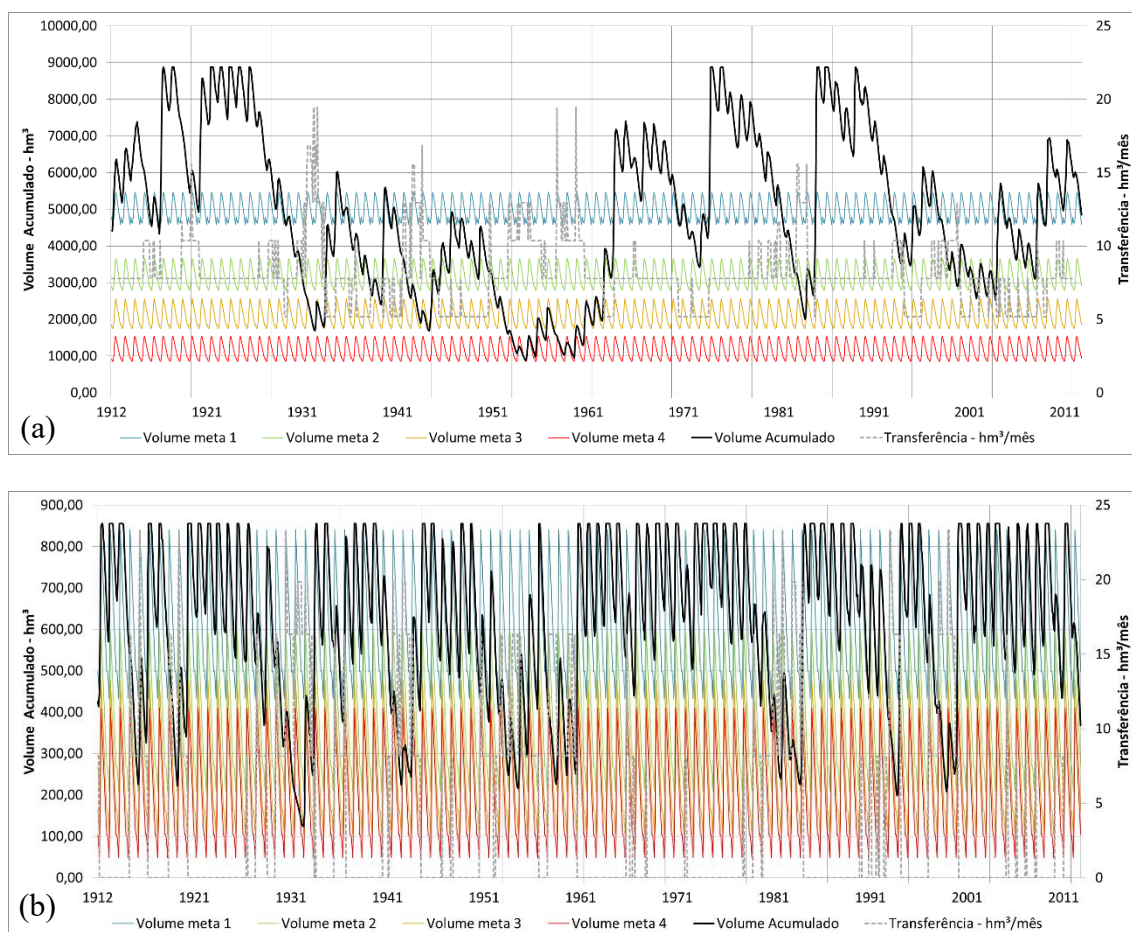
Tabela 30 - Matriz de transição de níveis de seca para racionamento do sistema Metropolitano, utilizando a regra de operação Nível Meta 5.

Sistema Metropolitano	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Normal	838	17	0	0	0
Alerta	14	208	9	2	0
Seca	2	5	78	1	1
Seca Severa	1	2	0	24	0
Seca Extrema	0	1	0	0	8

Fonte: Elaborado pelo autor

A regra de operação formada com os níveis metas 5 proporcionou a evolução da acumulação do sistema Jaguaribe e Metropolitano mostrada na Figura 58 (a e b). O reservatório Jaguaribe apresentou o volume mínimo acumulado de, aproximadamente, 880 hm³ em fevereiro de 1955, estando inserido no estado de seca extrema, enquanto o Metropolitano manteve uma reserva mínima, em seu período mais crítico, de 120 hm³, aproximadamente. A Tabela 31 apresenta a frequência do tempo em os reservatórios equivalentes permanecem em cada nível de seca. O Jaguaribe apresentou frequência de 2,2% no estado mais crítico, seca extrema. No estado de seca severa permaneceu por 8,9% do tempo, enquanto que no estado de seca e alerta, 11,15% e 29,2%, respectivamente. O reservatório esteve em 48,5% no estado normal do sistema.

Figura 58 - Simulação da operação dos reservatórios equivalente Jaguaribe e Metropolitano com os níveis Metas 5



Fonte: Elaborada pelo autor

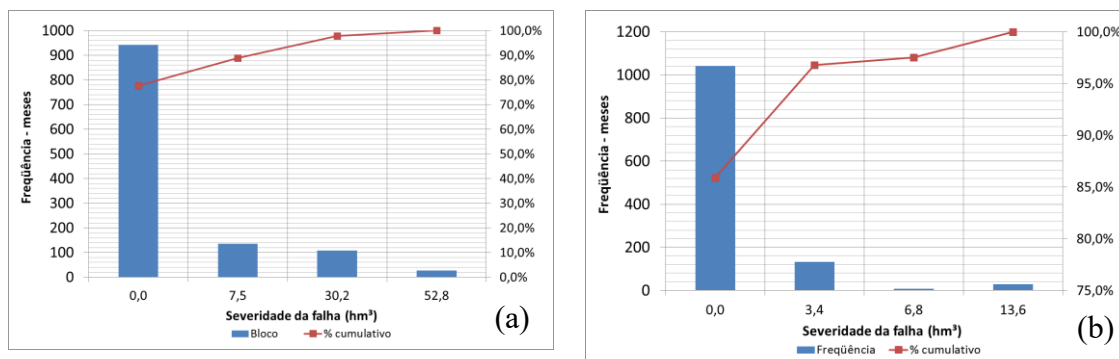
Tabela 31 - Frequência do tempo simulado em que os reservatórios equivalentes Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, na operação Nível Meta 4

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Jaguaribe	48,51%	29,21%	11,14%	8,91%	2,23%	0,00%
Metropolitano	68,81%	17,08%	10,89%	0,74%	2,48%	0,00%

Fonte: Elaborado pelo autor

A falha no atendimento da demanda associado a cada estado de seca pode ser observado nos histogramas das severidades desta operação, apresentado na Figura 59. No Jaguaribe, a falha de 7,5 hm³ esteve presente em 11% dos meses simulados. A maior severidade ocorreu neste reservatório, no valor de 52,8 hm³ em 2,2 % do período. Em 78% do tempo não ocorreu nenhuma falha no atendimento da demanda do Jaguaribe. No Metropolitano, 86% dos meses simulados não apresentaram falha no atendimento da demanda. Em 11 % do tempo, a severidade da falha foi de 3,4 hm³. As maiores falhas deste reservatório, 13,6 hm³, ocorreram em 2,5% do período simulado.

Figura 59 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 5: (a) Jaguaribe; (b) Metropolitano

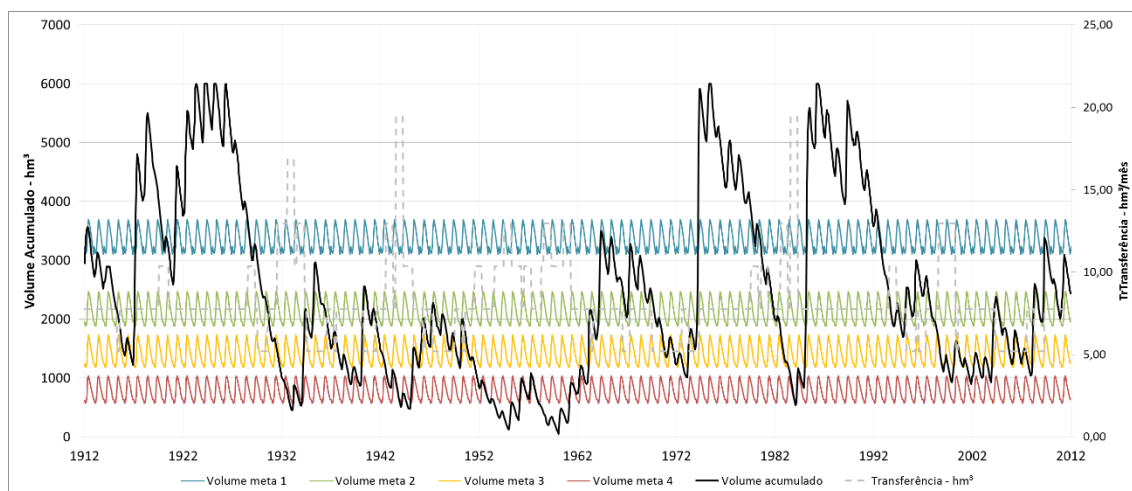


O impacto da regra desta operação foi avaliado através da simulação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com seus reservatórios desagregados, como feito anteriormente. As regras de transferência entre os reservatórios, transferência entre os sistemas e tomada de decisão sobre racionamento foram feitas como em 5.4.1.

A Figura 60 apresenta o resultado da operação com Níveis metas 5 do reservatório Castanhão. Este reservatório apresenta os menores volumes acumulados, aproximadamente 50 hm³, no ano de 1960. Esse ano está inseridos numa década (1952 a 1962) em que o reservatório apresenta os menores estoque da simulação. No reservatório Pacoti-Riachão, é possível observar que sua acumulação se mantém em

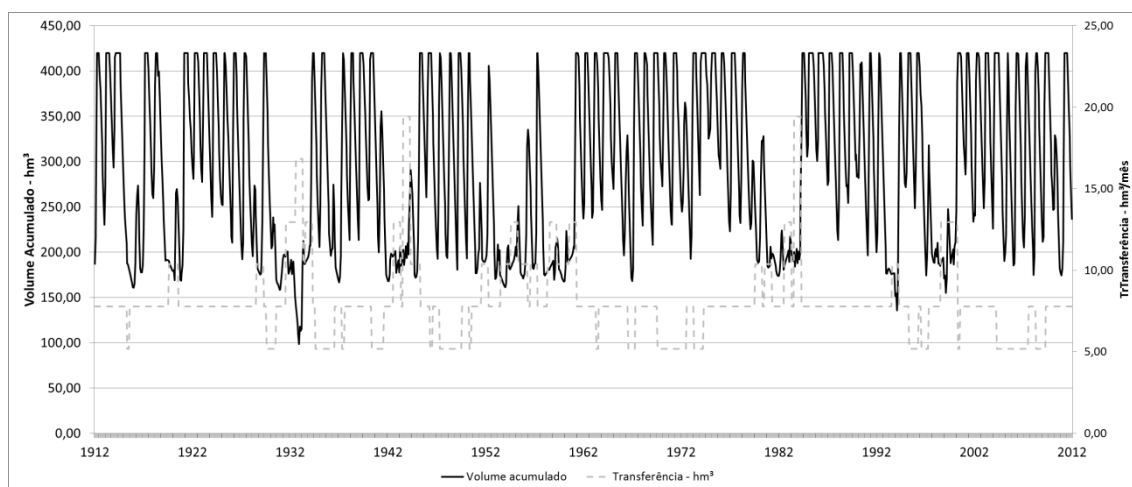
torno de 50% do seu volume máximo, garantindo a estocagem de uma boa quantidade de água na RMF, chegando a um valor mínimo de 100 hm³ em 1932. Não se observa colapso em nenhum dos reservatórios da RMF.

Figura 60 - Operação do reservatório Castanhão para a regra de operação Nível Meta 5



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 61 - Operação do reservatório Pacoti-Riachão para a regra de operação Nível Meta 5



Fonte: Elaborado pelo autor

A frequência do tempo de permanência em cada nível e a frequência de falhas para todos os reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe e para o sistema Metropolitano são apresentados na Tabela 32 e na Tabela 33. Como a definição do estado de seca dos reservatórios do Metropolitano foi feita com base no somatório dos volumes acumulados no mês de todos os reservatórios, a falha e frequência no nível são as mesmas para todos os reservatórios.

O Castanhão apresentou as maiores falhas de todo o sistema. Sabendo que nesta regra de operação, a imposição de racionamento acontece apenas a partir do estado de seca (acionamento no estado Alerta é zero), este reservatório apresentou algum tipo de falha em 51,5% do período simulado. Isso significa que em 48,5 % do tempo o reservatório atendeu plenamente a sua demanda exclusiva. Os reservatórios do sistema Metropolitano, apresentam, aproximadamente, 90,1% do tempo em estado normal e alerta, significando o atendimento pleno das demandas da região. Um estado de seca mais intenso, apresenta-se em menos de 1% do tempo simulado. A severidade de cada um desses níveis pode ser observada nos histogramas apresentados na Figura 62. Os reservatórios apresentaram as maiores falhas de atendimento, em grande parte, nos estados de seca que representam menores severidades.

Tabela 32 - Frequência do tempo simulado que os reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 5

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema	Colapso
Sistema Jaguaribe	36,9%	28,5%	17,6%	10,6%	6,4%	0,0%
Castanhão	25,0%	23,5%	21,8%	18,3%	11,4%	0,0%
Orós	62,6%	15,1%	10,1%	7,7%	4,5%	0,0%
Banabuiú	63,1%	22,8%	7,4%	6,7%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	70,5%	19,3%	7,2%	2,2%	0,7%	0,0%

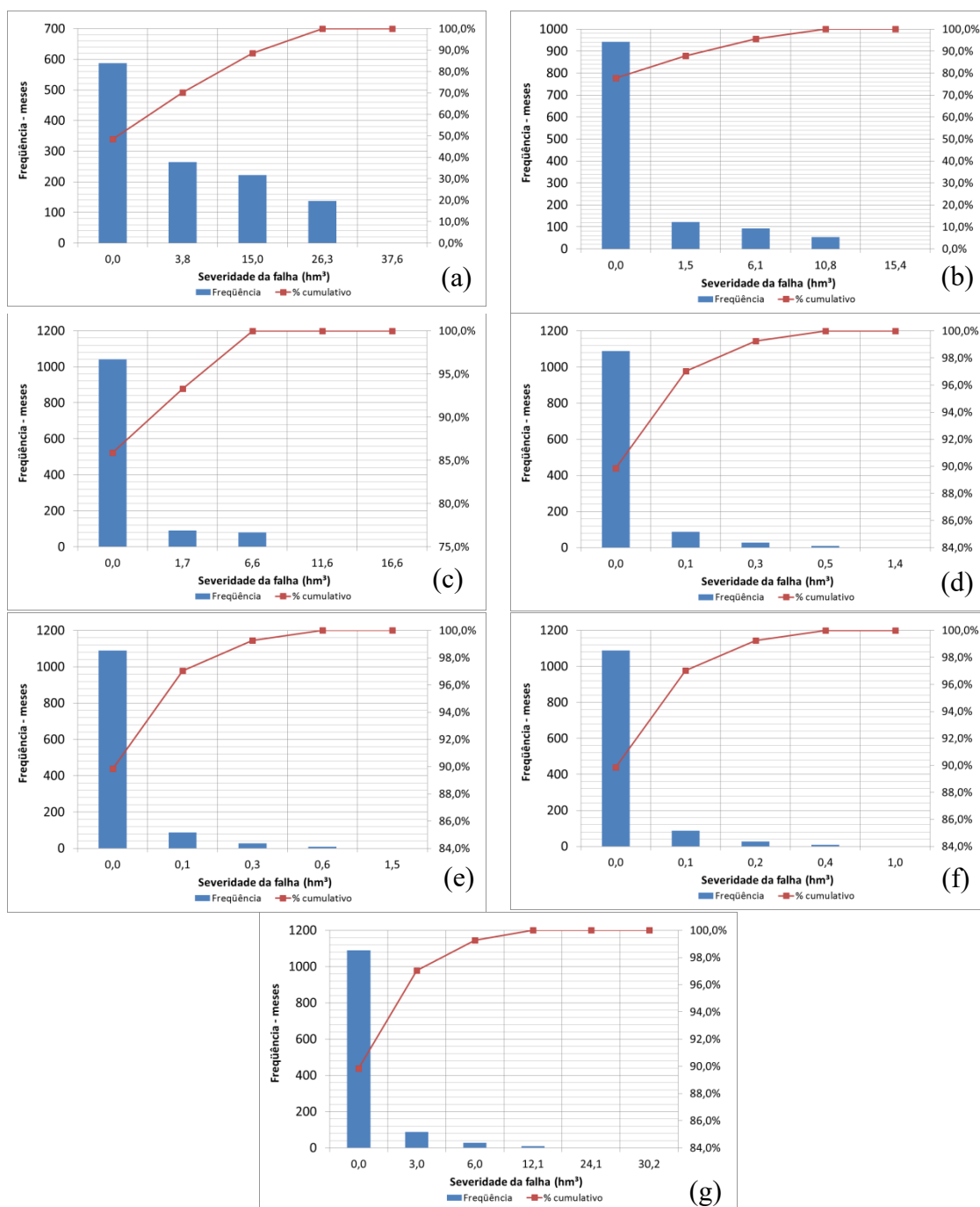
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 33 - Frequência de falha dos reservatórios do sistema Jaguaribe e Metropolitano apresentaram em cada estado de seca, para operação Nível Meta 5

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	63,1%	34,7%	17,1%	6,4%	0,0%
Castanhão	75,0%	51,5%	29,7%	11,4%	0,0%
Orós	37,4%	22,3%	12,1%	4,5%	0,0%
Banabuiú	36,9%	14,1%	6,7%	0,0%	0,0%
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	29,5%	10,1%	3,0%	0,7%	0,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 62 - Histograma das severidades das falhas da operação do sistema Jaguaribe-Metropolitano com a regra de operação com Níveis Metas 4 para o sistema desagregado: (a) Castanhão; (b) Orós; (c) Banabuiú; (d) Aracoiaiba; (e) Pacajús; (f) Pacoti-Riachão; (g) Gavião.



Fonte: Elaborado pelo autor

O somatório das severidades do reservatório em um período de tempo é representado pela vulnerabilidade. Esta medida representa a pior falha ocorrida na operação do reservatório. O reservatório Castanhão apresentou um período máximo de 273 meses (julho de 1941 a março de 1964) em que ocorreu alguma falha no atendimento de sua demanda. Nesse período, o reservatório deixou de atender um valor total de 4441 hm³, resultando em 16,3 hm³/mês (6,3 m³/s) em média. O reservatório

Gavião apresentou uma vulnerabilidade máxima de 144,7 hm³ em um período de 21 meses, resultando em 2,7 m³/s de déficit médio neste período (julho de 1931 a março de 1933). Na Tabela 34 pode ser visto os valores referentes as maiores vulnerabilidades e o período de tempo em que estas ocorreram para cada um dos reservatórios integrantes do sistema.

Tabela 34 - Vulnerabilidade máxima dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para a operação Nível Meta 5

	Máxima	Período em que ocorreu	Média do período	
	(hm³)	(meses)	(hm³/mês)	(m³/s)
Castanhão	4440,9	273,0	16,3	6,3
Orós	977,6	141,0	6,9	2,7
Banabuiú	587,8	120,0	4,9	1,9
Aracoiaba	6,6	21,0	0,3	0,1
Pacajús	7,2	21,0	0,3	0,1
Pacoti-Riachão	4,9	21,0	0,2	0,1
Gavião	144,7	21,0	6,9	2,7

Fonte: Elaborado pelo autor

A resiliência dos reservatórios para a regra de operação dada é mostrada na Tabela 26Tabela 35. Nela é possível observar que os reservatórios da RMF demoram, em média, 21 meses para retornar ao estado Normal, depois de ir para um nível inferior. Além disso, observa-se que esses reservatórios demoram cinco meses para retornar ao estado seca severa, após ir para o estado de seca extrema. O reservatório Castanhão permanece, em média, 20 meses no estado de Seca Extrema antes de retornar ao estado de Seca Severa. Quando o reservatório sai do estado Normal, em média são necessários 182 meses que ele retorne a este estado.

Tabela 35 - Tempo de resiliência (meses) dos reservatórios integrantes do sistema Jaguaribe-Metropolitano, para regra de operação Nível Meta 5

	Normal	Alerta	Seca	Seca Severa	Seca Extrema
Sistema Jaguaribe	69,5	30,0	25,9	19,5	0,0
Castanhão	181,8	62,4	32,7	19,7	0,0
Orós	37,8	38,6	29,4	13,5	0,0
Banabuiú	55,9	28,5	20,3	0,0	0,0
Sistema Metropolitano (Aracoiaba, Pacajús, Pacoti-Riachão e Gavião)	21,0	10,3	7,2	4,5	0,0

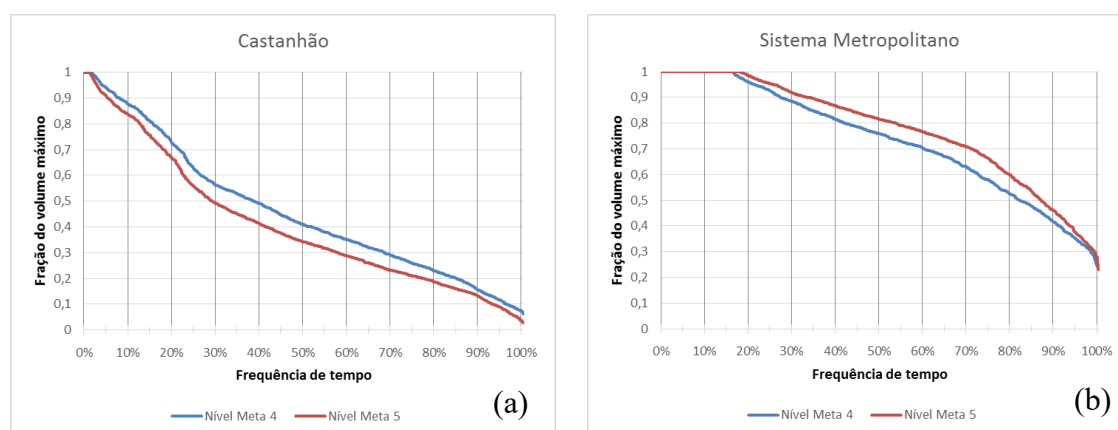
Fonte: Elaborado pelo autor

5.4.3 Comparação entre as regras

Comparou-se as regras de operação Nível Meta 4 e Níveis Metas 5 com o intuito de verificar as diferenças que cada regra proporcionará a eficiência do sistema. As comparações serão feitas para o reservatório Castanhão e para o sistema Metropolitano, e incorporará a análise da acumulação dos reservatórios, da severidade das falhas de atendimento das demandas, e na transferência de água entre os dois sistemas.

A Figura 63 apresenta a curva de permanência da acumulação do reservatório Castanhão e do sistema Metropolitano para as regras de operação 4 e 5. Nela é possível observar que, para o Castanhão, a operação 5 apresentou menores estoques em relação a operação 4, enquanto no Metropolitano aconteceu o contrário: a regra 5 apresenta maior volume estocado em relação a 4. Essa diferença se deve principalmente a quantidade de água transferida entre as duas bacias. Como dito anteriormente, as vazões transferidas na regra de operação 5 quando o reservatório metropolitano ainda está no estado normal proporciona maior acumulação em seus reservatórios. Nota-se ainda que, apesar dos reservatórios apresentarem diferenças nas acumulações ao longo do tempo simulado, os volumes mínimos alcançados em cada uma das regras são praticamente os mesmos.

Figura 63 - Curva de permanência da acumulação dos reservatórios Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b) para as regras de operação Nível Meta 4 e 5

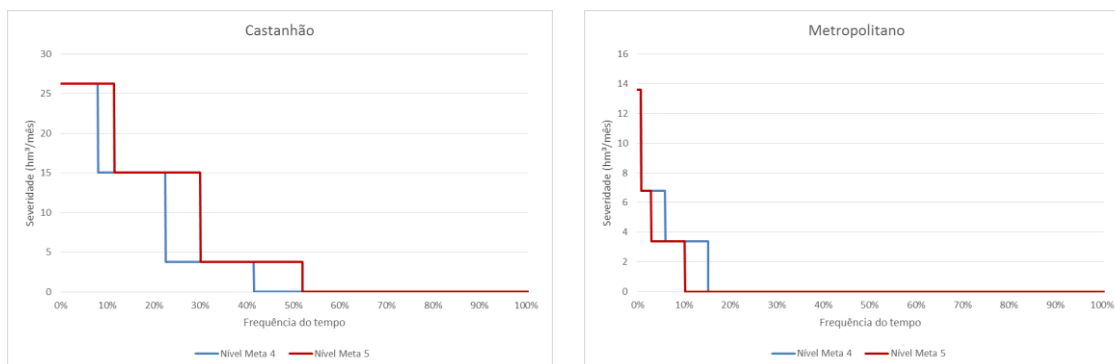


Fonte: Elaborado pelo autor

O volume acumulado nos reservatórios impactará a severidade das falhas das demandas. Assim, observa-se que as maiores severidades ocorrem nos reservatórios com menores estoques de água (Figura 64). A operação 4 permitiu ao reservatório

Castanhão maior tempo de atendimento pleno de suas demandas em relação a operação 5. Nesta última, o reservatório tem 48% do tempo sem falhas, enquanto que na primeira, 59%. Já no sistema Metropolitano, a regra que proporcionou menor severidade foi a regra 5. Apenas em 10% do tempo os reservatórios da RMF deixaram de atender alguma parcela de sua demanda de referência. A operação 4 proporcionou para este sistema falha em 15% do período simulado.

Figura 64 - Curva de permanência da severidade das falhas de atendimento das demandas do reservatório Castanhão (a) e do sistema Metropolitano (b)

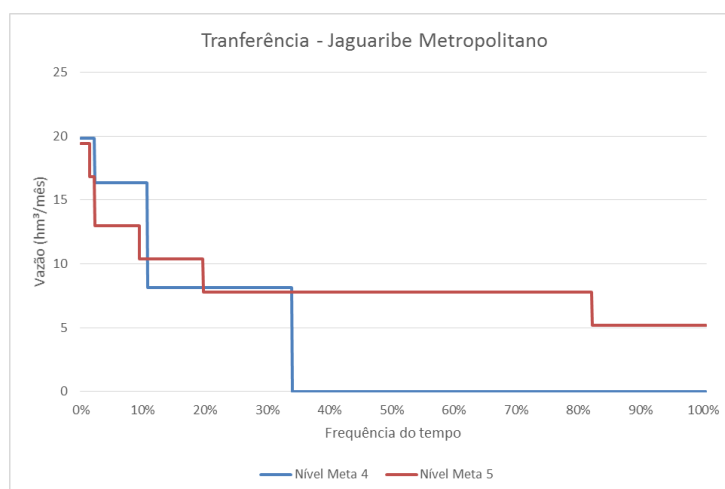


Fonte: Elaborado pelo autor

As transferências entre os sistemas podem ser observadas na

Figura 65. Nela percebemos que a operação 4 transfere em 35% do tempo algum valor de vazão. No restante do período simulado não ocorrem transferência entre as bacias. Na operação 5, no entanto, sempre ocorrem transferências. Essas transferências produzem um aumento de 10% do vertimento médio do período simulado dos reservatórios da RMF em relação a regra 4.

Figura 65 - Curva de permanência das transferências ocorridas entre os sistemas Jaguaribe e Metropolitano



Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A definição de uma política de operação de reservatórios que permita a interação entre a alocação de longo prazo e de curto prazo é de grande importância para a gestão eficiente, equitativa e sustentável dos recursos hídricos.

Dessa forma, propôs-se uma metodologia que incorporasse a participação conjunta de usuários e gestores de água através de consulta para definição de valores admissíveis de riscos toleráveis e transferência de água entre os sistemas. Neste trabalho, a consulta foi realizada apenas com os gestores de água, entretanto, a aplicação pode ser estendida a consulta pública para definição de outras preferências e, conseqüentemente, a construção de outras curvas guias.

A metodologia para a construção de níveis metas como definidores de estado de seca foi aplicada ao sistema Jaguaribe Metropolitano e mostrou-se com bons resultados, capaz de ser aplicada na operação real do sistema. Os reservatórios que antes estavam sujeitos ao colapso devido ao fato da demanda instalada ser superior à vazão regularizada, obtiveram nas simulações um bom desempenho. As pequenas severidades que aconteceram ao longo do tempo e em função do nível de seca contribuíram para que o sistema de reservatórios não deixasse de atender ao menos uma parcela de sua demanda em todo período simulado.

As regras de operações Nível Meta 1, Nível Meta 2 e Nível Meta 3 tiveram desempenho bastante similar. Os reservatórios permaneceram com volumes acumulados similares, diferenciando-se principalmente em relação a severidade das falhas e a transferência mensal entre os sistemas, ambas relacionadas aos valores definidos inicialmente pelos gestores.

As regras de operação Nível Meta 4 e Nível Meta 5 deram-se através da evolução das regras anteriores. As incorporações de algumas estratégias operacionais permitiram que as regras pudessem estar aptas para a implantação num sistema real de reservatórios. A grande diferença entre as duas deu-se nos valores de água transferidas, tendo a regra Nível Meta 5 o dobro da vazão média transferida em Nível Meta 4.

As curvas guias dos reservatórios do sistema Metropolitano, em todas regras mostradas, apresentaram a curva VMeta 1 (curva entre as zonas Normal e Alerta) valores metas correspondentes a um grande volume de acumulação no reservatório. Na regra Nível Meta 3 e 4, por exemplo, os reservatórios do sistema Metropolitano precisariam estar com volume acima de 98% da capacidade máxima no mês de abril para se enquadrarem na categoria Normal. Dessa forma, sugere-se para trabalhos futuros a diminuição da quantidade de zonas e estados de seca no reservatório metropolitano.

Recomenda-se que em trabalhos futuros seja feita uma análise mais detalhada sobre os valores e gatilhos de transferências entre os reservatórios localizados numa mesma bacia. Recomenda-se, ainda, que novas simulações possam realizadas incorporando os anos de 2013 a 2016, haja vista que esses constituem uns dos períodos mais secos da história do Estado.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ-BENITEZ, J.E.; EVERSON R. M.; FIELDSEND, J. E. **A MOPSO algorithm based exclusively on pareto dominance concepts. In Evolutionary Multi-Criterion Optimization.** Proceedings of Third International Conference, EMO 2005, Guanajuato, Mexico, March 9-11, p. 459-473, 2005.
- AQUINO, S. H. S. *et al.* **Alocação de longo prazo no estado do Ceará.** In: Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido. SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B.; AQUINO, S. H. S., (Org.) FINEP/UFC/FCPC, ed. Edição Gráfica e Editora, Fortaleza – CE, p. 257 – 275. 2013.
- BARBOSA, P. S. F. **Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos.** In: PORTO, R. L. L. (Org.). Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre: UFRGS, 2002.
- BARROS, F. V. F. **Uso de algoritmos evolucionários na calibração de modelos hidrológicos e na operação de sistemas de reservatórios.** 2007. 198 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.
- BARROS, M. T. L. **A Programação Dinâmica Aplicada à Engenharia de Recursos Hídricos.** In: PORTO, R. L. L. (Org.). Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre: UFRGS, 2002.
- BRANDÃO, J. L. B. **Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos.** 2004. 160 f. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- BRASIL. **Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.HTM>. Acesso em: 2 fev. 2016.
- BRAVO, J. M. ; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. Verificação da Eficiência e Eficácia de um Algoritmo Evolucionário Multi-objetivo na Calibração Automática do Modelo Hidrológico IPH II. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, p. 37-50, 2009
- CEARÁ. **Plano de Segurança Hídrica da Região Metropolitana de Fortaleza.** Governo do Estado do Ceará. 2016.
- CHONG, C. S. *et. al.* **A Bee Colony Optimization Algorithm to Job Shop Scheduling.** Winter Simulation Conference, Monterey, California, USA, Dec 3-6, p. 1954-1961, 2006.
- CIRILO, J. A. **Programação Não Linear Aplicada à Recursos Hídricos.** In: PORTO, R. L. L. (Org.). Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

- DINAR, A., ROSEGRANT, M. W, MEIZEN-DICK, R. **Water Allocation: Mechanisms, principles and examples**. World Bank: Policy Research Working Paper #1779, Washington, DC. 1997.
- DRAPER, A. J.; LUND, J. R. Optimal Hedging and Carryover Storage Value. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n.1 83-87. 2004.
- DUAN, Q; GUPTA V.K.; e SOROOSHIAN S. A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. **Journal of Optimization Theory and Applications**, v. 76, n.3, p. 501-521, 1993.
- HADDAD, O.B.; AFSHAR A.; MARINO M.A. Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) Algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization. **Water Resources Management**, v.20, n. 5, p. 661-680. 2006.
- KENNEDY, J. e EBERHART, R.C. **Particle Swarm Optimization**. In. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, p. 1942-1948, 1995.
- JACOBY, H. D.; LOUCKS, D. P. Combined use of optimization and simulation models in river basin planning. **Water Resources Research**. v. 8, n. 6, p. 1401-1414, 1972.
- LABADIE, J.W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 2, p. 93-11, 2004.
- LABADIE, J.W. **Generic dynamic programming Package: CSUDP. Documentation and User Guide Version 4.0**. Department of Civil and Environmental Engineering Colorado State University, 2014.
- LOUCKS, D. P.; BEEK, E, V. **Water Resources Systems Planning and Management: An introduction to Methods, Models and Applications**. UNESCO. 2005
- LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. **Water Resource Systems Planning and Analysis**. Prentice-Hall, Inc. 1981
- ROA-GÁRCIA, M. C. Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world. **Water Alternatives**. v. 7, n.2, p. 298-319, 2014.
- SILVA, D. C. *et al.* O. **Diagnóstico Institucional Da Alocação Negociada De Água No Estado Do Ceará À Luz Do Framework De Elinor Ostrom**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, 2013.
- SIMONOVIC, S. P. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 118, n 3, p. 262-280, 1992.
- SPEED, R. *et. al.*. **Basin Water Allocation Planning. Principles, procedures and approaches for basin allocation planning**. UNESCO, Paris. 143p. 2013.
- SOUZA FILHO, F. A. **Alocação de Água Sazonal e Anual: Modelos Matemáticos, Experimentação Comportamental e Justiça Alocativa**. 2005. 439 f. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005.

SOUZA FILHO, F. A. *et al.* **Preparação para as Secas e Resiliência às Mudanças Climáticas: Preparação para às Secas em Nível Urbano – Região Metropolitana de Fortaleza.** Banco Mundial. 2015.

TU, M-Y., HSU, N-S; YEH, W.W-G. Optimization of reservoir management and operation with hedging rules. **Journal of Water Resources Planning and Management.** v. 129, n. 2. p. 86-97.

UFC/COGERH. **Estudos de regionalização de parâmetros de modelo hidrológico chuva-vazão, para as bacias totais e incrementais dos reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos.** Relatório 1.1.12. Convênio UFC/COGERH/FCPC. Fortaleza. 2013. 24p.

VRUGT, J.A. *et. al.* Effective and efficient algorithm for multi-objective optimization of hydrologic models. **Water Resources Research**, v. 39, n. 8, 2003.

WURBS, R. Reservoir-system simulation and optimization models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 119, n. 4, p. 455-472, 1993.

APÊNDICE A – DADOS DOS RESERVATÓRIOS EQUIVALENTES

1 - Vazão (m³/s)

Reservatório Equivalente Jaguaribe												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1912	14,28	213,60	283,60	223,68	206,76	83,52	10,86	9,06	11,92	1,78	3,86	0,52
1913	182,04	132,88	177,86	227,70	209,00	90,24	48,36	4,54	9,72	12,44	1,76	39,90
1914	9,62	119,70	153,22	162,46	114,44	168,88	102,86	114,06	3,14	11,76	1,00	0,46
1915	13,84	7,68	14,32	25,00	7,52	1,54	1,06	0,28	0,00	0,06	0,18	7,02
1916	203,86	14,94	131,32	191,80	128,74	39,48	3,20	0,22	0,16	0,46	7,82	20,34
1917	126,66	457,06	785,14	483,00	430,28	44,72	14,20	1,86	4,04	6,02	26,22	51,00
1918	12,18	125,42	304,98	198,18	288,78	127,30	23,56	31,16	7,40	3,94	5,80	17,32
1919	0,46	32,44	13,10	5,10	2,88	4,16	6,76	3,00	0,44	0,24	0,12	0,22
1920	23,74	4,04	103,94	195,02	90,94	29,76	27,04	1,46	4,62	5,52	1,12	26,18
1921	14,36	187,82	627,92	327,98	474,36	73,22	34,14	11,12	13,42	11,02	26,16	8,28
1922	54,68	79,06	108,02	670,62	303,50	282,62	82,98	30,84	1,98	6,96	60,20	23,28
1923	29,82	252,12	144,44	339,32	143,02	69,90	17,58	2,34	0,82	6,06	7,76	1,66
1924	267,68	256,46	790,60	1668,88	634,38	265,34	17,24	3,88	8,02	44,72	8,20	34,84
1925	17,08	208,90	462,46	448,00	85,68	19,28	10,88	1,60	35,22	7,80	4,14	11,88
1926	5,78	95,18	350,48	357,62	213,64	45,34	1,82	1,08	0,16	1,30	2,56	2,46
1927	7,22	50,00	100,18	160,68	54,64	18,08	23,18	0,92	0,12	0,12	1,46	4,34
1928	10,60	9,74	104,82	104,40	58,56	15,50	1,48	0,12	1,10	1,26	1,58	6,78
1929	14,40	67,12	194,00	192,38	73,62	20,78	8,38	1,64	2,58	3,74	2,12	16,50
1930	10,06	21,48	83,56	76,42	69,56	57,90	1,58	0,10	0,00	3,78	0,34	3,04
1931	10,98	54,08	61,84	97,94	26,96	13,72	1,84	4,18	0,32	2,56	0,60	0,72
1932	10,34	16,36	18,28	13,44	5,62	4,54	6,32	0,20	4,66	0,82	1,18	0,22
1933	22,80	26,70	106,44	259,50	21,82	3,80	2,74	0,82	0,32	1,12	7,44	7,72
1934	37,82	103,98	413,90	277,20	415,72	68,36	0,52	2,36	3,20	0,82	21,34	29,48
1935	12,16	159,62	219,42	411,96	283,52	64,72	8,42	2,46	1,02	1,84	0,82	1,26
1936	2,84	82,74	76,04	55,48	67,54	47,60	1,60	0,48	0,00	0,50	0,34	1,82
1937	13,06	55,40	69,32	139,00	95,88	35,66	15,92	3,28	0,82	1,14	1,48	3,18
1938	2,80	5,30	146,78	137,24	40,96	7,34	0,96	1,50	0,78	1,26	0,58	0,44
1939	36,98	46,56	147,28	83,78	68,44	21,88	17,76	8,24	8,26	9,00	10,10	5,60
1940	9,04	85,32	455,02	460,92	381,58	81,08	21,86	7,64	7,28	1,94	5,28	6,94
1941	2,56	33,78	175,10	126,58	62,74	10,74	8,06	3,22	0,22	0,76	3,70	2,30
1942	17,14	24,90	24,28	25,20	9,46	1,40	0,70	1,36	0,00	4,84	1,30	8,20
1943	10,20	30,80	130,40	98,62	17,42	8,96	10,06	2,90	0,86	0,24	5,56	3,80
1944	28,20	8,22	65,04	139,68	39,10	19,84	10,72	0,48	2,18	0,42	0,98	27,28
1945	115,44	119,92	146,14	171,96	297,82	85,08	21,50	0,80	4,18	13,56	2,46	17,48
1946	34,60	145,14	142,78	235,44	92,74	77,56	6,34	2,00	4,54	0,56	10,40	32,64
1947	23,30	51,38	304,42	359,42	108,94	27,48	8,74	2,72	0,86	1,28	48,24	30,66
1948	3,12	19,72	213,44	157,42	78,34	37,32	27,32	2,90	0,50	3,90	0,48	5,04
1949	13,90	34,36	91,00	125,62	95,62	18,42	2,06	9,60	1,56	0,68	28,58	1,08
1950	12,36	23,36	145,58	472,18	65,56	6,90	7,54	1,66	2,32	7,84	0,94	7,94
1951	5,32	12,02	24,42	60,04	31,84	32,04	1,12	0,12	0,10	0,52	0,52	5,52
1952	1,74	13,44	65,00	103,86	63,28	5,56	2,64	1,38	0,10	0,06	0,28	5,82
1953	6,00	4,92	22,80	60,52	30,60	18,12	1,66	0,20	3,92	0,12	5,16	0,34
1954	14,44	12,86	48,12	53,20	53,30	14,34	1,04	0,46	0,00	0,16	4,64	1,46
1955	1,92	37,78	106,98	134,40	74,80	8,80	2,92	3,22	0,00	3,84	0,88	8,92
1956	18,46	112,24	186,54	178,68	43,32	11,14	4,16	3,98	0,10	7,90	2,72	5,06
1957	3,70	13,98	135,34	263,00	28,68	14,26	1,50	0,00	0,06	0,60	0,20	3,54
1958	10,52	8,04	23,00	8,46	15,84	0,78	6,52	0,18	0,20	0,00	0,00	1,24
1959	3,48	31,74	73,86	66,46	47,10	24,66	2,66	5,76	1,88	0,96	0,56	0,00
1960	28,78	4,64	194,48	136,62	85,22	20,50	8,78	0,68	0,18	1,30	0,94	4,82
1961	15,22	83,30	245,58	166,46	97,98	9,00	20,56	0,12	0,06	1,88	0,36	4,28
1962	40,06	45,12	151,32	145,06	91,30	28,72	14,72	0,30	0,22	0,94	12,56	18,76
1963	106,68	158,46	466,84	253,14	43,36	25,76	0,92	1,16	0,12	5,64	13,54	41,58
1964	31,10	156,44	384,64	728,58	396,98	97,56	50,90	35,22	19,76	3,18	5,16	2,96
1965	12,98	15,22	96,02	352,14	116,62	182,50	14,38	6,14	2,04	19,34	1,18	2,54

1966	15,04	98,06	51,74	103,22	69,70	44,74	23,20	1,84	8,34	1,74	4,92	7,96
1967	39,12	82,86	261,40	380,50	312,48	31,94	36,38	4,92	2,18	0,82	2,18	18,92
1968	43,18	34,80	299,18	131,26	209,22	21,02	16,52	5,02	1,28	2,02	4,26	10,20
1969	29,80	35,34	135,26	183,60	170,12	71,58	58,92	6,14	4,74	0,88	0,36	3,94
1970	19,54	25,88	121,90	78,04	9,60	5,70	3,12	2,10	0,40	2,20	3,64	0,62
1971	29,08	54,84	75,22	141,94	128,10	66,06	34,02	6,58	4,36	11,98	3,78	3,10
1972	21,60	49,90	71,52	83,52	54,60	37,34	2,22	21,12	0,96	1,06	0,42	20,68
1973	116,92	33,60	91,56	344,04	159,30	137,44	74,40	19,24	22,66	17,70	1,96	16,04
1974	60,58	259,36	681,98	1276,98	555,76	100,84	39,34	2,44	24,02	7,76	10,32	17,08
1975	10,88	73,82	290,56	262,24	230,60	177,18	112,02	16,56	6,60	2,66	2,66	16,94
1976	36,68	87,94	194,46	117,98	21,14	6,80	0,68	0,54	6,32	13,36	14,58	9,10
1977	36,24	66,30	149,76	303,30	193,16	125,18	43,44	0,42	1,52	5,14	1,06	19,34
1978	44,58	114,90	109,52	185,04	222,24	36,04	57,56	3,12	11,96	2,40	13,48	6,64
1979	31,66	49,88	81,04	98,74	117,04	22,56	9,38	1,76	5,70	2,74	15,54	3,44
1980	17,00	197,68	216,48	51,26	23,26	34,30	2,28	0,56	0,76	4,78	11,74	6,44
1981	18,48	16,84	231,14	83,68	7,14	9,14	0,74	0,98	0,00	0,06	0,34	7,94
1982	4,20	35,52	42,32	112,28	52,80	9,56	6,00	1,26	1,02	1,24	1,74	2,88
1983	3,08	30,44	59,50	28,40	7,72	1,84	1,18	0,92	0,00	0,06	0,12	1,00
1984	93,50	7,06	68,88	398,48	184,66	28,84	30,02	6,12	4,76	6,50	2,32	4,80
1985	43,94	303,46	578,28	1312,42	478,22	230,46	144,42	33,84	7,82	0,86	5,60	83,76
1986	29,22	130,86	474,86	636,82	239,34	143,02	68,08	23,54	12,16	16,54	25,98	5,78
1987	16,08	43,44	264,72	157,92	27,78	67,30	10,74	2,22	1,66	0,34	0,38	0,24
1988	43,36	25,92	122,20	278,88	100,90	63,26	15,96	1,74	0,62	3,84	1,78	35,54
1989	22,50	15,66	141,80	700,26	421,90	48,48	61,88	15,16	10,84	12,18	6,36	117,38
1990	30,00	74,42	69,90	194,46	80,10	15,60	33,08	9,68	8,02	2,32	6,18	1,70
1991	28,78	36,90	129,80	120,38	120,22	10,44	2,40	0,32	0,06	0,20	2,42	0,06
1992	4,46	76,42	124,28	155,68	4,30	18,18	8,82	0,00	5,60	0,00	0,78	0,66
1993	22,96	12,74	23,96	27,54	23,28	2,68	3,38	0,12	0,84	0,62	2,46	1,38
1994	27,14	50,06	95,32	143,66	92,26	170,98	18,68	1,40	0,60	1,16	1,66	25,08
1995	71,48	74,54	176,00	298,58	253,80	58,26	56,90	3,60	0,42	3,36	18,46	4,40
1996	53,06	97,70	186,08	364,74	255,64	20,10	14,82	18,56	2,74	5,30	20,34	9,52
1997	35,50	64,82	192,16	198,94	115,68	4,12	8,64	4,76	0,22	2,68	3,54	9,38
1998	13,16	19,56	52,94	40,24	6,54	1,24	2,04	1,76	0,06	0,00	0,24	2,26
1999	56,60	17,62	113,72	76,50	143,24	4,36	1,72	0,06	1,00	3,38	4,56	21,36
2000	14,70	116,42	148,56	258,26	95,58	43,80	19,76	23,12	12,98	0,60	0,58	20,58
2001	115,68	24,76	104,88	81,42	14,18	30,92	8,98	1,38	0,62	2,84	0,98	11,80
2002	22,94	38,36	153,46	156,02	116,60	28,86	17,96	0,12	0,82	0,12	1,36	2,34
2003	231,22	52,00	160,56	139,34	78,96	45,92	0,88	1,28	0,00	0,48	0,76	2,82
2004	14,66	469,30	298,90	210,74	150,62	155,80	21,88	5,58	0,88	0,64	1,48	3,10
2005	5,92	10,06	114,10	65,40	64,80	26,26	9,54	1,40	0,06	0,00	0,06	7,24
2006	9,02	40,26	104,28	193,92	157,70	21,58	6,12	5,26	0,74	4,44	1,28	12,02
2007	40,36	119,48	102,98	148,02	68,62	24,32	3,22	0,12	0,06	0,16	1,00	7,90
2008	27,80	65,54	434,20	487,46	202,10	24,66	26,56	7,06	0,56	0,34	0,06	7,42
2009	53,84	45,32	95,38	481,44	473,20	60,30	88,48	44,42	2,02	3,54	1,78	8,82
2010	103,38	15,08	35,02	135,98	32,92	22,26	2,12	0,06	0,00	19,52	0,34	25,64
2011	32,98	185,72	157,98	265,78	303,12	37,38	57,78	10,12	0,40	40,48	18,02	4,82
2012	47,98	74,64	87,28	32,12	12,56	9,54	0,84	0,00	0,06	0,06	0,34	1,10
Média	35,90	77,50	181,10	241,00	138,10	49,00	20,00	6,50	3,50	4,40	5,80	11,80

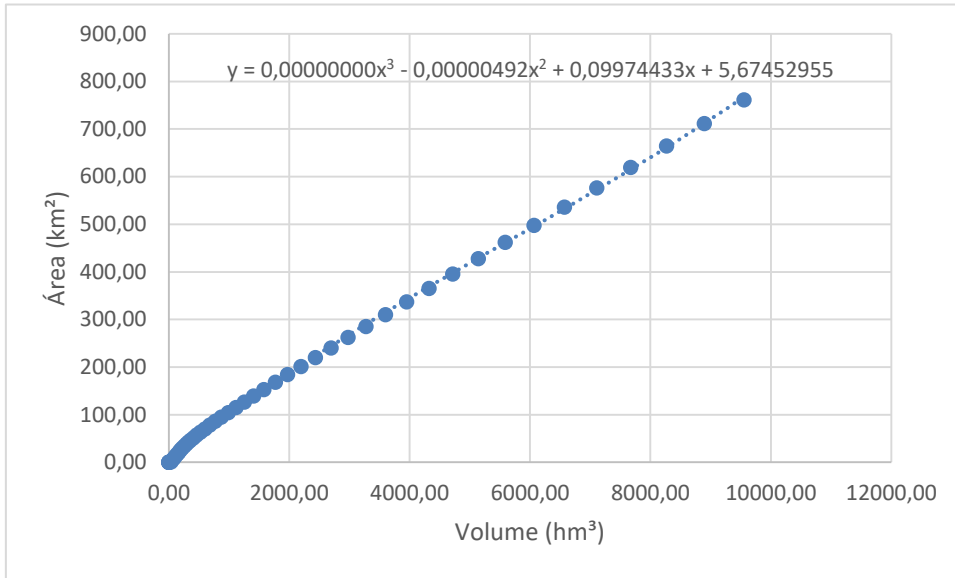
Reservatório Equivalente Metropolitano

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1912	26,05	72,89	96,82	85,05	72,75	13,78	9,21	3,91	1,11	0,98	1,30	6,79
1913	33,59	92,85	207,42	87,04	70,08	31,68	11,93	5,13	4,43	4,66	6,61	32,86
1914	37,14	67,57	91,10	122,91	119,20	54,78	21,63	4,31	1,06	2,50	0,68	1,82
1915	2,88	7,32	9,31	6,19	2,20	0,71	0,47	0,08	0,04	0,04	1,38	2,28
1916	3,40	16,39	37,24	42,41	45,91	9,63	0,00	0,23	0,35	2,49	8,19	36,49
1917	107,03	240,45	187,34	319,08	67,19	76,14	1,67	3,20	0,30	6,61	9,82	12,06
1918	26,59	50,90	84,54	84,23	44,73	9,02	18,65	4,25	1,00	0,40	8,71	3,22
1919	6,01	3,55	2,83	3,64	0,97	1,55	1,64	0,37	0,27	0,20	0,13	0,18
1920	0,83	19,11	33,45	45,53	35,80	18,36	5,75	1,62	0,50	2,38	10,55	9,57
1921	36,46	136,24	207,84	196,26	124,05	74,90	7,50	7,56	5,05	9,64	5,01	8,80
1922	12,63	21,11	101,07	139,24	89,48	55,76	21,55	4,63	0,38	7,28	4,29	8,86
1923	38,50	37,05	61,17	47,29	20,49	20,72	4,54	0,47	0,41	0,78	0,21	12,95
1924	23,54	103,58	264,01	170,63	183,40	15,28	3,21	2,20	2,62	1,85	6,53	13,66
1925	15,10	39,75	80,22	87,48	18,46	3,79	1,88	5,67	3,87	1,21	3,07	4,80
1926	10,95	44,55	118,27	119,82	31,69	7,78	1,12	0,29	0,38	1,48	0,71	3,41
1927	13,84	15,36	61,10	80,76	36,12	14,11	4,05	0,10	0,46	0,41	2,43	4,40
1928	2,21	11,91	31,15	35,20	14,86	2,88	0,33	0,49	0,37	0,34	0,26	2,35
1929	17,76	49,92	65,33	69,12	26,02	19,21	5,97	1,42	1,05	0,66	2,22	9,95
1930	5,58	15,30	26,47	9,99	17,69	3,37	0,76	0,25	1,62	0,47	0,48	4,99
1931	16,01	20,95	19,73	17,49	8,65	2,54	0,44	0,16	0,01	0,01	0,20	2,08
1932	4,44	6,64	3,98	2,94	3,44	2,85	0,79	0,98	0,42	0,10	0,10	2,60
1933	3,80	13,79	69,28	45,09	10,48	1,72	1,10	0,00	0,30	0,28	2,00	3,55
1934	20,79	75,64	120,55	162,44	62,52	6,90	0,63	0,70	0,52	1,53	9,06	10,02
1935	33,69	57,50	133,67	156,34	84,93	37,13	9,30	2,41	1,84	0,62	0,91	2,33
1936	15,06	10,05	7,79	18,61	31,13	23,57	2,11	0,39	0,33	0,15	0,16	0,03
1937	8,28	15,45	47,73	81,75	62,46	21,79	6,45	2,45	2,26	1,49	1,41	7,48
1938	4,57	58,31	145,60	115,25	23,35	7,40	3,07	1,83	0,67	1,79	1,35	5,07
1939	38,58	70,46	91,19	48,74	22,44	10,63	6,80	5,60	9,48	4,69	1,78	9,62
1940	14,40	56,50	150,63	232,99	62,81	105,78	5,02	2,31	1,59	0,44	2,96	2,09
1941	10,08	29,87	43,17	29,78	11,48	2,87	1,31	0,42	0,25	0,35	1,13	0,50
1942	4,28	9,80	16,04	16,37	14,11	3,08	0,60	0,38	0,61	0,21	0,70	2,03
1943	2,55	10,66	26,84	18,61	7,34	7,35	3,20	0,40	0,00	1,08	2,94	6,22
1944	2,73	24,68	38,72	78,33	39,17	9,59	2,80	0,00	0,20	0,20	4,86	6,98
1945	43,69	59,17	135,20	146,79	87,81	39,76	8,00	1,80	1,26	1,45	2,82	28,12
1946	43,98	87,67	124,60	60,27	26,31	3,70	0,20	0,10	0,30	0,50	4,65	5,87
1947	12,91	41,40	55,62	45,87	24,72	6,08	1,30	0,20	0,30	10,17	2,36	6,00
1948	4,63	34,66	38,86	58,26	41,97	17,58	5,96	0,60	0,90	0,20	0,64	0,64
1949	8,13	54,49	112,01	149,82	45,36	18,56	5,60	1,84	0,20	4,75	0,74	0,99
1950	8,90	48,93	204,07	199,27	8,30	4,90	1,20	0,30	1,60	0,66	1,30	4,79
1951	2,37	5,95	26,04	14,15	44,52	25,70	0,80	0,00	1,35	1,56	3,38	4,56
1952	6,00	31,22	62,57	70,87	20,03	3,19	0,59	0,20	0,10	0,10	2,56	0,57
1953	2,35	8,43	22,71	19,52	17,35	9,12	2,91	0,40	0,10	0,00	0,32	1,60
1954	7,46	16,16	17,27	38,32	16,00	2,70	1,20	0,10	0,00	0,00	0,32	2,33
1955	5,87	15,28	40,96	65,29	33,57	4,80	0,70	0,40	1,78	0,51	4,91	1,69
1956	15,99	38,25	77,28	66,56	10,55	5,25	4,23	2,36	0,69	0,18	1,42	7,46
1957	2,23	44,86	119,42	80,94	7,80	2,12	0,48	0,18	0,10	0,10	1,80	0,50
1958	1,53	3,19	3,50	7,91	2,80	2,36	0,50	0,00	0,00	0,00	0,55	3,67
1959	11,95	30,07	38,01	51,50	32,89	10,76	4,59	0,70	0,01	0,22	0,26	0,50
1960	0,77	32,57	45,93	21,59	11,69	6,18	2,10	0,50	0,10	0,00	1,66	4,57
1961	34,13	99,62	162,42	99,63	45,60	20,31	3,36	1,30	1,20	0,42	3,15	12,49
1962	19,39	86,23	91,28	62,28	35,92	6,50	1,57	1,92	0,37	1,68	3,72	21,32
1963	46,49	170,68	202,02	71,22	18,14	6,52	1,61	0,22	0,07	4,67	16,93	50,12
1964	118,92	222,90	291,01	328,77	71,10	52,04	14,85	8,07	3,75	1,20	1,69	10,41
1965	7,21	33,41	116,44	102,62	140,02	49,87	6,57	1,61	2,94	0,52	1,27	0,63
1966	7,04	10,73	21,67	35,14	29,06	22,50	9,37	3,03	0,99	0,78	1,96	3,14
1967	18,15	67,85	126,27	154,96	74,85	25,25	10,21	3,20	1,19	0,15	1,88	9,62

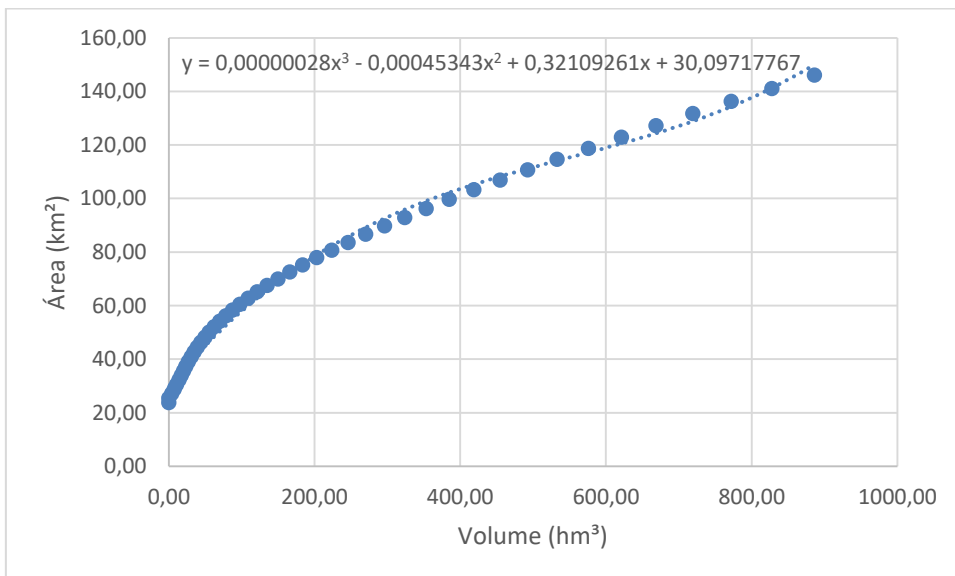
1968	6,39	42,14	58,08	112,15	41,40	11,58	5,89	0,41	0,33	0,17	4,20	5,91
1969	6,76	33,87	111,26	101,14	80,59	91,49	37,24	10,79	6,26	2,45	2,42	12,79
1970	9,19	40,97	68,66	42,03	18,76	8,90	5,14	0,76	0,85	2,28	2,17	9,97
1971	18,58	49,52	79,35	105,93	95,99	76,78	20,46	3,47	8,73	3,83	3,23	6,16
1972	10,93	18,49	28,89	29,84	29,60	16,52	8,06	2,12	0,61	0,52	4,88	10,11
1973	23,95	70,45	151,10	140,93	134,10	63,04	14,12	3,24	1,76	1,16	3,97	76,23
1974	87,81	249,41	419,53	428,16	113,50	48,83	11,10	12,19	5,42	1,84	17,51	17,62
1975	38,04	98,40	123,34	163,71	100,50	80,31	12,80	7,89	3,12	2,28	14,23	10,68
1976	38,27	73,27	99,16	35,75	10,58	4,23	3,18	1,20	6,67	2,82	1,37	13,63
1977	31,02	72,34	122,01	141,87	148,00	87,20	22,08	1,74	1,67	0,82	1,74	2,09
1978	15,98	31,69	49,36	81,53	53,34	27,26	7,84	2,57	2,82	2,71	2,74	4,16
1979	8,38	16,13	20,93	32,68	17,56	5,15	2,51	4,39	0,46	1,28	0,39	3,47
1980	35,61	51,07	35,11	19,04	13,27	6,39	0,73	1,78	0,91	0,53	1,02	2,44
1981	1,81	31,99	20,26	10,93	5,78	1,63	0,23	0,05	0,03	0,13	3,03	4,62
1982	6,22	21,88	30,11	44,84	28,70	10,22	3,35	1,63	1,36	1,37	0,70	0,60
1983	10,39	18,98	16,83	11,41	4,63	0,84	0,25	0,02	0,35	0,04	0,27	1,47
1984	4,00	17,28	53,41	95,82	82,95	45,44	25,90	5,24	4,56	1,44	2,48	24,37
1985	87,50	211,76	313,55	218,97	217,48	61,72	47,28	4,31	1,18	0,13	15,66	23,44
1986	62,80	178,81	316,73	230,01	87,07	46,41	13,21	4,92	7,96	5,06	3,02	5,26
1987	15,13	63,80	69,42	36,64	58,50	33,14	3,77	0,71	0,23	1,50	0,24	8,44
1988	13,19	33,13	100,44	159,71	72,27	32,57	7,06	3,27	1,31	1,70	9,45	17,42
1989	6,91	28,78	96,04	135,75	104,49	98,17	27,94	5,11	2,75	0,61	19,79	5,60
1990	13,75	11,58	27,38	41,21	18,14	17,28	6,99	1,99	0,74	0,35	0,08	3,65
1991	6,30	29,21	51,72	58,37	30,25	7,04	0,94	0,10	0,17	0,10	0,00	5,01
1992	27,62	55,56	62,69	26,55	7,05	3,50	0,30	0,53	0,10	0,17	0,00	0,71
1993	1,88	6,78	4,48	4,14	0,64	1,40	0,44	0,00	0,37	0,10	0,18	2,94
1994	9,15	28,48	71,93	114,92	173,06	78,99	6,80	0,99	0,50	0,73	15,27	13,41
1995	20,01	40,86	136,95	211,60	95,47	53,16	10,30	0,20	0,00	0,82	2,69	38,99
1996	42,07	94,94	222,41	142,45	18,92	6,00	11,95	2,38	2,32	2,28	1,50	3,45
1997	6,82	22,08	32,80	39,63	10,54	1,09	0,98	0,00	0,00	0,23	2,52	12,97
1998	6,20	17,19	15,63	7,10	2,46	0,93	1,09	0,10	0,01	0,13	0,31	1,26
1999	2,29	11,57	17,25	42,56	14,33	4,20	0,30	0,39	0,20	0,70	2,99	10,63
2000	16,09	36,32	123,42	108,58	36,80	47,87	52,98	24,66	4,20	0,86	1,56	10,14
2001	8,21	21,72	75,27	46,26	33,04	9,34	2,50	0,10	0,00	0,44	0,99	25,62
2002	16,62	50,38	135,99	140,34	59,22	33,26	6,96	0,50	0,73	1,03	1,22	12,26
2003	30,63	70,68	126,76	113,33	66,73	18,40	1,69	1,20	0,00	0,10	1,04	60,65
2004	101,45	120,00	48,43	29,70	57,91	48,82	7,80	0,50	0,20	0,10	0,03	3,46
2005	4,55	14,72	22,23	56,79	58,08	28,44	1,60	0,10	0,00	0,00	1,50	2,36
2006	9,34	27,88	79,47	102,02	77,21	30,27	4,90	2,10	0,30	0,18	0,94	3,06
2007	18,42	27,57	68,29	41,63	33,38	9,40	0,90	0,20	0,00	0,00	1,53	5,29
2008	3,01	26,91	73,25	82,65	35,83	10,43	7,10	2,60	0,02	0,00	0,00	7,66
2009	21,64	64,50	212,33	259,65	139,86	99,37	36,54	4,80	0,00	0,00	0,20	14,59
2010	3,83	12,81	44,71	16,94	7,60	1,90	0,20	0,00	0,00	0,00	4,42	25,02
2011	34,11	53,65	100,01	86,62	40,88	35,36	11,02	1,20	4,22	1,65	0,30	2,76
2012	24,72	17,89	13,76	4,35	6,38	2,90	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	9,23
Média	19,80	50,20	88,80	88,00	48,10	24,10	7,00	2,10	1,40	1,30	3,10	9,50

2 - Relação Área-Volume

Reservatório Equivalente Jaguaribe



Reservatório Equivalente Metropolitano



Valores de construção da curva cota-área-volume do REJ

Cota Refer. (m)	Jaguaribe			Banabuiú				Castanhão				Orós			
	Área (km²)	Volume (hm³)	% Volume Total	Cota (m)	Área (km²)	Volume (hm³)	% Volume Total	Cota (m)	Área (km²)	Volume (hm³)	% Volume Total	Cota (m)	Área (km²)	Volume (hm³)	% Volume Total
45,00	716,57	8956,85	100,0%	143,50	154,64	1676,48	100,0%	106,00	415,76	5998,99	100,0%	199,50	146,16	1281,38	100,0%
44,00	667,47	8306,09	92,7%	141,75	139,94	1504,97	89,8%	105,08	395,01	5651,71	94,2%	198,29	132,51	1149,41	89,7%
43,00	621,00	7690,77	85,9%	139,99	126,22	1345,59	80,3%	104,16	374,98	5318,22	88,7%	197,08	119,79	1026,96	80,1%
42,00	577,08	7109,81	79,4%	138,24	113,45	1197,91	71,5%	103,24	355,68	4998,22	83,3%	195,88	107,96	913,68	71,3%
41,00	535,63	6562,11	73,3%	136,48	101,58	1061,46	63,3%	102,33	337,08	4691,45	78,2%	194,67	96,98	809,20	63,2%
40,00	496,57	6046,60	67,5%	134,73	90,59	935,82	55,8%	101,41	319,17	4397,62	73,3%	193,46	86,82	713,16	55,7%
39,00	459,81	5562,19	62,1%	132,98	80,43	820,53	48,9%	100,49	301,93	4116,46	68,6%	192,25	77,45	625,20	48,8%
38,00	425,28	5107,80	57,0%	131,22	71,09	715,14	42,7%	99,57	285,36	3847,70	64,1%	191,05	68,82	544,96	42,5%
37,00	392,88	4682,35	52,3%	129,47	62,52	619,22	36,9%	98,65	269,45	3591,05	59,9%	189,84	60,92	472,07	36,2%
36,00	362,55	4284,74	47,8%	127,72	54,68	532,31	31,8%	97,73	254,16	3346,25	55,8%	188,63	53,70	406,18	31,7%
35,00	334,19	3913,90	43,7%	125,96	47,55	453,97	27,1%	96,82	239,51	3113,00	51,9%	187,42	47,13	346,93	27,1%
34,00	307,73	3568,73	39,8%	124,21	41,09	383,75	22,9%	95,90	225,46	2891,05	48,2%	186,21	41,18	293,94	22,9%
33,00	283,08	3248,17	36,3%	122,45	35,26	321,21	19,2%	94,98	212,01	2680,10	44,7%	185,01	35,80	246,86	19,3%
32,00	260,16	2951,12	32,9%	120,70	30,04	265,90	15,9%	94,06	199,14	2479,88	41,3%	183,80	30,98	205,34	16,0%
31,00	238,89	2676,50	29,9%	118,95	25,38	217,38	13,0%	93,14	186,85	2290,12	38,2%	182,59	26,66	169,00	13,2%
30,00	219,19	2423,22	27,1%	117,19	21,25	175,19	10,4%	92,22	175,10	2110,54	35,2%	181,38	22,83	137,49	10,7%
29,00	200,97	2190,20	24,3%	115,44	17,62	138,90	8,4%	91,31	163,91	1940,86	32,4%	180,18	19,44	110,44	8,6%
28,00	184,15	1976,36	22,1%	113,68	14,45	108,06	6,4%	90,39	153,24	1780,80	29,7%	178,97	16,46	87,50	6,8%
27,00	168,66	1780,61	19,9%	111,93	11,72	82,22	4,9%	89,47	143,08	1630,10	27,2%	177,76	13,86	68,29	5,3%
26,00	154,41	1601,87	17,9%	110,18	9,38	60,94	3,6%	88,55	133,43	1488,46	24,8%	176,55	11,60	52,47	4,1%
25,00	141,31	1439,06	16,1%	108,42	7,39	43,77	2,6%	87,63	124,27	1355,62	22,6%	175,35	9,65	39,67	3,1%
24,00	129,29	1291,08	14,4%	106,67	5,74	30,26	1,8%	86,71	115,58	1231,30	20,5%	174,14	7,97	29,52	2,3%
23,00	118,27	1156,86	12,9%	104,91	4,37	19,97	1,2%	85,80	107,36	1115,22	18,6%	172,93	6,53	21,67	1,7%
22,00	108,15	1035,32	11,6%	103,16	3,27	12,46	0,7%	84,88	99,58	1007,10	16,8%	171,72	5,30	15,76	1,2%
21,00	98,87	925,36	10,3%	101,41	2,39	7,27	0,4%	83,96	92,24	906,67	15,1%	170,51	4,24	11,42	0,9%
20,00	90,33	825,90	9,2%	99,65	1,69	3,97	0,2%	83,04	85,32	813,65	13,6%	169,31	3,32	8,29	0,6%
19,00	82,46	735,87	8,2%	97,90	1,15	2,10	0,1%	82,12	78,81	727,76	12,1%	168,10	2,50	6,01	0,5%
18,00	75,17	654,17	7,3%	96,15	0,73	1,22	0,1%	81,20	72,69	648,73	10,8%	166,89	1,75	4,21	0,3%
17,00	68,39	579,72	6,5%	94,39	0,40	0,89	0,1%	80,29	66,96	576,28	9,6%	165,68	1,03	2,55	0,2%
16,00	62,02	511,44	5,7%	92,64	0,12	0,65	0,0%	79,37	61,59	510,13	8,5%	164,48	0,32	0,65	0,1%
15,00	56,00	448,24	5,0%	90,88	-0,15	0,07	0,0%	78,45	56,57	450,01	7,5%	-	-	-	-
14,00	50,23	389,04	4,3%	-	-	-	-	77,53	51,90	395,63	6,6%	-	-	-	-
13,00	39,65	273,39	3,1%	-	-	-	-	75,16	41,32	279,98	4,7%	-	-	-	-
12,00	31,01	189,39	2,1%	-	-	-	-	72,79	32,68	195,99	3,3%	-	-	-	-
11,00	24,09	132,30	1,5%	-	-	-	-	70,42	25,76	138,89	2,3%	-	-	-	-
10,00	18,65	97,36	1,1%	-	-	-	-	68,06	20,31	103,96	1,7%	-	-	-	-
9,00	14,45	79,83	0,9%	-	-	-	-	65,69	16,12	86,42	1,4%	-	-	-	-
8,00	11,28	74,95	0,8%	-	-	-	-	63,32	12,95	81,54	1,4%	-	-	-	-
7,00	8,89	77,97	0,9%	-	-	-	-	60,95	10,56	84,57	1,4%	-	-	-	-
6,00	7,06	84,15	0,9%	-	-	-	-	58,58	8,73	90,75	1,5%	-	-	-	-
5,00	5,55	88,74	1,0%	-	-	-	-	56,21	7,22	95,33	1,6%	-	-	-	-
4,00	4,14	86,98	1,0%	-	-	-	-	53,84	5,81	93,57	1,6%	-	-	-	-
3,00	2,59	74,13	0,8%	-	-	-	-	51,47	4,26	80,72	1,3%	-	-	-	-
2,00	0,67	45,43	0,5%	-	-	-	-	49,11	2,34	52,03	0,9%	-	-	-	-
1,00	0,00	0,00	0,0%	-	-	-	-	46,74	-0,19	2,74	0,0%	-	-	-	-

Valores de construção da curva cota-área-volume do REM

Metropolitana			Aracoiaba			Pacajús			Pacoti-Riachão			Gavião		
Cota Ref. (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)	Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)	Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)	Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)	Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)
1,00	22,83	0,94	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	23,65	0,10	0,03
2,00	23,42	0,81	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	20,87	0,00	0,00	24,50	0,13	0,07
3,00	24,18	0,62	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	21,73	0,00	0,00	25,35	0,48	0,08
4,00	25,11	0,51	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	22,60	0,00	0,00	26,20	0,81	0,48
5,00	26,21	0,61	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	23,47	0,00	0,00	27,05	1,13	1,17
6,00	27,47	1,06	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	24,33	0,00	0,00	27,90	1,45	2,17
7,00	28,90	1,99	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	25,20	0,00	0,00	28,75	1,78	3,49
8,00	30,48	3,54	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	26,07	1,71	1,20	29,60	2,13	5,17
9,00	32,22	5,83	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	26,93	2,61	3,13	30,45	2,49	7,21
10,00	34,12	9,02	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	27,80	3,66	5,91	31,30	2,90	9,63
11,00	36,18	13,22	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	28,67	4,86	9,67	32,15	3,34	12,48
12,00	38,38	18,58	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	29,53	6,22	14,53	33,00	3,84	15,75
13,00	40,74	25,22	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	30,40	7,72	20,62	33,85	4,39	19,48
14,00	43,24	33,29	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	31,27	9,38	28,07	34,70	5,01	23,68
15,00	45,89	42,92	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	32,13	11,17	37,00	35,55	5,71	28,37
16,00	48,68	54,24	66,65	0,00	0,00	22,48	0,00	0,00	33,00	13,12	47,53	36,40	6,50	33,59
17,00	50,09	59,10	67,56	-0,07	0,03	22,98	-0,27	-0,22	33,39	14,03	52,79	36,40	6,50	33,59
18,00	51,59	64,49	68,48	-0,01	0,01	23,48	0,23	-0,43	33,77	14,97	58,41	36,40	6,50	33,59
19,00	53,19	70,50	69,39	0,08	0,02	23,98	0,77	-0,41	34,16	15,94	64,39	36,40	6,50	33,59
20,00	54,88	77,21	70,31	0,21	0,08	24,48	1,34	-0,13	34,55	16,94	70,75	36,40	6,50	33,59
21,00	56,68	84,70	71,22	0,36	0,25	24,98	1,95	0,45	34,94	17,96	77,50	36,40	6,50	33,59
22,00	58,57	93,07	72,14	0,55	0,56	25,48	2,61	1,36	35,32	19,01	84,66	36,40	6,50	33,59
23,00	60,56	102,40	73,05	0,76	1,04	25,98	3,31	2,64	35,71	20,09	92,23	36,40	6,50	33,59
24,00	62,65	112,77	73,97	1,01	1,73	26,49	4,05	4,32	36,10	21,20	100,22	36,40	6,50	33,59
25,00	64,85	124,26	74,88	1,29	2,68	26,99	4,84	6,45	36,48	22,33	108,64	36,40	6,50	33,59
26,00	67,15	136,97	75,80	1,59	3,90	27,49	5,67	9,05	36,87	23,49	117,52	36,40	6,50	33,59
27,00	69,55	150,97	76,71	1,94	5,45	27,99	6,54	12,18	37,26	24,67	126,85	36,40	6,50	33,59
28,00	72,06	166,36	77,62	2,31	7,36	28,49	7,47	15,86	37,65	25,88	136,65	36,40	6,50	33,59
29,00	74,67	183,21	78,54	2,71	9,66	28,99	8,44	20,12	38,03	27,12	146,93	36,40	6,50	33,59
30,00	77,40	201,62	79,45	3,15	12,40	29,49	9,47	25,02	38,42	28,38	157,70	36,40	6,50	33,59
31,00	80,23	221,66	80,37	3,62	15,60	29,99	10,54	30,58	38,81	29,67	168,98	36,40	6,50	33,59
32,00	83,17	243,42	81,28	4,12	19,32	30,49	11,67	36,84	39,19	30,98	180,77	36,40	6,50	33,59
33,00	86,22	266,99	82,20	4,66	23,58	30,99	12,85	43,84	39,58	32,32	193,08	36,40	6,50	33,59
34,00	89,38	292,46	83,11	5,23	28,41	31,49	14,08	51,62	39,97	33,68	205,93	36,40	6,50	33,59
35,00	92,66	319,90	84,03	5,83	33,87	31,99	15,36	60,20	40,35	35,07	219,33	36,40	6,50	33,59
36,00	96,05	349,40	84,94	6,47	39,98	32,49	16,71	69,64	40,74	36,48	233,29	36,40	6,50	33,59
37,00	99,56	381,05	85,85	7,14	46,78	32,99	18,10	79,95	41,13	37,92	247,81	36,40	6,50	33,59
38,00	103,18	414,93	86,77	7,84	54,31	33,49	19,56	91,20	41,52	39,38	262,92	36,40	6,50	33,59
39,00	106,92	451,12	87,68	8,58	62,61	33,99	21,08	103,40	41,90	40,86	278,62	36,40	6,50	33,59
40,00	110,78	489,72	88,60	9,36	71,71	34,50	22,65	116,59	42,29	42,37	294,93	36,40	6,50	33,59
41,00	114,75	530,81	89,51	10,16	81,64	35,00	24,29	130,82	42,68	43,90	311,84	36,40	6,50	33,59
42,00	118,85	574,47	90,43	11,01	92,46	35,50	25,99	146,12	43,06	45,45	329,39	36,40	6,50	33,59
43,00	123,07	620,78	91,34	11,89	104,18	36,00	27,75	162,53	43,45	47,03	347,57	36,40	6,50	33,59
44,00	127,41	669,84	92,26	12,80	116,86	36,50	29,57	180,08	43,84	48,63	366,40	36,40	6,50	33,59
45,00	131,87	721,72	93,17	13,75	130,53	37,00	31,46	198,80	44,23	50,26	385,89	36,40	6,50	33,59
46,00	136,46	776,51	94,09	14,74	145,21	37,50	33,41	218,75	44,61	51,91	406,05	36,40	6,50	33,59
47,00	141,17	834,30	95,00	15,76	160,96	38,00	35,44	239,95	45,00	53,57	426,90	36,40	6,50	33,59

3 - Lâmina de evaporação mensal (m)

Mês	Jaguaribe	Metropolitano
Jan	0,188	0,110
Fev	0,125	0,081
Mar	0,095	0,061
Abr	0,083	0,057
Mai	0,095	0,067
Jun	0,123	0,078
Jul	0,165	0,097
Ago	0,214	0,131
Set	0,239	0,137
Out	0,259	0,142
Nov	0,239	0,138
Dez	0,234	0,129
Total Anual	2,058	1,228

4 - Capacidade Máxima de Acumulação (hm³)

	Jaguaribe	Metropolitano
Capacidade Máxima de Acumulação	8881	854,9

5 - Demanda Equivalente

	Jaguaribe	Metropolitano
Demanda (m ³ /s)	29,1	13,2