

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

FRANCISCO BASTOS MOREIRA

DETERMINAÇÃO DE REGRAS DE USO DE ÁGUA DA CHUVA  
VISANDO À MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS COM TARIFAS DE  
CONTINGÊNCIA

PORTO ALEGRE

Abril 2018

FRANCISCO BASTOS MOREIRA

DETERMINAÇÃO DE REGRAS DE USO DE ÁGUA DA CHUVA  
VISANDO À MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS COM TARIFAS DE  
CONTINGÊNCIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Dornelles

PORTO ALEGRE

Abril 2018

Moreira, Francisco Bastos  
Determinação de regras de uso de água da chuva  
visando à minimização de custos com tarifas de  
contingência / Francisco Bastos Moreira. -- 2018.  
115 f.  
Orientador: Fernando Dornelles.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas  
Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos  
Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS,  
2018.

1. Aproveitamento de Água da Chuva. 2. Simulação  
de regras de uso de água da chuva. I. Dornelles,  
Fernando, orient. II. Título.

FRANCISCO BASTOS MOREIRA

DETERMINAÇÃO DE REGRAS DE USO DE ÁGUA DA CHUVA VISANDO À  
MINIMIZAÇÃO DE CUSTOS COM TARIFAS DE CONTINGÊNCIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 23 de abril de 2018.

---

Prof. Dr. Fernando Dornelles – IPH/UFRGS  
Orientador

---

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques – IPH/UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum – IPH/UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dra. Rutinéia Tassi – UFSM  
Examinadora

No que diz respeito ao empenho, ao compromisso,  
ao esforço, à dedicação, não existe meio termo.  
Ou você faz uma coisa bem feita, ou não faz.

*Ayrton Senna*

## RESUMO

A escassez hídrica é uma realidade para diversas regiões do Brasil e do Planeta, apresentando-se como um problema cada vez mais recorrente devido, dentre outros fatores, ao crescente desequilíbrio entre oferta e demanda por água, oriundo de consumos excessivos aliados ao elevado crescimento populacional das últimas décadas. O aproveitamento da água da chuva, para fins não potáveis, é uma das principais alternativas adotadas pelos usuários no combate à crise hídrica. As companhias de saneamento, por sua vez, buscam incentivar a redução do consumo de água potável por meio da aplicação de tarifas de contingência na conta de água. Sendo assim, esta pesquisa explora as duas técnicas citadas, a partir da criação de regras de uso para a água da chuva armazenada em reservatórios, visando à economia de água potável aliada a benefícios econômicos na conta de água do consumidor. Devido à recente crise hídrica oriunda dos baixos níveis do Sistema Cantareira, a aplicação metodológica foi realizada para a cidade de São Paulo, tendo como base a série histórica da estação pluviométrica Mirante Santana e o sistema de cobrança de tarifas de contingência adotado pela SABESP entre 2015 e 2016. A criação das regras de uso foi baseada em seis parâmetros julgados influentes no consumo de água ao longo do tempo: nível de água observado no reservatório, período do mês, período do ano, precipitação média mensal histórica, consumo acumulado de água da chuva ao longo do mês e previsão de chuva. Para a criação de tais regras, foram realizadas simulações por meio de séries sintéticas, nas quais diferentes conjuntos de percentuais de redução de uso da água do reservatório foram aplicados sobre o consumo diário de água da chuva, de acordo com os parâmetros analisados, tendo como critério de avaliação o custo total anual com a conta de água obtido para cada combinação. O estudo mostrou que a adoção de regras de uso pode ser vantajosa em termos econômicos para situações nas quais a residência dispunha de reservatório no período anterior à aplicação das tarifas, devido à maior dificuldade de atingir o consumo mensal de referência, reduzido nestes casos. Os melhores resultados, testados no ano crítico de 2014, apresentaram economias na faixa de 3 a 5%, influenciados, principalmente, por reduções de consumo nas seguintes situações: para níveis reduzidos de água no reservatório, no período final de cada mês, em meses historicamente menos chuvosos, para consumos acumulados situados em faixas de cobrança de multas aliados a ausência de precipitação, e para volumes moderados de previsão de chuva.

**Palavras-chave:** Aproveitamento de água da chuva, Tarifas de contingência, Simulação

## ABSTRACT

The water scarcity is a reality for several regions of Brazil and the Planet, presenting itself as an increasingly recurrent problem, among other factors, due to the growing imbalance between supply and demand for water, originated from excessive consumption combined with high population growth in the last decades. The rainwater harvesting for non-potable purposes is one of the main alternatives used against water scarcity. Water sanitation companies, in its turn, encourage the reduction of potable water consumption applying contingency fees in the water bill. In this concern, the research explores the two cited techniques (rainwater harvesting and contingency fees) to propose rules for rainwater use. This rules aim for saving potable water and consequently economic benefits in the consumer water bill. Due to the recent water crisis caused by low water volume in the Cantareira Water System, the methodology application was carried out for the São Paulo city, based on the historical series of the Mirante Santana rainfall station and the contingency fees adopted by SABESP between years 2015 and 2016. The propose for rules was based on six parameters that have influence in the water consumption over time: reservoir water level, time in the month, time in the year, historical average monthly precipitation, cumulative rain water consumption in month and rain forecast. For the rules optimization, simulations were carried out using synthetic rainwater series. The simulations adopted different sets of percentages of water use reduction (rules) for the daily rainwater consumption, according to the analyzed parameters; the target was minimize the annual sum water bill cost for each simulation. The research showed that the adoption of rules of use may be economically advantageous for situations in which the consumer had rainwater harvesting system before of the application fees period, due to the difficulty for reach the monthly reference consumption. The best results, tested in the critical year of 2014, presented savings in the range of 3% to 5%, mainly influenced by water consumption reductions indicated by the rules in the following situations: for low water levels in the reservoir, on the last days of the month, in months with few precipitation, for cases where fines was applied when potable water consumption overcame the limit and have no precipitation forecasting, and for moderate precipitation forecast volumes.

**Keywords:** Rainwater harvesting, Contingency fees, Simulation

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Evolução da população urbana por região (2000 a 2025) .....	6
Figura 2 Sistema típico de captação de água da chuva.....	12
Figura 3 Exemplo de reservatório de pré-tratamento para descarte da precipitação inicial .....	13
Figura 4 Tarifas de contingência pela SABESP .....	16
Figura 5 Percentual de bônus e multa aplicados no Programa de Incentivo à Redução do Consumo de Água ....	18
Figura 6 Benefício econômico e custo de construção em função do volume do reservatório .....	21
Figura 7 Método manual de tentativa e erro.....	27
Figura 8 Método computacional de tentativa e erro .....	27
Figura 9 Ilustração do Método SCE .....	29
Figura 10 Etapas de evolução do Método Simplex de Nelder e Mead.....	30
Figura 11 Fluxograma das etapas do trabalho .....	34
Figura 12 Comparação entre séries sintéticas e série observada para a cidade de Porto Alegre .....	39
Figura 13 Precipitações totais anuais observadas .....	46
Figura 14 Divisão do reservatório para simulação com os conjuntos de regras criados.....	50
Figura 15 Séries sintéticas com precipitações anuais críticas.....	56
Figura 16 Médias mensais para os 20 anos críticos das séries sintéticas.....	57
Figura 17 Custo anual com água da companhia em função do número de dias antecedentes ao período analisado .....	58
Figura 18 Médias mensais para precipitações sintéticas e observada.....	59
Figura 19 Precipitação acumulada para precipitações sintéticas e observada .....	59
Figura 20 Frequência relativa para precipitações sintéticas e observada.....	60
Figura 21 Frequência acumulada para precipitações sintéticas e observada .....	60
Figura 22 Nível de atendimento à demanda em função do volume do reservatório de água pluvial.....	62
Figura 23 Esquema de combinação para regras de 3 parâmetros .....	76



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Relação entre demanda e disponibilidade de água no Brasil .....	5
Tabela 2 Classificação da disponibilidade hídrica no Brasil .....	6
Tabela 3 Demandas médias para abastecimento urbano (m <sup>3</sup> /s).....	7
Tabela 4 Valores resultantes da aplicação de bônus e multas pela Sabesp, em milhões de reais .....	17
Tabela 5 Tarifas de consumo de água para a Região Metropolitana de São Paulo .....	45
Tabela 6 Exemplo de conjunto de percentuais sobre a demanda diária de água para combinações com o parâmetro Nível do Reservatório.....	50
Tabela 7 Faixas de precipitações médias mensais .....	52
Tabela 8 Faixa para cada parâmetro considerado .....	55
Tabela 9 Número de bônus e multas obtido para o uso desregrado de água .....	63
Tabela 10 Consumos e custo com água da companhia para o uso desregrado de água da chuva com implantação posterior de reservatório .....	65
Tabela 11 Consumos e custo com água da companhia para o uso desregrado de água da chuva com reservatório já implantado .....	67
Tabela 12 Melhores combinações para um parâmetro .....	69
Tabela 13 Número de vezes do percentual 100 em cada faixa, para as 100 melhores combinações.....	70
Tabela 14 Melhores combinações para dois parâmetros .....	72
Tabela 15 Melhores regras com dois parâmetros para o ano crítico de 2014 .....	74
Tabela 16 Período do ano x Período do Mês (Regra 12).....	75
Tabela 17 Período do Ano x Chuva Futura para 3 Dias (Regra 13).....	75
Tabela 18 Divisão de faixas para regras com três parâmetros .....	77
Tabela 19 Melhores combinações para três parâmetros .....	78
Tabela 20 Melhores regras com três parâmetros para o ano crítico de 2014.....	81
Tabela 21 Período do Ano x Nível do Reservatório x Período do Mês (Regra 29).....	83
Tabela 22 Nível do Reservatório x Período do Ano x Chuva Futura (Regra 41) .....	84
Tabela 23 Período do Mês x Período do Ano x Chuva Futura (Regra 44) .....	85
Tabela 24 Chuva Futura x Período do Ano x Nível do Reservatório (Regra 46) .....	85
Tabela 25 Período do Ano x Chuva Futura x Período do Mês (Regra 53) .....	86
Tabela 26 Período do Ano x Chuva Futura x Consumo Acumulado de Chuva (Regra 54) .....	87
Tabela 27 Melhores combinações para quatro parâmetros.....	89
Tabela 28 Verificação das regras com quatro parâmetros no ano crítico de 2014 .....	91
Tabela 29 Período do Ano x Chuva Futura x Nível do Reservatório x Período do Mês (Regra 55).....	92
Tabela 30 Chuva Futura x Período do Mês x Período do Ano x Nível do Reservatório (Regra 62).....	92
Tabela 31 Período do Ano x Nível do Reservatório x Chuva Futura x Período do Mês x (Regra 64).....	93

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $P'$  – precipitação diária sintética (mm)
- $\mu$  – média da soma móvel de 31 dias da precipitação total diária (mm)
- $s$  – desvio padrão da soma móvel de 31 dias da precipitação total diária (mm)
- $g$  – coeficiente de assimetria da soma móvel de 30 dias da precipitação total diária (adimensional)
- $x'$  – variável aleatória normal padronizada (adimensional)
- $A$  – parâmetro ponderador do desvio padrão, assimetria e variável aleatória (adimensional)
- $B$  – parâmetro de ajuste das médias de longo período e dias chuvosos (adimensional)
- $P''$  – precipitação diária sintética com média corrigida (mm)
- $\mu'$  – média da soma móvel de 30 dias da precipitação sintética total diária (mm)
- $P_c$  – precipitação diária sintética com desvio padrão corrigido (mm)
- $s''$  – desvio padrão da soma móvel de 30 dias da precipitação sintética total diária com a média corrigida (mm)
- $\mu''$  – média da soma móvel de 30 dias da precipitação sintética total diária com a média corrigida (mm)
- $NWD$  – média, para cada dia do ano, do número de dias chuvosos na janela móvel de 31 dias, tendo sido o anterior seco
- $NWW$  – média, para cada dia do ano, do número de dias chuvosos na janela móvel de 31 dias, tendo sido o anterior chuvoso
- $NT$  – número total de dias da janela móvel, igual a 31
- $PWD$  – probabilidade, para cada dia do ano, de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior seco
- $PWW$  – probabilidade, para cada dia do ano, de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior chuvoso
- $S_{(t)}$  – volume de água da chuva no reservatório no tempo  $t$  (litros)
- $S_{(t-1)}$  – volume de água da chuva no reservatório no tempo  $t-1$  (litros)
- $Q_{(t)}$  – volume de chuva disponível no tempo  $t$  (litros)
- $P_{(t)}$  – precipitação diária (mm)
- $A_c$  – área de captação da cobertura ou telhado ( $m^2$ )
- $C_{chuva(t)}$  – consumo de água da chuva no tempo  $t$  (litros)
- $V$  – volume do reservatório fixado (litros)
- $C$  – coeficiente de escoamento superficial (adimensional)
- $C_{pot(t)}$  – consumo de água potável no tempo  $t$
- $D_{total(t)}$  – demanda total de água (potável e não potável) no tempo  $t$
- $NA_{(t)}$  – volume não atendido, correspondente ao volume diário de água da chuva que deveria ser consumido
- $D_{pot(t)}$  – demanda por água potável no tempo  $t$
- $D_{chuva(t)}$  – demanda por água da chuva no tempo  $t$
- $NG$  – nível de garantia de atendimento à demanda

## **LISTA DE SIGLAS**

ADASA – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal

ANA – Agência Nacional de Águas

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CAGECE – Companhia de Água e Esgoto do Ceará

CMR – Consumo Médio de Referência

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPTU – Imposto Predial e Territorial Urbano

NTU – Unidade de Turbidez Nefelométrica

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

PL – Programação Linear

PNL – Programação Não Linear

SAAC – Sistema de Aproveitamento de água da chuva

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SCE – Shuffled Complex Evolution – método de otimização global

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

UNICEF – Fundo das Nações Unidas para Infância

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 HIPÓTESE DE PESQUISA .....	2
1.2 JUSTIFICATIVA .....	3
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	3
1.3.1 Objetivo Principal.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>2 TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUA COMO MEIO DE COMBATER A CRISE HÍDRICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA.....	8
2.1.1 Benefícios e dificuldades do aproveitamento da água da chuva.....	9
2.1.2 Tipos de uso.....	10
2.1.3 Componentes de um sistema típico .....	11
2.1.3.1 Áreas de captação .....	12
2.1.3.2 Sistema de condução e descarte inicial .....	12
2.1.3.3 Sistema de tratamento/filtração .....	14
2.1.3.4 Reservatórios .....	14
2.2 TARIFAS DE CONTINGÊNCIA .....	15
2.2.1 O caso de São Paulo .....	15
2.2.2 Outros casos no Brasil .....	18
<b>3 OTIMIZAÇÃO DO USO DE ÁGUA DA CHUVA .....</b>	<b>20</b>
3.1 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS .....	20
3.2 OTIMIZAÇÃO NA ENGENHARIA .....	24
3.3 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO .....	26
3.3.1 Otimização determinística e aleatória.....	27
3.3.2 Programação Linear, Não Linear e Dinâmica .....	30
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
4.1 GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO.....	33
4.2 ANÁLISE DAS SÉRIES SINTÉTICAS PELO MÉTODO DE MONTE CARLO .....	38
4.3 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO.....	40
4.4 DESENVOLVIMENTO DE REGRAS DE USO DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO .....	42
4.4.1 Definição do volume do reservatório .....	44
4.4.2 Simulação das regras de uso .....	44
<b>5 APLICAÇÃO METODOLÓGICA .....</b>	<b>45</b>
5.1 CRITÉRIOS PARA O DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO.....	46
5.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA ELABORAÇÃO DAS REGRAS DE USO DE ÁGUA DA CHUVA.....	48
5.2.1 Regra considerando apenas o nível do reservatório.....	49
5.2.2 Regra considerando apenas o período do mês .....	50
5.2.3 Regra considerando apenas o período do ano.....	51
5.2.4 Regra considerando apenas a precipitação media mensal histórica.....	52
5.2.5 Regra considerando apenas o consumo acumulado de água da chuva .....	52
5.2.6 Regra considerando apenas a chuva futura.....	53
5.3 Período utilizado para criação das regras .....	56
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>58</b>
6.1 SÉRIES SINTÉTICAS GERADAS .....	58
6.2 DEFINIÇÃO DO VOLUME E NÍVEL DE ATENDIMENTO À DEMANDA .....	61
6.3 CENÁRIO COM IMPLANTAÇÃO DE RESERVATÓRIO NO PRINCÍPIO DA CRISE DE ABASTECIMENTO .....	64
6.4 CENÁRIO COM RESERVATÓRIO IMPLEMENTADO ANTES DO PERÍODO DE CRISE DE ABASTECIMENTO .....	66
6.5 REGRAS DE USO DE ÁGUA DA CHUVA .....	68
6.5.1 Regras com 1 parâmetro.....	68

6.5.2 Regras com 2 parâmetros .....	70
6.5.2.1 Período do Ano x Período do Mês.....	75
6.5.2.2 Período do Ano x Chuva Futura.....	75
6.5.3 Regras com 3 parâmetros .....	76
6.5.4 Regras com 4 parâmetros .....	88
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais importantes para a sociedade. As principais utilizações deste recurso nas atividades humanas são: transporte por meio da navegação, pesca, geração de energia em hidrelétricas, atividades de recreação e irrigação. Evidentemente, seu uso mais importante está relacionado ao consumo direto por parte dos seres vivos, que necessitam deste recurso para sua hidratação e higienização. Assim, é essencial a preservação da água pelos seres humanos.

A água é um recurso natural, que apesar de renovável, conta com limites de disponibilidade definidos. Dados do U. S. Geological Survey (2016) apontam que 96,5% da água disponível no Planeta Terra são de oceanos, 0,9% são de outras fontes salgadas e 2,5% correspondem à água doce, da qual apenas uma pequena parcela, de aproximadamente 0,3%, é encontrada em lagos e rios, de fácil acesso ao consumo humano. De acordo com Tundisi e Scheuenstuhl (2012), apesar da irregular distribuição de água em seu território, o Brasil é um dos países com a maior disponibilidade hídrica do mundo, contando com, aproximadamente, 12% de toda a água doce superficial disponível na Terra.

Apesar da quantidade de água no Planeta permanecer constante, com balanço permanente no ciclo hidrológico, o que deve ser levado em conta é a relação entre demanda e disponibilidade hídrica. Neste aspecto, diversos países do mundo, entre eles o Brasil, vêm enfrentando graves problemas, inclusive com déficits nessa relação em muitos casos. De acordo com a Organização das Nações Unidas (2015), é previsto um crescimento da ordem de 55% na demanda hídrica mundial até o ano de 2050, o que torna necessária a criação de medidas de conscientização e redução de consumo de água pela população.

No Brasil, a irregular distribuição natural da água entre as regiões, o aumento da concentração urbana e consequente aumento da demanda em locais cada vez mais distantes de mananciais, a má gestão dos recursos hídricos e a contaminação desses recursos em consequência da deficiência nos sistemas de tratamento de efluentes domésticos e industriais do País, aliados a períodos de reduzidos eventos de precipitação, têm afetado de maneira negativa o abastecimento de água, que passa por um período de escassez em diversas regiões. São Paulo, a maior metrópole do País, é um grande exemplo da atual crise hídrica, tendo enfrentado

sérios problemas de abastecimento entre 2014 e 2016, período no qual o baixo nível, principalmente, do Sistema Cantareira, não foi suficiente para atender à demanda da cidade.

Tendo em vista o cenário de crise hídrica atual, torna-se oportuno o incentivo ao uso consciente e racional da água por parte da população. Uma maneira de aumentar a disponibilidade deste bem é captar e utilizar a água da chuva para determinadas atividades domésticas cotidianas, com fins não potáveis, como por exemplo: limpeza de pisos e passeios, irrigação de hortas e jardins, lavagem de veículos e descargas de bacias sanitárias. As companhias de saneamento, por sua vez, também adotam medidas para reduzir o consumo de água pela população, utilizando-se de técnicas como tarifas de contingência aplicadas sobre o consumo de água tratada. Tais tarifas são aplicadas, normalmente, em períodos de escassez, com o objetivo de cobrir custos adicionais decorrentes das companhias de abastecimento, por meio de multas que penalizem excessos no consumo de água e, em alguns casos, descontos que bonifiquem reduções.

Dessa forma, o presente trabalho investiga a influência do manejo de água da chuva, armazenada em reservatório, no custo da conta do consumidor final com abastecimento de água, tendo em vista a adoção de sistemas de tarifas de contingência e bonificação por parte das concessionárias, de maneira a incentivar o uso de sistemas de aproveitamento de água da chuva. Para isso, a primeira etapa do trabalho é destinada à revisão bibliográfica, contendo dois capítulos nos quais serão abordadas as técnicas de redução de consumo de água utilizadas neste estudo e apresentadas informações referentes à operação de reservatórios e métodos de otimização e simulação. A segunda etapa é destinada à metodologia de trabalho, na qual serão apresentados os passos necessários para atingir-se o objetivo deste estudo, focados no estabelecimento de regras de uso de água da chuva armazenada em reservatórios. Por fim, tais regras serão apresentadas e discutidas, junto com os demais resultados obtidos com o trabalho.

## 1.1 HIPÓTESE DE PESQUISA

O estabelecimento de regras de uso de água da chuva armazenada em reservatórios, considerando a aplicação de tarifas de contingência impostas por companhias de saneamento, possibilita benefícios econômicos aos usuários.

O problema de pesquisa é: investigar diferentes estratégias para o manejo do estoque de água de chuva armazenada, visando à obtenção do máximo benefício econômico, do ponto de vista do consumidor final, considerando tarifas de contingência impostas por companhias de saneamento sobre o consumo de água potável.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A crise hídrica é uma realidade para diversas regiões do Brasil, e o uso de técnicas como o aproveitamento de água da chuva torna-se oportuno para a redução do consumo de água potável no país ao utilizar a água pluvial em usos menos nobres. Ao mesmo tempo, com a reduzida disponibilidade de água para distribuição e o elevado custo de tratamento d'água de mananciais poluídos, as companhias de saneamento buscam, em alguns casos, a redução do consumo de água pelo usuário final por meio de medidas como a implantação de tarifas de contingência ou o próprio aumento do preço da tarifa de água. Definir regras de uso de água da chuva, visando à redução do consumo de água potável com benefício econômico ao consumidor final, pode ser uma medida alternativa vantajosa para estes casos.

## 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.3.1 Objetivo Principal

Verificar se o uso regrado da água da chuva proporciona ganhos econômicos ao consumidor, considerando tarifas de contingência impostas por companhias de saneamento sobre o consumo de água potável, de forma a constituir incentivo ao aproveitamento de água da chuva.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Como ganhos adicionais desta pesquisa, contempla-se:

- a) definição do limite mínimo do nível de atendimento à demanda do sistema de aproveitamento de água da chuva (que possibilite obter benefícios



econômicos) e limite máximo (a partir do qual não se tem benefícios marginais significativos);

- b) avaliação da influência de regras de uso de água da chuva, baseadas em tarifas de contingência, sobre o consumo de água da companhia de saneamento, em comparação com o seu uso desregrado;
- c) avaliação dos custos com água tarifada sem aproveitamento de água da chuva, com o uso desregrado de água da chuva e com a adoção das regras de uso;
- d) comparação de consumos e custos entre cenários com reservatórios implementados anterior e posteriormente à períodos de aplicação de tarifas de contingência;
- e) avaliação do benefício de utilizar chuvas futuras para o estabelecimento da regra de uso.

## 2 TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUA COMO MEIO DE COMBATER A CRISE HÍDRICA

Apesar da grande disponibilidade hídrica presente no Brasil, eventualmente, o País passa por períodos de dificuldades em relação ao abastecimento de água potável, que pode ser explicado, em parte, por problemas naturais ligados às diferenças climáticas entre regiões do País, tendo como consequência, por exemplo, o histórico de seca enfrentado pela região Nordeste. Nas Tabela 1 e 2, são retratadas as diferenças existentes entre oferta e demanda de água para as diferentes regiões do Brasil.

Tabela 1 Relação entre demanda e disponibilidade de água no Brasil

Divisão Hidrográfica Nacional	Disponibilidade (m <sup>3</sup> /s)	Demanda (m <sup>3</sup> /s)	Relação Demanda / Disponibilidade (%)	Classificação
Amazônica	73.748	47	0,06	Excelente
Atlântico Leste	305	68	22,30	Crítica
Atlântico Nordeste Ocidental	328	15	4,57	Excelente
Atlântico Nordeste Oriental	91	170	186,81	Muito crítica
Atlântico Sudeste	1.108	168	15,16	Preocupante
Atlântico Sul	671	240	35,77	Crítica
Paraguai	785	19	2,42	Excelente
Paraná	5.792	479	8,27	Confortável
Paraíba	379	19	5,01	Confortável
São Francisco <sup>1</sup>	1.886	166	8,80	Confortável
Tocantins-Araguaia	5.362	55	1,03	Excelente
Uruguai	565	146	25,84	Crítica

(fonte: BICUDO *et al.*, 2010)

<sup>1</sup> Desde 2012, a situação da Bacia do São Francisco vem se alterando, devido às condições hidrológicas desfavoráveis, com vazões e precipitações abaixo da média, reduzindo os níveis de armazenamento de seus reservatórios e, por consequência, as vazões liberadas por reservatórios como os de Xingó e Sobradinho, de modo a garantir o atendimento para diversos usos, incluindo o abastecimento de cidades da Região Metropolitana de Aracaju, por exemplo. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017).

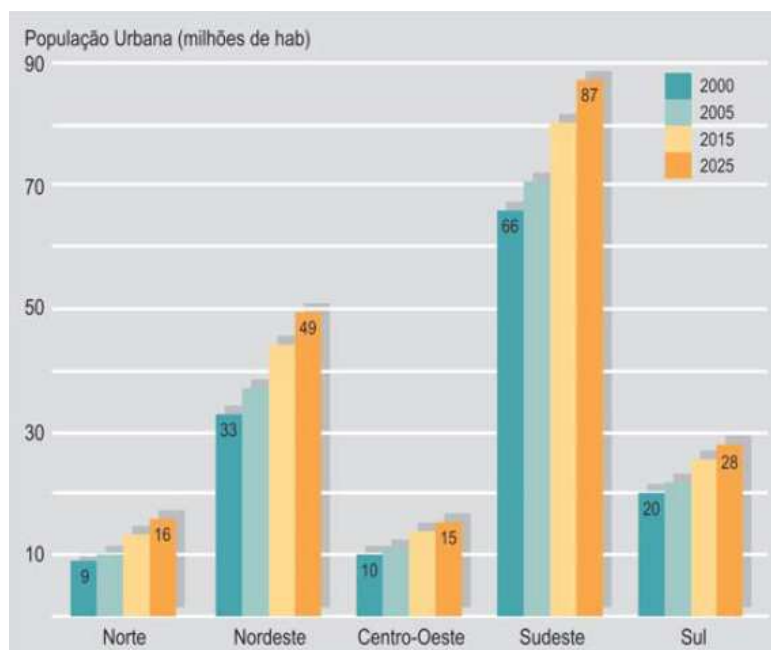
Tabela 2 Classificação da disponibilidade hídrica no Brasil

Classificação da ONU	Disponibilidade Hídrica (m³/hab.ano)	Disponibilidade por região (m³/hab.ano)
Abundante	Maior que 20.000	Brasil (35.000)
Correta	Entre 2.500 e 20.000	Paraná (12.600)
Pobre	Entre 1.500 e 2.500	Estado de São Paulo (2.209)
		Estado de Pernambuco (1.270)
Crítica	Menor que 1.500	Bacia do Piracicaba (408)
		Bacia do Alto Tietê (200)

(fonte: SABESP, 2017)

Um dos principais fatores responsáveis pela crise hídrica enfrentada atualmente é o crescimento populacional das últimas décadas (Figura 1, com projeção para 2025), pois, ao contrário da demanda, que mostra um histórico com tendência de crescimento significativo, a oferta de água disponível no Planeta permanece constante.

Figura 1 Evolução da população urbana por região (2000 a 2025)



(fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2010)

O principal problema, contudo, relaciona-se aos efeitos oriundos do intenso crescimento populacional e a falta de planejamento das cidades em lidar com a situação. Urbanização,

desmatamentos e modificações de uso do solo também são responsáveis pela crise hídrica no País, pois afetam o balanço hídrico natural da região.

De acordo com a Organização das Nações Unidas (2015), no futuro, a crise hídrica tende a se agravar, e o mundo deverá enfrentar um grave déficit global de água, caso o equilíbrio entre demanda e oferta não seja restaurado. A Agência Nacional de Águas (2010) estima que, entre 2005 e 2025, as demandas médias de água por parte da população urbana brasileira terão crescimento na ordem de 28%. O crescimento projetado para cada região é apresentado na Tabela 3. A Organização das Nações Unidas (2015), por sua vez, projeta um aumento da demanda hídrica mundial da ordem de 55% entre 2015 e 2050.

Tabela 3 Demandas médias para abastecimento urbano (m<sup>3</sup>/s)

Ano	Norte	Nordeste	Centro Oeste	Sudeste	Sul	Brasil
2005	34	115	33	247	65	494
2015	45	136	39	275	75	570
2025	54	151	44	298	83	630

(fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2010)

A atual crise hídrica e os futuros cenários de aumento na escassez de água no Brasil e no mundo tornam necessária, dentre outras medidas, a redução do consumo de água por parte da população. Em termos residenciais, há diversas formas de se reduzir o consumo de água potável, sendo o reaproveitamento de águas cinzas, oriundas de determinadas atividades domésticas, uma das principais alternativas. De acordo com Hespanhol (2010), a utilização de águas cinzas pode levar a reduções significativas do custo referente ao consumo de água, que variam conforme as características do projeto. O autor cita, como exemplo, reduções no consumo de água da ordem de 25 a 35% para sistemas projetados para atender apenas a descargas sanitárias em uma residência. Quando utilizada para outros fins, como lavagem de pisos e veículos, resfriamento de ar condicionado e irrigação de jardins, a economia de água pode chegar a 70 ou 80%.

Outra técnica atualmente disponível é o uso de dispositivos poupadores de água. Sautchuk (2010) cita uma série desses dispositivos, entre eles: torneiras com arejadores, registro regulador de vazão, válvula de descarga automática para mictórios, bacia sanitária com caixa acoplada e acionamento alternativo para descarga com volume reduzido, torneiras hidromecânicas e torneiras eletrônicas com fechamento automático. A autora ainda cita a

medição individualizada como um meio de incentivar os usuários a reduzirem o consumo de água, visto que proporciona a observação e monitoramento da economia gerada pelos dispositivos.

Incentivos fiscais também têm sido utilizados pelo Governo brasileiro com o objetivo de reduzir o consumo de água da população. Segundo Mielki (2011), dentre diversas medidas sustentáveis, a instalação de sistemas de captação de água da chuva e reaproveitamento de águas cinzas nas edificações é incentivada por meio de descontos no valor do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU). Esse incentivo, denominado IPTU Verde, vem sendo adotado em diversos municípios brasileiros, inclusive em capitais como Curitiba, Florianópolis, Goiânia, Manaus, Rio de Janeiro e Salvador.

O aproveitamento de água da chuva e a aplicação de tarifas de contingência por companhias de saneamento também são métodos adotados para redução do consumo de água. Por se tratarem das duas técnicas alvo deste trabalho, serão apresentadas de maneira mais detalhada nos próximos itens.

## 2.1 APROVEITAMENTO DE ÁGUA DA CHUVA

Atualmente, diversos países do mundo têm o aproveitamento de água da chuva como um importante meio de suprir a crescente demanda por água, com destaque para Estados Unidos, Japão, China, Índia, Alemanha e Austrália (CHE-ANI et al., 2009). Dornelles (2012) verificou que grande parte dos locais que utilizam a água da chuva concentra-se em regiões com precipitações anuais baixas, geralmente inferiores a 1.000 mm/ano, nas quais o principal objetivo é armazenar água suficiente para épocas de estiagem. O autor ainda cita que, para países desenvolvidos, a principal motivação do uso está relacionada a benefícios ambientais.

Tomaz (2007, p. 2) também lista uma série de motivos e circunstâncias que levam à adoção da água da chuva:

[...] conscientização e sensibilidade da necessidade da conservação da água; região com disponibilidade hídrica menor que 1200 m<sup>3</sup>/habitante x ano; elevadas tarifas de água das concessionárias públicas; retorno dos investimentos (*payback*) muito rápido; instabilidade do fornecimento de água pública; exigência de lei específica; locais onde a estiagem é maior que 5 meses [...].

No Brasil, o aproveitamento de água da chuva vem ganhando importância, fato comprovado pelo projeto de Lei Federal Brasileira nº 324, de 2015, que prevê a obrigatoriedade da inclusão de itens referentes à captação de águas pluviais para projetos de novas construções residenciais, comerciais e industriais, sejam públicas ou privadas (SENADO FEDERAL, 2015).

### **2.1.1 Benefícios e dificuldades do aproveitamento da água da chuva**

O uso da água da chuva pode ser muito vantajoso em termos sociais, econômicos e ambientais. CHE-ANI et al. (2009) citam diversos benefícios de seu aproveitamento aos usuários, governantes e meio ambiente, dentre eles:

- usuários,
  - - a água da chuva é uma fonte relativamente limpa, independente e ampla;
  - - o sistema de coleta da água da chuva utiliza tecnologia simples, barata e fácil de manter;
  - - gera benefícios econômicos ao reduzir o volume de água comprada de sistemas públicos;
  - - evita transtornos com a interrupção de sistemas centralizados de água;
- governantes,
  - - reduz os custos com a construção de novas redes de abastecimento de água;
  - - evita custos de acesso a sistemas públicos quando estes não são economicamente viáveis;
- meio ambiente,
  - - reduz o risco de inundações com a modificação do tempo de escoamento direcionado aos sistemas de drenagem;
  - - as plantas prosperam melhor com água da chuva do que com água oriunda de outras fontes que contenham compostos químicos prejudiciais ao solo.
- 

Dornelles (2012) aponta os benefícios econômicos do aproveitamento de água da chuva como o mais notável, devido à redução do consumo de água tarifada e à facilidade de sua mensuração. O autor salienta, entretanto, que a estimativa do benefício é específica para cada local de aproveitamento, variando, inclusive, com as características do sistema, o que dificulta a generalização de resultados.

De acordo com Dornelles (2012), esses benefícios vêm gerando um interesse cada vez maior no aproveitamento de água da chuva no meio urbano, o que pode ser constatado com o surgimento de regulamentações governamentais e a comercialização de produtos específicos deste ramo no mercado nacional. Heijnen (2012, p. 11) complementa:

A água de chuva é um recurso valioso, que deve ser explorada da forma mais eficiente para proteger a saúde das pessoas e meios de sobrevivência. Para garantir uma boa utilização e conservação dos recursos hídricos, governos deveriam incluir a captação de água de chuva em suas políticas de gestão de recursos hídricos.

Contudo, algumas dificuldades são encontradas em relação ao aproveitamento de água da chuva, ligadas, principalmente, a sua contaminação. Cardoso (2009) cita quatro pontos principais relacionados a dificuldades na aplicação do sistema: captação e descarte incorreto das primeiras chuvas; reservatórios fechados de forma incorreta, gerando a proliferação de algas e mosquitos; tratamento insuficiente para usos mais nobres; e uso de recipientes inadequados para a coleta da água de reservatórios (como o que ocorre na zona rural do semi árido brasileiro).

### **2.1.2 Tipos de uso**

O aproveitamento de água da chuva pode ser classificado, basicamente, em duas categorias, de acordo com sua forma de captação: no solo ou em telhados. A primeira se relaciona às águas pluviais que são coletadas em lagoas ou pequenas represas antes de chegarem ao rio ou riacho em que deságuam. A segunda, mais utilizada, envolve o armazenamento da água que cai sobre uma cobertura ou telhado antes que a mesma chegue ao solo. (WHITE et al., 2007).

Helmreich e Horn (2009) comentam a respeito da qualidade da água da chuva, que, nos centros urbanos, é afetada pelo alto tráfego de veículos e poluição oriunda de indústrias, o que faz com que partículas de poluentes do ar contaminem a água ainda na atmosfera.

Todos os possíveis poluentes presentes na água da chuva fazem com o que seu uso destine-se, principalmente, para fins não potáveis. Tomaz (2007) lista diversas finalidades do aproveitamento de águas pluviais para esses fins, como: descargas em bacias sanitárias; irrigação de gramados por aspersão ou gotejamento e plantas ornamentais; lavagem de veículos; limpeza de passeios e ruas; limpeza de pátios; espelhos d'água, entre outros.

Apesar do uso de água da chuva se destinar, principalmente, para fins não potáveis, muitas pessoas a tem como sua principal fonte de abastecimento. Heijnen (2012) aponta que um relatório da Organização Mundial da Saúde (OMS) em parceria com o Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) mostrou que 1,3% da população mundial utilizam a água da chuva como a principal fonte para uso doméstico. Isso ocorre principalmente em locais de difícil acesso da água canalizada, como zonas rurais ou montanhosas, ilhas e regiões semi áridas.

Helmreich e Horn (2009) minimizam os problemas de sua utilização para fins potáveis em zonas rurais, citando que em regiões afastadas da poluição atmosférica e industrial, a água da chuva é relativamente limpa, com exceção para alguns gases dissolvidos.

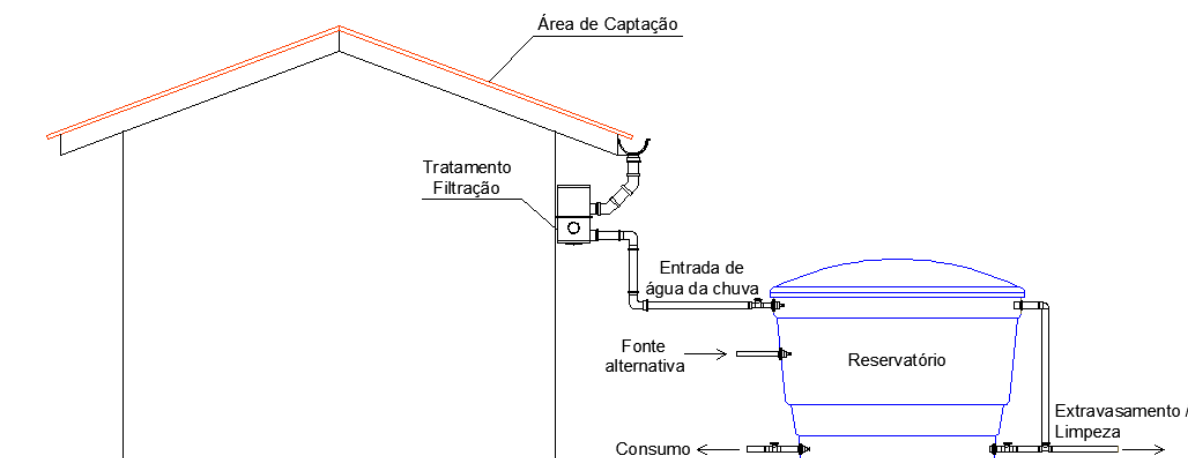
### **2.1.3 Componentes de um sistema típico**

Um sistema de captação de água da chuva típico é composto, basicamente, por quatro componentes principais, conforme apresentado na Figura 2.

- superfície de captação, normalmente telhados ou lajes de cobertura;
- sistema de condução da água, formado por calhas e tubulações;
- sistema de filtração ou tratamento, baseado normalmente em grades ou filtros que evitam a entrada de sólidos, depositados em telhados e calhas, no reservatório;
- reservatório para armazenamento da água.



Figura 2 Sistema típico de captação de água da chuva



### 2.1.3.1 Áreas de captação

O local de captação de água da chuva tem influência direta no volume e na qualidade de água direcionada ao reservatório. Para telhados, White et al. (2007) recomendam a utilização de materiais lisos e não porosos, visando a uma melhor eficiência do sistema, proporcionada pela menor absorção de água e redução de micróbios e detritos acumulados em materiais mais porosos. Os autores sugerem, ainda, telhados com grandes inclinações, por dificultarem o acúmulo de detritos em intervalos entre chuvas.

Heijnen (2012) comenta sobre a maior capacidade de escoamento em telhas metálicas de ferro galvanizado, normalmente superior a 90%, em relação a telhas cerâmicas. Ressalta-se, contudo, que tal análise leva em conta apenas o aspecto relacionado ao escoamento, desconsiderando outros aspectos relacionados, por exemplo, ao conforto térmico proporcionado pelo tipo de cobertura da edificação.

### 2.1.3.2 Sistema de condução e descarte inicial

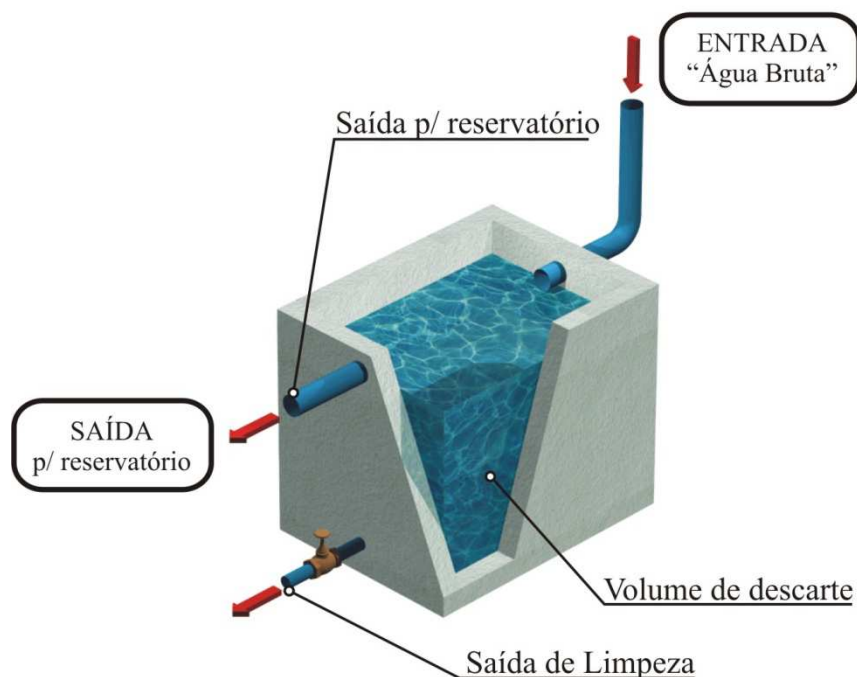
O sistema de condução da água da chuva envolve, basicamente, calhas e tubulações, que direcionam a água captada em telhados ao reservatório. A acidez normalmente presente na água da chuva a torna mais corrosiva em relação a outras fontes de água potável. Dessa forma, é recomendável que o abastecimento do reservatório seja realizado por meio de tubos de PVC, menos suscetíveis à corrosão. Tubulações de cobre devem ser evitadas pelo mesmo motivo (WHITE et al., 2007).

Junto às tubulações, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007) – NBR 15.527 – recomenda a instalação de dispositivos que evitem a entrada de detritos no reservatório, como grades e telas instaladas nas calhas.

Outro ponto importante citado pela NBR 15.527 é o descarte da primeira chuva. Também conhecido como *first flush*, trata-se de um pequeno sistema instalado entre a área de captação e o reservatório, com o objetivo de descartar os primeiros milímetros de chuva, que normalmente contêm poeira, contaminantes químicos e matéria orgânica acumuladas no telhado em períodos de seca e que não conseguem ser absorvidos por grelhas ou filtros.

De acordo com White et al. (2007), existem dois tipos de desviadores de *first flush*: o primeiro desvia um volume fixo de água antes que o reservatório comece a encher e o outro começa a direcionar água para o reservatório somente depois que a taxa de precipitação atinja um certo nível. Segundo Dornelles (2012), o volume de descarte pode ser armazenado em reservatórios de pré-tratamento com dimensões proporcionais a área de captação (Figura 3). Na falta de dados, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007) recomenda o descarte mínimo de dois milímetros da precipitação inicial.

Figura 3 Exemplo de reservatório de pré-tratamento para descarte da precipitação inicial



(fonte: Dornelles, 2012)

### 2.1.3.3 Sistema de tratamento/filtração

Diversos são os fatores que contribuem para o tratamento da água bruta da chuva, a fim de torná-la apta ao uso não potável, como, por exemplo, a definição correta do material do telhado e o uso de dispositivos como telas e *first flush*, apresentados anteriormente. No entanto, em muitos casos, soluções complementares industrializadas são utilizadas para auxiliar na busca por padrões de qualidade urbanos de uso de água. Neste sentido, cresce o uso de filtros acoplados aos condutores verticais, com capacidade para reter e eliminar partículas de sujeira (MANO, 2004).

Como alternativa para soluções comerciais, Dornelles (2012) menciona os dispositivos artesanais, como, por exemplo, filtros de areia, que têm como característica a sua fabricação no próprio local da obra, a partir de materiais comuns de construção e de instalações hidráulicas. Helmreich e Horn (2009) incluem a cloração como uma prática importante para a desinfecção da água, mesmo para uso não potável, possibilitando a eliminação da maioria dos micro-organismos a um custo relativamente baixo.

Para White et al. (2007), é difícil que um único processo seja capaz de promover a proteção completa contra todos os patógenos, mesmo visando usos não potáveis. O autor aconselha a combinação de sistemas de filtração e desinfecção, como meio de obter resultados mais satisfatórios.

### 2.1.3.4 Reservatórios

De acordo com Mano (2004), o reservatório tem grande representatividade no custo total de um sistema de aproveitamento de água da chuva (SAAC), e a definição correta de fatores como localização, material e volume, são fundamentais para atingir-se um sistema eficiente.

Em relação à localização, Tomaz (2007) cita que os reservatórios podem ser: enterrados, semi-enterrados, apoiados ou elevados. Reservatórios elevados tem como vantagem a dispensa de um sistema de bombeamento para a água coletada, porém, em muitos casos, a falta de espaço ou necessidade de estruturas de sustentação acaba por inviabilizá-los. Helmreich e Horn (2009) sugerem um ambiente adequado que evite a contaminação por ações humanas, de animais ou outros contaminantes ambientais, além de tampa com vedação capaz de evitar, por exemplo, a proliferação de insetos.

Quanto ao material utilizado na construção do reservatório, Tomaz (2007) menciona concreto, alvenaria armada, polietileno, PVC, fibra de vidro e aço inox como alguns dos materiais mais utilizados, sendo que todos devem impedir a entrada da luz solar.

Por fim, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007, p. 7) recomenda que “O volume dos reservatórios deve ser dimensionado com base em critérios técnicos, econômicos e ambientais, levando em conta as boas práticas da engenharia [...]”. No capítulo 4, o dimensionamento dos reservatórios será abordado de forma mais detalhada.

## 2.2 TARIFAS DE CONTINGÊNCIA

As tarifas de contingência são mecanismos adotados, principalmente nos setores públicos relacionados à água, eletricidade e gás, como meio de combater determinada crise de abastecimento em algum destes. Basicamente, são sobretaxas cobradas a partir de um consumo excessivo do serviço em questão, incentivando os usuários a reduzirem tal consumo. No Brasil, as tarifas de contingência são regulamentadas pela Lei Federal nº 11.445 (BRASIL, 2007), que em seu Artigo 46 dispõe:

Em situação crítica de escassez ou contaminação de recursos hídricos que obrigue à adoção de racionamento, declarada pela autoridade gestora de recursos hídricos, o ente regulador poderá adotar mecanismos tarifários de contingência, com objetivo de cobrir custos adicionais decorrentes, garantindo o equilíbrio financeiro da prestação do serviço e a gestão da demanda.

### 2.2.1 O caso de São Paulo

No setor de abastecimento de água, um dos principais exemplos de utilização desse mecanismo foi a aplicação de tarifas de contingência pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) com o objetivo de combater a crise hídrica enfrentada no Estado entre 2014 e 2016, período no qual o Sistema Cantareira, reservatório responsável pelo abastecimento de grande parte da região metropolitana de São Paulo, atingiu os níveis mais baixos da história.

A aplicação da tarifa de contingência, que teve início em fevereiro de 2015 e se estendeu até abril de 2016, se baseava no pagamento de “multas” por usuários que apresentassem um

consumo de água mensal superior ao Consumo Médio de Referência (CMR), correspondente à média de consumo do usuário entre fevereiro de 2013 e janeiro de 2014. Ao mesmo tempo, por meio do Programa de Incentivo à Redução do Consumo de Água, aquelas pessoas que reduzissem o seu consumo mensal em relação à média do ano anterior, se beneficiariam com bônus aplicados sobre as tarifas. Os valores das multas e bônus, que variavam de acordo com o consumo mensal, são apresentados na Figura 4.

Figura 4 Tarifas de contingência pela SABESP



(fonte: SABESP, 2016)

De acordo com dados da SABESP (2016), a economia mensal de água, no período de vigência do Programa, proporcionou uma redução da retirada de água dos reservatórios que abastecem a região da ordem de cinco a seis mil litros por segundo, o que corresponde a um volume economizado que varia entre 13 e 15 bilhões de litros de água por mês. A Tabela 4 apresenta os valores mensais dos bônus adquiridos e multas pagas pela população durante o Programa.

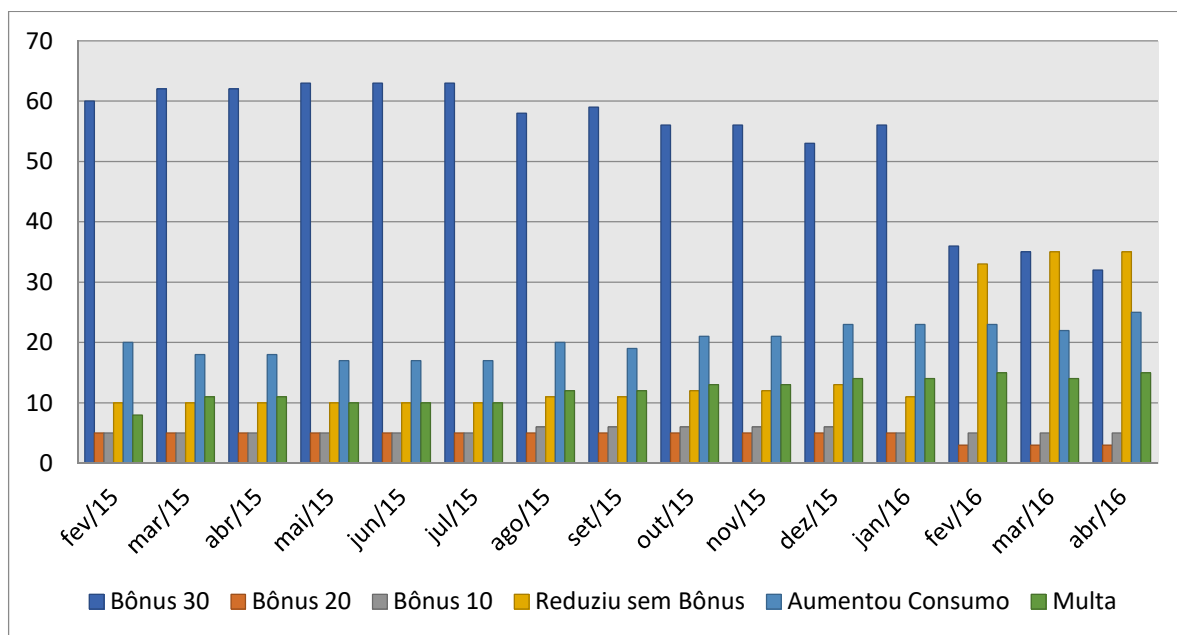
Tabela 4 Valores resultantes da aplicação de bônus e multas pela Sabesp, em milhões de reais

Mês	Ano 2015		Ano 2016	
	Bônus	Multa	Bônus	Multa
Janeiro	67,6	-	79,4	49,6
Fevereiro	69,1	34,2	36,3	50,8
Março	74,5	45,1	38,1	60,2
Abril	77,5	44,6	33,6	64,1
Maiο	74,3	38,6	-	-
Junho	79,2	39,8	-	-
Julho	85,5	51,4	-	-
Agosto	81,8	45,9	-	-
Setembro	81,6	47,4	-	-
Outubro	78,7	51,2	-	-
Novembro	75,0	46,8	-	-
Dezembro	81,3	54,6	-	-
<b>Total</b>	<b>926,1</b>	<b>499,6</b>	<b>187,4</b>	<b>224,7</b>

(fonte: adaptado de SABESP, 2016)

Ainda de acordo com a Companhia, no mês de maior aquisição de bônus por parte da população, julho de 2015, a economia de água chegou a 6,5 m<sup>3</sup>/s, correspondendo à produção média mensal dos sistemas Rio Grande, Alto Cotia e Ribeirão da Estiva, que abastecem a Região Metropolitana de São Paulo. Esta redução é suficiente para abastecer dois milhões de pessoas. A Figura 5 apresenta os percentuais de aquisição de bônus e multas ao longo da vigência do Programa em São Paulo.

Figura 5 Percentual de bônus e multa aplicados no Programa de Incentivo à Redução do Consumo de Água



(fonte: adaptado de SABESP, 2016)

## 2.2.2 Outros casos no Brasil

Outro estado brasileiro no qual foram adotadas tarifas de contingência é o Ceará. De acordo com informações da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), no final de 2015, quase todos os 153 reservatórios que abastecem o estado estavam com o seu volume abaixo de 30% do volume total, com destaque para o açude Castanhão, principal fonte de abastecimento da cidade de Fortaleza, que contava com menos de 10% de seu volume total.

Este cenário levou à necessidade da adoção, em dezembro de 2015, da tarifa de contingência que, atualmente, estabelece como meta a redução de 20% do consumo de água do consumidor em relação a sua média anual. Quando a meta não é atendida, cobra-se um adicional de 120% sobre o volume excedido.

Dados da CAGECE (2016) mostram que, entre janeiro e novembro de 2016, observou-se uma redução de 12,7% no consumo de água em Fortaleza e Região Metropolitana, em relação a 2014, o que corresponde a um volume de dezoito milhões de metros cúbicos, suficientes para abastecer a capital do estado por dois meses. Ainda assim, 23,16% dos usuários tiveram a

cobrança da tarifa de contingência em suas contas por não conseguirem atingir a meta de redução.

Recentemente, o Distrito Federal também adotou a tarifa de contingência como meio de motivar a redução do consumo de água pela população. A adoção do mecanismo, por parte da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), teve início em outubro de 2016, em função do baixo nível de água observado no Reservatório do Descoberto, um dos principais mananciais de abastecimento da região. De acordo com a CAESB (2017), a tarifa de contingência se baseia na aplicação de taxas de 40% (para a categoria residencial normal) e de 20% (para as categorias popular, comercial, industrial e pública) sobre a tarifa normal de água, para usuários que tenham um consumo mensal de água superior a 10 mil litros. A tarifa é temporária, tendo início quando o nível de um dos reservatórios (Descoberto ou Santa Maria) atingir 25% do volume útil, e término quando os mesmos atingirem níveis que garantam a segurança hídrica no Distrito Federal, conforme entendimento da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA, 2016).



### **3 OTIMIZAÇÃO DO USO DE ÁGUA DA CHUVA**

Conforme apresentado no capítulo anterior, a utilização da água da chuva para fins não potáveis é uma das principais medidas de combate à crise hídrica. Todavia, sua oferta se dá de maneira relativamente aleatória e sazonal, o que torna desejável o armazenamento de grandes volumes de água, em eventos de precipitação, visando o seu aproveitamento também em épocas de estiagem. Neste aspecto, é essencial o correto dimensionamento dos reservatórios, buscando-se o volume ótimo, que consiga aliar um nível de atendimento à demanda satisfatório com custos de instalação e aquisição não muito elevados.

Além da determinação do volume ótimo do reservatório, outro ponto que deve ser considerado, tendo em vista o melhor aproveitamento da água ao longo do tempo, principalmente em termos econômicos, é a operação do reservatório, ou seja, a otimização do uso da água a partir da determinação dos volumes que podem ser utilizados em determinado dia ou período. De acordo com Mélló Jr e Matos (1999, p. 5) “A aplicação de técnicas de pesquisa operacional vem, cada vez mais, sendo utilizada na análise de sistemas de recursos hídricos, devido à sua elevada capacidade de determinar decisões ótimas sob vários aspectos.”.

Sendo assim, neste capítulo, serão apresentadas e discutidas informações referentes ao dimensionamento e operação de reservatórios, assim como técnicas de otimização. Entretanto, salienta-se que as informações a serem apresentadas, relativas à operação de reservatórios, referem-se, em sua grande maioria, a reservatórios de grande porte, tendo em vista a reduzida abordagem da literatura relacionada a reservatórios de pequeno porte.

#### **3.1 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS**

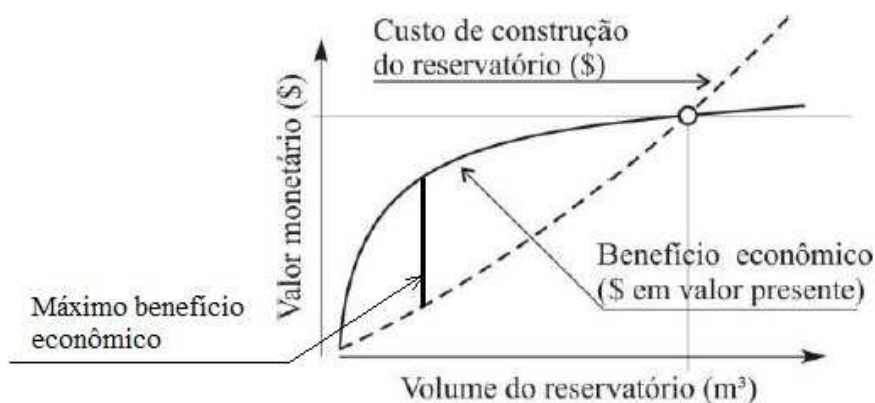
O dimensionamento de um reservatório de água da chuva está baseado na busca do volume ideal que permita o armazenamento de água em períodos chuvosos visando o seu uso, não apenas nestes períodos, mas também em épocas de escassez. A definição desse volume apresenta como uma de suas premissas que os custos de instalação tenham seu retorno

financeiro do investimento pela economia de água tarifada no menor tempo possível. Neste aspecto, Dornelles (2012, p. 10) comenta:

Grandes reservatórios extravasam menos, aumentando, assim, o volume de água de chuva aproveitado e, causando a redução dos gastos do consumo de água tarifada e, conseqüentemente, reduzindo também o tempo para retorno financeiro. Mas o custo de construção do reservatório também cresce diretamente com o seu tamanho, exigindo assim uma busca pelo ponto ótimo, onde o benefício em valor presente, para um determinado tempo para retorno financeiro seja desejável, se igualando ao custo de construção.

A Figura 6 exemplifica esta ideia, para o qual o volume correspondente à maior distância vertical entre as curvas apresenta a melhor relação custo benefício. Outro ponto importante do gráfico é o cruzamento entre as curvas, a partir do qual o acréscimo de volume não acarreta em benefícios econômicos, quando considerado o custo de construção do reservatório. Ressalta-se, porém, que os reservatórios podem assumir objetivos diversos e, em alguns casos, conflitantes, fazendo com que a curva de benefício econômico possa assumir diferentes formas e descontinuidades.

Figura 6 Benefício econômico e custo de construção em função do volume do reservatório



fonte: (DORNELLES, 2012)

Por sua vez, a otimização da operação de um reservatório busca definir o volume ou vazão de descarga a ser liberada, visando à maximização ou minimização de uma função objetivo, sujeita a equações de restrições (MÉLLO JR; MATOS, 1999).

No desenvolvimento de um sistema de aproveitamento de água da chuva, a área de captação e a capacidade de armazenamento são dois parâmetros de entrada principais, para as quais a

saída é a quantidade de água fornecida. Entretanto, Liaw e Tsai (2004) citam outros parâmetros, também fundamentais para tornar a água da chuva disponível ao menor custo, como:

- regra de liberação de água;
- intervalo usado na simulação;
- registro de dados de precipitação pluviométrica;
- coeficiente de escoamento.

Dentre esses fatores, a regra de liberação de água, muitas vezes, é desconsiderada na concepção de um SAAC, principalmente quando se trata de pequenos reservatórios. Apesar de tratar de reservatórios com maior porte, e para fins de geração de energia e controle de cheias, Bravo (2006) ajuda a explicar a dificuldade na análise da operação de um reservatório, citando as características estocásticas do processo hidrológico, a quantificação e definição dos objetivos, e a necessidade de um processo sequencial de decisões como alguns dos fatores complicadores. Outra dificuldade, comentada por Labadie (2004), se refere à maior complexidade dos recentes modelos de otimização em relação a métodos de simulação existentes, o que faz com que muitos operadores sejam céticos quanto a modelos que pretendem substituir seu julgamento e prescrever estratégias de solução.

Neste sentido, WURBS (1993) comenta que, apesar das diferentes características existentes entre métodos de simulação e otimização, a distinção entre os dois tipos de métodos é complexa, tendo em vista que todos os modelos de otimização realizam simulações de um sistema, enquanto que algoritmos de otimização são incorporados em muitos modelos de simulação de reservatórios. O autor explica que um modelo de simulação de sistemas de reservatórios pode reproduzir o desempenho hidrológico e econômico para determinada regra de operação, e são baseados em procedimentos de contabilidade do balanço de massa relacionado ao fluxo de água no reservatório. Em relação a modelos de otimização, o autor cita que os mesmos são formulados a fim de determinar valores para um conjunto de variáveis de decisão que desejam maximizar ou minimizar uma função objetivo sujeita a restrições, estando tais variáveis relacionadas a capacidade de armazenamento e outras características físicas relacionadas ao balanço de massa e outros propósitos.

Regras de operação são muito utilizadas em reservatórios de grande porte, projetados para atender com confiabilidade e eficiência às demandas de abastecimento de água, recreação,

geração de energia, meio ambiente e controle de inundações. Cabe aos operadores determinar quanto e quando liberar a água para tais demandas, tarefa dificultada por incertezas quanto a volumes de armazenamento e entradas futuras de água nos reservatórios. Tais incertezas fazem com que, em grande parte dos casos, a liberação da água em um reservatório seja realizada independentemente de previsões futuras, baseada apenas em volumes de armazenamento existentes e em períodos do ano (LOUCKS et al., 2005). Ou seja, em muitos casos, as decisões são baseadas em regras estabelecidas por simulação ou otimização, com base em dados físicos e demandas históricas. No entanto, o conhecimento do futuro, a cada decisão, pode agregar precisão e confiabilidade aos resultados.

Um fator que contribui de maneira significativa para o estabelecimento de regras de operação para um reservatório é o clima. Bravo (2010) considera que o conhecimento antecipado das condições climáticas tem importância fundamental para operadores de reservatórios, citando que a previsão de precipitação pode gerar benefícios econômicos a partir do melhor gerenciamento e operação de sistemas de recursos hídricos.

Outra dificuldade presente no estabelecimento de regras de operação para reservatórios são os possíveis conflitos existentes entre demandas. Como exemplo, Bravo (2006) estudou o conflito de interesse entre o controle de cheias e a geração de energia quando ambos são proporcionados por um mesmo reservatório. O autor explica que, para o controle de cheias, o reservatório deve manter-se no mais baixo nível possível, de modo que, em períodos chuvosos, o mesmo tenha capacidade de armazenar o volume de cheias e as vazões máximas sejam reduzidas. Ao mesmo tempo, níveis mais altos proporcionam uma maior produção de energia, além de garantir uma reserva de água em períodos de estiagem.

Estes conflitos também podem estar presentes nos sistemas de aproveitamento de água da chuva. Em uma residência, por exemplo, utilizar a água da chuva disponível em um reservatório para o suprimento de 100% da demanda (uso desregado) gera a maior redução do consumo de água das companhias de saneamento. Porém, o uso desregado pode não trazer o maior benefício econômico para os usuários ao longo do tempo, quando, por exemplo, tarifas de contingência ou bonificações mensais são aplicadas. Contribuindo com esta ideia, Bovo (2016) estudou a criação de regras de uso para água da chuva armazenada em um Shopping Center de São Paulo, para as quais os resultados mostraram que, em determinados

casos, não utilizar 100% da água armazenada é mais vantajoso em termos econômicos, visto que o volume poupado fica disponível para ser utilizado em períodos mais críticos.

De acordo com Lund e Ferreira (1996), à medida que conflitos e exigências sobre sistemas de reservatórios aumentam e se diversificam, cresce a importância da correta operação do reservatório. Para os autores, nestes casos, métodos de engenharia são necessários para auxiliar na resolução de demandas conflitantes, principalmente quando os recursos de armazenamento são limitados. Neste aspecto, Loucks et al. (2005) salientam que regras de liberação são normalmente derivadas de simulações de “tentativa e erro”, para as quais deve-se ter uma ideia aproximada do impacto esperado no desempenho do sistema.

No próximo item, serão apresentados alguns destes métodos de otimização, que auxiliam na criação de regras de operação para reservatórios.

### 3.2 OTIMIZAÇÃO NA ENGENHARIA

Em engenharia, a busca pela redução de custos, massa e consumo, aliada ao aumento de rendimento, produtividade e utilidade, por exemplo, é algo constante e presente nas mais diversas atividades. Cada problema, no entanto, fornece inúmeras possíveis soluções, cabendo ao engenheiro a busca pela melhor alternativa. O procedimento de procura por uma solução que forneça o máximo benefício, de acordo com algum critério, é denominado de otimização (BAZZO; PEREIRA, 2006). Em muitos casos, a otimização aparece na engenharia de forma implícita, sendo aplicada em projetos, por exemplo, por meio do julgamento, experiência e opinião de outros profissionais (PARKINSON et al., 2013).

Bazzo e Pereira (2006, p. 183) definem **ótimo** como “[...] a melhor solução para um problema, ou a condição mais favorável de um parâmetro, que pode aparecer de diferentes formas.” Os autores complementam, afirmando que o processo de otimização pode ser definido também como um procedimento para maximizar ou minimizar variáveis. Parkinson et al. (2013) contribuem com essa ideia, acrescentando outros dois critérios que, normalmente, deseja-se otimizar, e assumem a forma de funções objetivo e de restrição. Os autores definem as funções objetivo como metas que desejamos maximizar ou minimizar, enquanto as funções de restrição como limites ou valores alvos que devem ser satisfeitos.

Na área dos recursos hídricos, Cruz (2004) lembra que a aplicação de técnicas de otimização é utilizada, principalmente para o gerenciamento de reservatórios, dimensionamento de sistemas de abastecimento de água, obtenção de parâmetros em modelos hidrológicos, entre outros. Em relação a modelos hidrológicos, Duan et al. (1993) comentam que o grau de dificuldade em resolver um problema de otimização está ligado à existência de possíveis características da função objetivo, entre elas:

- a) grandes regiões de atração para as quais uma estratégia de pesquisa pode convergir;
- b) muitos mínimos locais em cada grande região de atração;
- c) descontinuidade das derivadas da superfície da função objetivo;
- d) existência de parâmetros com vários graus de sensibilidade e grande quantidade de interação;
- e) superfície de resposta próxima à verdadeira solução muitas vezes não convergente.

De acordo com Bazzo e Pereira (2006), dificilmente tem-se um problema estritamente técnico na engenharia, sendo que a busca por melhores soluções normalmente apresenta uma dimensão técnica e outra econômica. Para os autores, diversos aspectos como tempo, recursos financeiros e técnicos, questões sociais e políticas, entre outros, influenciam na resolução de um problema.

Neste sentido, Parkinson et al. (2013) citam que quando há um número elevado de variáveis a serem ajustadas, objetivos e restrições conflitantes, a otimização baseada apenas na experiência do engenheiro pode ser insuficiente para a identificação do projeto ideal, e métodos computacionais podem ser úteis para a resolução do problema. O autor traz como exemplo os problemas que envolvem quatro ou mais variáveis, que podem ser solucionados facilmente por meio de técnicas computacionais, apesar da dificuldade do ser humano em compreender espaços que contenham mais do que três dimensões.

Segundo Cruz (2004), dentre as diversas técnicas de otimização existentes, algumas são mais apropriadas à área dos recursos hídricos, por serem capazes de otimizar funções implícitas, trabalharem como problemas não completamente estruturados ou possibilitarem a análise de múltiplos objetivos com razoável tempo computacional. No entanto, Bazzo e Pereira (2006, p. 184) ressaltam que “[...] é utópico imaginar que na vida real sempre caberá aplicar modelos matemáticos típicos a todos os problemas que desejamos otimizar. Desafortunadamente,

existem casos em que a realidade é muito complexa, e os modelos usuais não têm capacidade de descrevê-la.”. Contudo, é importante salientar que o propósito de modelos não é descrever toda a realidade, independentemente de sua complexidade, e sim produzir informação útil para alguma tomada de decisão.

No próximo item, serão apresentados alguns dos métodos de otimização mais utilizados na engenharia e na área dos recursos hídricos.

### 3.3 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

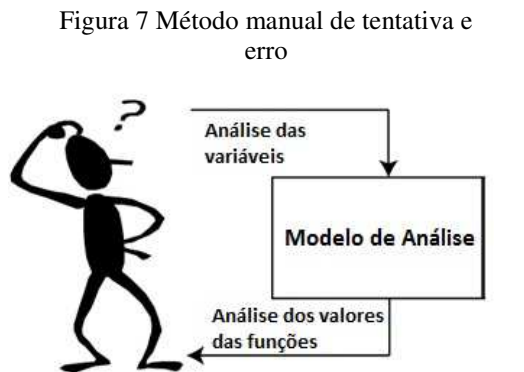
Segundo Bazzo e Pereira (2006), não há um método que possa ser considerado o melhor para a resolução de todos os problemas, devendo a escolha ser realizada de acordo com a natureza das funções a se otimizar. Para os autores, há cinco grupos de métodos de otimização que se enquadram a um projeto de engenharia, listados a seguir:

- **otimização por evolução:** se refere a alterações realizadas em sistemas já existentes que buscam o seu aperfeiçoamento, tornando-os mais eficientes e modernos ao longo do tempo;
- **otimização por intuição:** relacionada ao dia a dia do engenheiro e a todas as decisões sobre quais parâmetros empregar ou quais combinações de sistemas utilizar na composição de um projeto. Tais decisões, em grande parte das vezes, são tomadas sem qualquer instrumento que não seja o próprio julgamento do engenheiro;
- **otimização por tentativa e erro:** associada a um processo iterativo, nos quais refinamentos e novas definições são realizadas a cada tentativa, chegando-se a resultados mais satisfatórios em relação à proposta inicial. Contudo, deve-se evitar uma busca totalmente aleatória, e o trabalho deve ser coerente e ter como base hipóteses consistentes;
- **técnica gráfica:** mais aconselhado para projetos que envolvam a parte visual, consiste na combinação de esquemas ou desenhos de um sistema físico real na busca pela melhor solução para o problema em questão;
- **método analítico:** baseado no desenvolvimento matemático, tem sido cada vez mais aplicado em várias situações da engenharia, principalmente pelo desenvolvimento dos computadores, que tornaram possível a realização de cálculos complexos em alta velocidade.

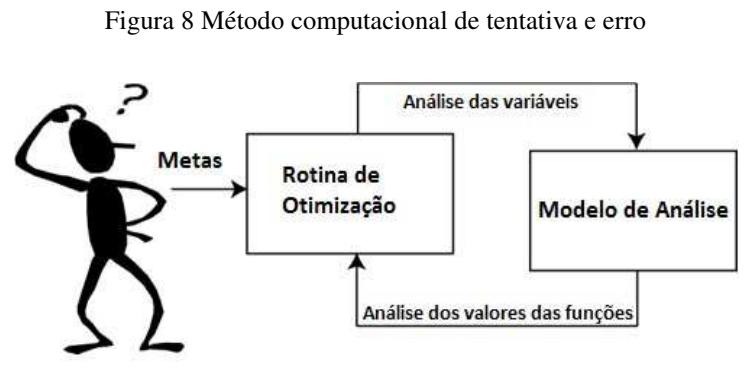
Devido a sua robustez e simplicidade, Collischonn e Tucci (2003) consideram o método da **tentativa e erro** como uma das primeiras técnicas a serem lembradas na hidrologia, em processos, como por exemplo, a calibração de parâmetros. Os autores citam a habilidade do

usuário como fator fundamental para o sucesso do procedimento, que é realizado por meio de ajustes manuais em repetidas execuções dos modelos e análises dos resultados. De uma forma geral, a maior parte dos métodos envolvem processos iterativos, sendo diferenciados pela forma com que as iterações são incluídas no procedimento. Parkinson et al. (2013) apresentam duas figuras como forma de ilustrar essa ideia.

A Figura 7 apresenta uma situação na qual o projetista especifica um conjunto de entradas, avalia as saídas resultantes do modelo e, a partir de sua experiência e intuição, altera as variáveis de decisão, iniciando um novo ciclo. Por sua vez, na Figura 8, o projetista sai do ciclo de tentativa e erro, que agora é realizado pelo computador. Nessa situação, cabe ao projetista especificar metas e interpretar os resultados de otimização, ao invés de ajustar variáveis e interpretar valores de funções. Os autores comentam sobre a incompatibilidade tecnológica presente no primeiro caso, no qual há o possível uso de softwares sofisticados no lado direito da figura, e a decisão humana por tentativa e erro no lado esquerdo da figura, o que o torna um processo mais lento quando comparado ao segundo caso.



fonte: (PARKINSON et al., 2013)



fonte: (PARKINSON et al., 2013)

### 3.3.1 Otimização determinística e aleatória

Alternativamente, pode-se classificar as técnicas de otimização de funções em dois grupos principais: otimização determinística e otimização aleatória. O primeiro envolve métodos tradicionais de busca direta como Newton-Raphson, Método da Bisseção, Aproximação Polinomial, entre diversos outros. No segundo, enquadram-se os métodos de busca aleatória (CRUZ, 2004).



Em relação a métodos de otimização determinística, a grande desvantagem está na necessidade do desenvolvimento de cálculos diferenciais, tarefa complicada para funções implícitas, comuns em problemas de recursos hídricos (GALVÃO; VALENÇA, 1999). No que tange a otimização aleatória, Cruz (2004) constata um problema de eficiência em métodos que simplesmente varrem o espaço de maneira aleatória, principalmente em problemas com elevado número de dimensões. O autor salienta que tal problema não ocorre em determinados métodos, como os algoritmos genéticos, pois dentro da pesquisa, conhecimentos obtidos com resultados anteriores são utilizados e combinados, determinando uma direção à pesquisa e não mais uma busca puramente aleatória.

A combinação de técnicas determinísticas e aleatórias, extraído-se o melhor de cada uma, pode ser uma alternativa interessante para a resolução de problemas de otimização mais complexos. Talvez por isso, o método de otimização global denominado *Shuffled Complex Evolution (SCE)*, desenvolvido por Duan et al. (1993), venha ganhando cada vez mais espaço na resolução de problemas de otimização, principalmente na área dos recursos hídricos. Esse método é baseado na síntese de quatro conceitos que tem comprovado sucesso para otimização global:

- a) combinação de abordagens aleatórias e determinísticas;
- b) conceito de agrupamento;
- c) conceito de evolução sistemática de um complexo de pontos abrangendo o espaço;
- d) conceito de evolução competitiva.

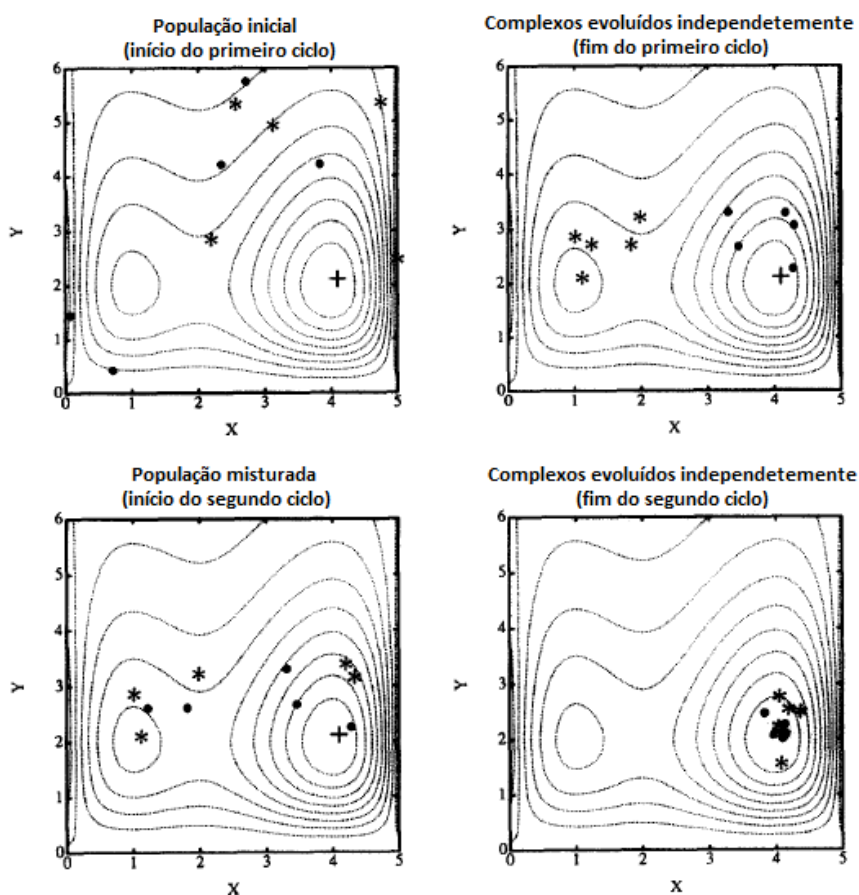
Segundo Duan et al. (1993), o uso de estratégias determinísticas permite ao algoritmo SCE fazer uso efetivo da informação da função objetivo para guiar a pesquisa, enquanto a inclusão de elementos aleatórios ajuda a fazer o algoritmo flexível e robusto. Apesar de não haver garantias de que o valor ótimo proporcionado pelo método seja o ótimo global, Bravo (2006) cita que o fato de um único problema obter muitas vezes o mesmo resultado, partindo-se de diferentes soluções aleatórias, é um indício de que o ótimo global pode ter sido atingido.

Collischonn e Tucci (2003, p. 30) sintetizam o funcionamento do método SCE:

Como qualquer método genético, o algoritmo SCE-UA opera com uma população de pontos que 'evolui' em direção ao ótimo global através de sucessivas iterações e avaliações da função objetivo. Cada um destes pontos é definido pelos valores dos parâmetros e é um candidato ao ótimo.

A Figura 9 apresenta a evolução dos pontos citada pelos autores. O passo a passo detalhado do método pode ser encontrado no trabalho original de Duan et al. (1993). A descrição também é encontrada em trabalhos como o de Bravo (2006), no qual a otimização dos parâmetros da curva guia criada foi realizada através do SCE, ou no estudo de Collischonn e Tucci (2001), no qual os autores utilizaram o método para a calibração do modelo chuva-vazão IPH2.

Figura 9 Ilustração do Método SCE

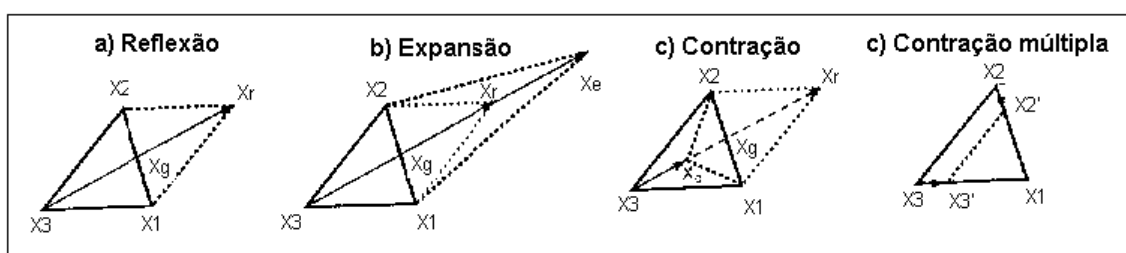


fonte: (DUAN et al., 1994)

O método SCE tem algumas de suas técnicas baseadas no Método Simplex, de Nelder e Mead (1965), um dos mais presentes na resolução de problemas de otimização na área dos recursos hídricos, sendo utilizado, segundo os autores, para a minimização de uma função de “n” variáveis, a partir da comparação de valores da função nos “n+1” pontos presentes em cada passo do método. Collischonn e Tucci (2001) contribuem para a descrição da estratégia de busca local do método, que, de maneira geral, se baseia na seleção de um determinado

número de pontos que, a partir de processos de reflexão, expansão ou contração (Figura 10) aplicados aos pontos de pior valor da função objetivo, evoluem até atingir um valor definido como satisfatório. Segundo os autores, métodos de busca local, como o Simplex, não são recomendados para problemas nos quais a função objetivo apresenta vários pontos de mínimos ou máximos locais, o que dificulta a obtenção do ótimo global.

Figura 10 Etapas de evolução do Método Simplex de Nelder e Mead



fonte: (Sorooshian e Gupta<sup>2</sup>, 1995, apud Collischonn e Tucci, 2001)

### 3.3.2 Programação Linear, Não Linear e Dinâmica

De acordo com Rao (2009), a Programação Linear (PL) é considerada como um desenvolvimento revolucionário que permite tomar decisões ótimas em situações complexas, tratando-se de uma técnica de otimização utilizada para a resolução de problemas nos quais a função objetivo e as restrições, presentes na forma de igualdade ou desigualdade, aparecem como funções lineares das variáveis de decisão. Labadie (2004) cita a capacidade de resolução eficiente de problemas de grande escala e a convergência para soluções ótimas globais como algumas das vantagens da PL. Entretanto, Formiga (2005) cita alguns fatores que fizeram com que modelos baseados em PL perdessem espaço a partir da década de 1980:

- necessidade da inclusão de aproximações para retratar linearmente problemas não lineares;
- surgimento de métodos de Programação Não Linear com restrições;
- aumento excessivo da quantidade de variáveis de decisão para problemas de grande porte;
- possibilidade da utilização de métodos mais complexos a partir do aumento da capacidade computacional.

<sup>2</sup> Sorooshian, S.; Gupta, V. K. 1995 Model calibration In: Singh, V. J. (editor) **Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publications, Highlands Ranch. 1130 p.

Quando um problema de otimização é difícil de manipular, ou envolve funções objetivo ou restrições que não são declaradas como funções explícitas das variáveis de projeto, torna-se complicado o uso de métodos analíticos clássicos, e métodos de Programação Não Linear (PNL) auxiliam na resolução de tais problemas. Tais métodos são classificados em três grupos: minimização unidimensional, programação sem restrições e programação com restrições (RAO, 2009).

No primeiro grupo, Rao (2009) classifica os métodos em duas categorias principais:

- métodos de eliminação: Pesquisa sem restrições, pesquisa exaustiva, pesquisa dicotômica, método de intervalo, método de Fibonacci, método de seção dourada;
- métodos de interpolação: método de interpolação quadrática, método de interpolação cúbica, métodos diretos de raiz.
- 

Ainda de acordo com Rao (2009), dificilmente um problema prático de engenharia não possui nenhuma restrição, porém, o uso de técnicas de otimização sem restrições pode auxiliar no entendimento básico para estudos com métodos de PNL restritas. O autor cita uma série de métodos baseados em PNL sem restrições, diferenciando-os de acordo com a necessidade ou não do cálculo da derivada da função objetivo:

- não requerem as derivadas da função: métodos de busca aleatória, métodos de pesquisa de grade, Método Univariável, Método Simplex, entre outros;
- requerem as derivadas da função: Método de Fletcher-Reeves, Método de Newton, Métodos de Quasi-Newton, Método de Davidon-Fletcher-Powell, entre outros.

Em relação a métodos de Programação Não Linear com restrições, Formiga (2005) cita como uma das principais vantagens a possibilidade de se trabalhar sem aproximações, enquanto que a dependência sobre valores iniciais e a dificuldade de convergência em problemas descontínuos são considerados como desvantagem. Rao (2009) classifica estes métodos em duas categorias, que correspondem a métodos diretos, nos quais as restrições aparecem de forma explícita, e a métodos indiretos, nos quais o problema restrito é resolvido como uma sequência de problemas de otimização irrestritos. O autor também apresenta uma lista dos principais métodos de PNL com restrições:

- métodos diretos: métodos de busca aleatória, métodos de busca heurísticos, Método Complex, métodos de programação linear sequencial, métodos de programação quadrática sequencial, entre outros;
- métodos indiretos: métodos de transformação de variáveis, técnicas de minimização sem restrição sequencial, método multiplicador de Lagrange, entre outros.

Os métodos de Programação Dinâmica, por sua vez, são baseados na resolução de problemas de decisão de múltiplas etapas através de uma sequência de problemas de decisão de etapa única, ou seja, um problema de “n” variáveis é representado como uma sequência de “n” subproblemas de variável única, resolvidos sucessivamente e, geralmente, com maior grau de facilidade em relação ao original (RAO, 2009). De acordo com Labadie (2004), a decomposição do problema original em subproblemas representa uma vantagem significativa para o método, uma vez que o esforço computacional aumenta apenas linearmente com o número de estágios, enquanto em grande parte dos métodos existentes o aumento é exponencial. Siqueira e Soares Filho (2003), entretanto, comentam que a desvantagem do método está no fato da necessidade da discretização do espaço de estados, o que faz com que o esforço computacional aumente exponencialmente com o número de variáveis de estado, limitação definida como “maldição da dimensionalidade”.

## 4 METODOLOGIA

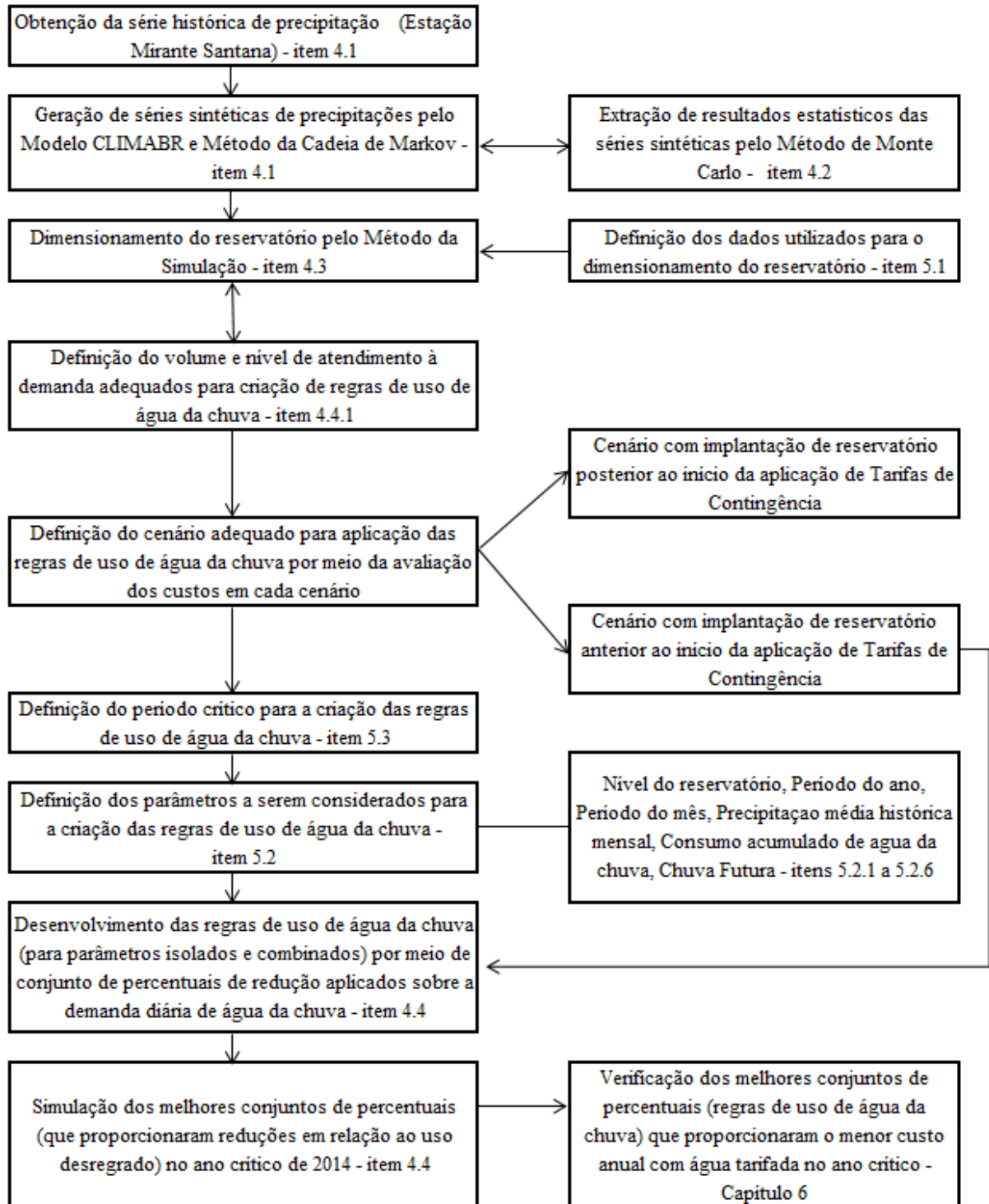
Neste capítulo, são apresentadas as etapas necessárias para se atingir os objetivos do presente trabalho. Como forma de facilitar o entendimento da metodologia utilizada, a Figura 11 apresenta o fluxograma contendo todos estes passos, relacionando-os com o item correspondente no trabalho.

### 4.1 GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÃO

O primeiro passo do trabalho consistiu na obtenção dos dados históricos de precipitações diárias observadas para o local da aplicação metodológica, apresentados no capítulo 5. Kelman (1987, p. 328), contudo, salienta que “a série temporal é uma realização do processo estocástico, assim como uma observação da variável aleatória é um possível resultado do ‘sorteio’ da mesma.”. O autor complementa, afirmando que um novo ‘sorteio’, segundo algum conjunto de leis probabilísticas, geraria outra série, diferente da histórica, mas igualmente provável.

Considerando as infinitas possibilidades de realizações de um processo estocástico, Dornelles (2012) cita que uma única série de precipitações diárias observadas pode apresentar adversidades, como pequena amostragem, falhas e períodos anômalos, sendo os resultados da modelagem sensíveis a tais características. Sendo assim, a utilização de séries sintéticas, com características estatísticas semelhantes às da série observada, e geradas a partir de diferentes realizações de um processo estocástico, é uma das principais alternativas para propiciar resultados mais satisfatórios e confiáveis. Neste sentido, Kelman (1987) comenta que o fato das séries sintéticas serem distintas entre si pode gerar a obtenção de diversos resultados, gerados a partir de simulações, possibilitando-se que a informação contida na série histórica seja extraída de forma mais completa.

Figura 11 Fluxograma das etapas do trabalho



De acordo com Hermann (1975), a geração de séries sintéticas de precipitações é uma tarefa complicada, pois a mesma ocorre com passo variável, ou seja, os intervalos entre sucessivos eventos chuvosos são processos estocásticos. O autor ainda comenta sobre modelos geradores de séries sintéticas, que, normalmente, possuem duas partes principais: um mecanismo que indica se o intervalo em questão é chuvoso ou seco, por meio de um esquema markoviano discreto; e outro que, em caso de intervalo chuvoso, estima a quantidade de precipitação. Segundo Kelman (1987, p. 331):

Um processo estocástico é definido como markoviano quando a distribuição de probabilidades dos valores futuros do processo depende apenas do último valor da série temporal. Isto é, num processo markoviano, as observações anteriores ao instante  $t$  são irrelevantes para a modelagem do processo após  $t$ , desde que se conheça  $x(t)$ .

Neste trabalho, para a geração de chuvas sintéticas, utilizou-se o Modelo CLIMABR, desenvolvido por Oliveira (2003), somado a algumas adaptações sugeridas por Dornelles (2012), como a consideração de janelas móveis de 31 dias para a obtenção dos parâmetros estatísticos. Ressalta-se que o modelo utilizado pressupõe estacionariedade hidrológica, e diante de alterações nas métricas estatísticas, devido, por exemplo, a cenários de mudanças climáticas, os resultados podem ser distintos. No entanto, para situações de aplicação de tarifas de contingência em um curto horizonte de tempo, os resultados obtidos podem ser considerados como confiáveis. A rotina, que utiliza a Cadeia de Markov de primeira ordem como meio de obtenção dos dias chuvosos, é apresentada a seguir.

Primeiramente, por meio da equação 1, oriunda da distribuição Pearson tipo III, que apresenta boa aderência à distribuição de frequência dos acumulados de eventos de chuvas, calcula-se a precipitação total diária sintética, cujos parâmetros utilizados (média, desvio padrão e coeficiente de assimetria) são obtidos a partir da média de janelas móveis de 31 dias da série observada (15 dias anteriores e 15 dias posteriores ao dia analisado). Salienta-se que o procedimento considera apenas os dias chuvosos constantes na janela móvel. Detzel (2009) explica que o processo extra, relativo à determinação de ocorrência de chuva, é necessário para evitar a presença excessiva de “zeros” caracterizando os dias sem chuva na série gerada.



$$P' = \mu + \frac{A.s}{g} \left( \left( \frac{g}{6} \left( x' - \frac{g}{6} \right) + 1 \right)^3 - B \right) \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

$P'$  = precipitação diária sintética (mm);

$\mu$  = média da soma móvel de 31 dias da precipitação total diária (mm);

$s$  = desvio padrão da soma móvel de 31 dias da precipitação total diária (mm);

$g$  = coeficiente de assimetria da soma móvel de 31 dias da precipitação total diária (adimensional);

$x'$  = variável aleatória normal padronizada (adimensional);

$A$  = parâmetro ponderador do desvio padrão, assimetria e variável aleatória (adimensional);

$B$  = parâmetro de ajuste das médias de longo período e dias chuvosos (adimensional)

A utilização da média da soma de janelas móveis para cada dia, proposta por Dornelles (2012), em substituição às médias mensais, presente no modelo original, permite representar de modo contínuo a variação dos parâmetros estatísticos, assemelhando-se à realidade.

Os parâmetros ponderadores “A” e “B” foram obtidos a partir de ajustes manuais, realizados por meio de tentativa e erro, comparando-se os gráficos resultantes das séries sintéticas com os gráficos da série observada, relacionados às seguintes propriedades estatísticas: precipitação média, precipitação acumulada, frequência relativa e frequência acumulada.

O segundo e terceiro passo consistem na correção das médias e desvios-padrão, visando à redução das diferenças entre os valores observados e calculados, e são dados, respectivamente, pelas equações 2 e 3.

$$P'' = \frac{\mu'}{\mu} P' \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

$P''$  = precipitação diária sintética com média corrigida (mm);

$\mu'$  = média da soma móvel de 30 dias da precipitação sintética total diária (mm);

$$Pc = (P'' - \mu'') \frac{S''}{S} + \mu'' \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

$P_c$  = precipitação diária sintética com desvio padrão corrigido (mm);

$s''$  = desvio padrão da soma móvel de 30 dias da precipitação sintética total diária com a média corrigida (mm);

$\mu''$  = média da soma móvel de 30 dias da precipitação sintética total diária com a média corrigida (mm);

Conforme citado anteriormente, na metodologia proposta por Oliveira (2003), a ocorrência de dias chuvosos é determinada por meio de uma Cadeira de Markov de primeira ordem. Segundo Detzel (2009), o uso de processos estocásticos markovianos é uma técnica bem sucedida e quase unânime no desenvolvimento de chuvas sintéticas, e sua característica principal está no fato da evolução futura do sistema depender apenas do estado atual, desconsiderando estados passados. Dornelles complementa, citando que modelos markovianos de primeira ordem são processos estocásticos nos quais o valor da variável no tempo  $t$  depende apenas do seu valor no tempo  $t-1$ , sem dependência com estados anteriores da mesma.

As probabilidades de ocorrência de dias chuvosos, considerando-se as metodologias de Oliveira (2003) e Dornelles (2012), são calculadas pelas equações a seguir.

$$P_{WD} = \frac{N_{WD}}{NT} \quad \text{Equação 4}$$

$$P_{WW} = \frac{N_{WW}}{NT} \quad \text{Equação 5}$$

Sendo:

$N_{WD}$  = média, para cada dia do ano, do número de dias chuvosos na janela móvel de 31 dias, tendo sido o anterior seco;

$N_{WW}$  = média, para cada dia do ano, do número de dias chuvosos na janela móvel de 31 dias, tendo sido o anterior chuvoso;

$NT$  = número total de dias da janela móvel, igual a 31;

$P_{WD}$  = probabilidade, para cada dia do ano, de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior seco;

$P_{WW}$  = probabilidade, para cada dia do ano, de um dia ser chuvoso tendo sido o anterior chuvoso;

A definição da ocorrência ou não de chuva para cada dia, por sua vez, se dá com o auxílio de uma série de números aleatórios, variando de 0 a 1, com extensão igual à série observada. Para cada dia, avalia-se a ocorrência ou não de chuva no dia atual e anterior, comparando-se a probabilidade referente a este estado com o valor gerado aleatoriamente, tomando-se o valor de zero para probabilidades maiores que o número aleatório e o valor resultante da equação 3 para probabilidades menores que o número aleatório.

## 4.2 ANÁLISE DAS SÉRIES SINTÉTICAS PELO MÉTODO DE MONTE CARLO

Uma etapa importante em um processo de geração de precipitações sintéticas é a avaliação das séries resultantes. Apesar de seu trabalho estar focado em séries de vazões, Kelman (1987) afirma que a confiança de um modelo estocástico está relacionada à capacidade de preservação, nas séries sintéticas geradas, de algumas propriedades constantes na série histórica observada. No presente trabalho, tais propriedades se relacionam a fatores como: precipitação média mensal, precipitação acumulada, frequência relativa e frequência acumulada de chuvas.

De acordo com Detzel (2009), o uso cada vez mais frequente do Método de Monte Carlo para a análise de propriedades estatísticas das séries geradas valoriza os resultados encontrados. O autor ainda cita a necessidade da criação de um conjunto numeroso de séries sintéticas, visando à obtenção de resultados distintos e a possibilidade de criação de cenários.

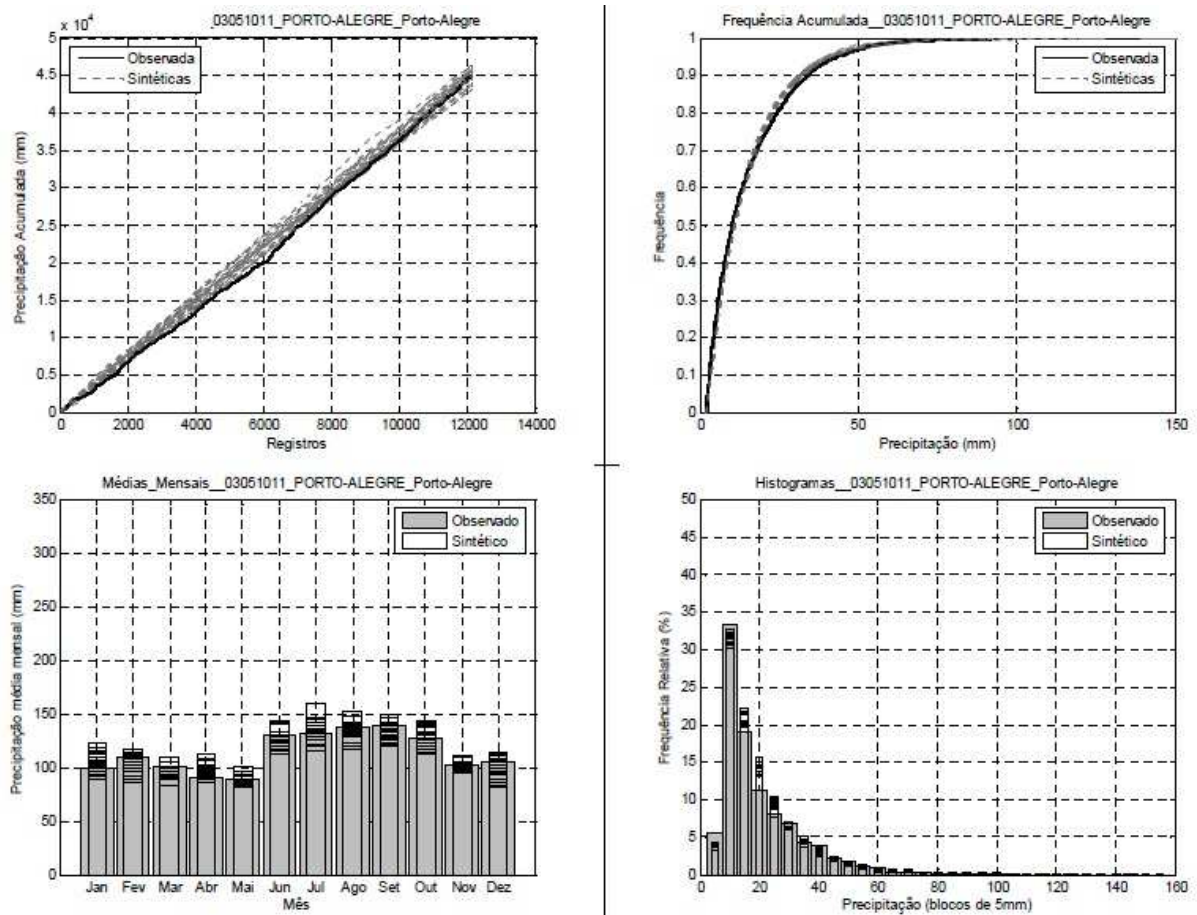
Dessa forma, optou-se pela criação de 20 séries sintéticas com 30 anos de duração, seguindo-se a metodologia utilizada por Dornelles (2012), na qual o autor constatou que tais números proporcionavam uma adequada representatividade do regime pluvial observado com as séries sintéticas. Além disso, a Organização Meteorológica Mundial define padrões climatológicos normais como “médias de dados climatológicos calculadas para períodos consecutivos de 30 anos”.

Em relação à geração de modelos estocásticos, Kelman (1987, p. 363) comenta que “um modelo preserva uma determinada propriedade quando não se pode distinguir estatisticamente a série histórica da sintética, com base nas observações desta propriedade nas duas séries. Logo, utilizando-se o Método de Monte Carlo, a qualidade das séries geradas foi conferida

por meio da avaliação de quatro gráficos (exemplificados na Figura 12) contendo informações relativas às séries sintéticas e observada, como: precipitação acumulada, frequência acumulada, médias mensais e histograma de frequência. Segundo Dornelles (2012, p. 73):

A análise dos gráficos por inspeção visual padece de subjetividade, no entanto, é fundamental para identificar falhas na consistência dos dados. Além disso, esta análise verifica se a série observada ficou compreendida entre os limites da dispersão das séries sintéticas, conferindo ao método de geração de séries sintéticas de dados a capacidade de inserir aleatoriedade, ao mesmo tempo em que mantém as características estatísticas da série observada.

Figura 12 Comparação entre séries sintéticas e série observada para a cidade de Porto Alegre



fonte: (DORNELLES, 2012)

### 4.3 DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 15.527, 2007), existem seis principais métodos de cálculo para o dimensionamento de reservatórios de água da chuva: Método de Rippl, Método da Simulação, Método Azevedo Neto, Método Prático Alemão, Método Prático Inglês e Método Prático Australiano.

Apesar da simplicidade e facilidade de aplicação, Dornelles (2012) não recomenda a utilização de métodos práticos, visto que a simples proporcionalidade entre precipitação e volume, adotada por esses métodos, acaba por ignorar o comportamento sazonal da precipitação. Além disso, o caráter empírico dos mesmos não garante aplicabilidade a qualquer situação ou local. Sendo assim, o autor considera o Método da Simulação como o mais apropriado para o dimensionamento de reservatórios, por proporcionar a obtenção de índices de desempenho como nível de atendimento à demanda e percentuais de extravasamento, além da possibilidade de verificação de anomalias climáticas por métodos como o de Monte Carlo e incorporação de demandas variáveis.

Por esse motivo, no presente trabalho, optou-se pela utilização do Método da Simulação, com intervalo de tempo diário, apresentado a seguir. Todos os demais métodos podem ser consultados na NBR 15.527/2007. Os critérios e dados utilizados para o dimensionamento são apresentados no item 5.1 do capítulo de Aplicação Metodológica.

Segundo a NBR 15.527 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), o Método da Simulação é baseado na aplicação da equação da continuidade a um reservatório finito, que para o presente trabalho, conta com pequenas alterações apresentadas a seguir:

$$S(t) = Q(t) + S(t-1) - Cchuva(t) \quad \text{Equação 6}$$

$$Q(t) = C \times P(t) \times A \times (1 - CD) \quad \text{Equação 7}$$

Sendo que:  $0 \leq S(t) \leq V$

Onde:

$S_{(t)}$  = volume de água da chuva no reservatório no tempo t (litros);

$S_{(t-1)}$  = volume de água da chuva no reservatório no tempo t-1 (litros);

$Cchuva_{(t)}$  = consumo de água da chuva no tempo t (litros);

$Q_{(t)}$  = volume de chuva disponível no tempo t (litros);

$P_{(t)}$  = precipitação diária, obtida por meio das séries observadas e sintéticas (mm);

$A$  = área de captação da cobertura ou telhado ( $m^2$ );

$C$  = coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

$CD$  = coeficiente de descarte do filtro de pré-tratamento;

$V$  = volume do reservatório fixado (litros).

A norma ainda recomenda considerar o reservatório cheio no início da simulação ( $t=0$ ) e que os dados históricos de precipitação são representativos para situações futuras. A influência da consideração de reservatório cheio para o início da simulação, em termos de custos, é apresentada no item 5.3 do capítulo de Aplicação Metodológica.

Para o cálculo do balanço hídrico (equação 6), considerou-se que a entrada de água no reservatório “ $Q_{(t)}$ ” ocorre antes de sua retirada para consumo “ $C_{chuva(t)}$ ”. Perius (2016) estudou a influência no desempenho do reservatório a partir de simulações para duas situações distintas: a primeira considera que a entrada do volume de água ocorre antes da demanda ocorrer; a segunda considerada que a saída para consumo ocorre antes da entrada do volume de água da chuva. As duas situações, no entanto, não apresentaram diferenças significativas nos resultados, observando-se variações na ordem de 1,3% para a cidade de Porto Alegre.

Para o cálculo do nível de atendimento à demanda, utilizou-se as seguintes equações, que diferenciam as demandas previstas e os consumos efetivos de água:

$$C_{pot}(t) = D_{total}(t) - C_{chuva}(t) \quad \text{Equação 8}$$

$$NA(t) = C_{pot}(t) - D_{pot}(t) \quad \text{Equação 9}$$

$$NG = \frac{\sum D_{chuva}(t) - \sum NA(t)}{\sum D_{chuva}(t)} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo :

$C_{pot(t)}$  = consumo de água potável no tempo  $t$ ;

$D_{total(t)}$  = demanda total de água (potável e não potável) no tempo  $t$ ;

$NA_{(t)}$  = demanda não atendida no tempo  $t$ , correspondente ao volume de água potável consumido além da demanda diária prevista para água potável;

$D_{pot(t)}$  = demanda por água potável no tempo  $t$ ;

$D_{chuva(t)}$  = demanda por água da chuva no tempo  $t$ ;

NG = nível de garantia de atendimento à demanda.

Salienta-se que o parâmetro “ $C_{pot}(t)$ ” se refere ao consumo diário de água potável, satisfazendo a demanda diária por água potável assim como a parcela de demanda diária por água da chuva que não pôde ser atendida no dia por falta de água no reservatório.

Com este conjunto de equações, aplicados no método da simulação, foi possível testar diferentes volumes de reservatórios, optando-se por aquele que proporcionou o nível de atendimento a demanda mais adequado para o estudo, cujos critérios são apresentados no item 4.4.1.

#### 4.4 DESENVOLVIMENTO DE REGRAS DE USO DE ÁGUA DO RESERVATÓRIO

A etapa final do trabalho consistiu na elaboração de regras que otimizem o uso da água da chuva visando à redução dos gastos na conta do consumidor final em período com aplicação de tarifa de contingência. Para isso, visou-se a obtenção de coeficientes ou percentuais aplicados sobre o consumo diário de água da chuva que resulte na série com o menor gasto anual médio com o consumo de água tratada da companhia de saneamento.

Foram realizadas simulações para os diferentes parâmetros e combinações de parâmetros considerados no estudo, apresentados no item 5.2 do capítulo de Aplicação Metodológica. Tendo como referência o custo médio anual obtido para simulações entre as 20 séries sintéticas com 30 anos, verificou-se quais os conjuntos de regras que proporcionavam reduções neste custo.

As tarifas de contingência são aplicadas em épocas de escassez de água, relacionadas, normalmente, a períodos pouco chuvosos. Sendo assim, para cada uma das 20 séries sintéticas geradas, verificou-se a precipitação total anual para cada um dos 30 anos que compõem cada série, extraindo-se, de cada série sintética, o ano com a menor precipitação total anual, formando uma nova série de 20 anos críticos, servindo como base para a criação das regras. O conjunto de série resultante é apresentado no item 5.3 do capítulo de Aplicação Metodológica.

Para a verificação da real influência das regras de uso no custo anual com água da chuva, os melhores conjuntos obtidos nas simulações com as séries sintéticas foram testados, novamente, em um ano historicamente pouco chuvoso, tendo em vista que as tarifas de contingência entram em vigor apenas em períodos de escassez de água, relacionados, normalmente, a períodos pouco chuvosos. A definição do ano crítico é apresentada no capítulo 5, para o qual o período de retorno foi verificado admitindo-se uma distribuição normal de precipitações observadas.

Para os parâmetros considerados, isolados ou em conjunto, foram realizadas diferentes simulações por meio da combinação de todos os conjuntos de regras considerados, buscando obter-se aquele mais benéfico para o usuário em termos econômicos. Trata-se como conjunto de regras, neste trabalho, os percentuais aplicados sobre a demanda diária por água da chuva “*Dchuva*”, no método da simulação.

Para cada conjunto de regras considerado na simulação, avaliou-se o consumo médio mensal de água da companhia, as despesas mensais e anuais com a conta de água, sem e com a aplicação das tarifas de contingência e o número de bônus/multas obtidos para cada regra considerada. Salienta-se que todos estes valores foram gerados a partir da média obtida entre os resultados das 20 séries sintéticas geradas. Para a avaliação do melhor conjunto de regras, foi considerado como critério o menor valor relativo à despesa anual com água da companhia em um cenário no qual sejam aplicadas as tarifas de contingência. Salienta-se que despesas referentes à instalação e manutenção de reservatórios foram desconsideradas neste trabalho.

Devido à relação existente entre as tarifas de contingência e o consumo de água da companhia (consumo de referência) no período anterior ao de aplicação de tais tarifas, foram avaliados dois cenários distintos. No primeiro cenário, a residência não dispunha de reservatório, passando a adotá-lo no período de crise hídrica, com o início da aplicação das tarifas. No segundo cenário, a residência já possuía um reservatório instalado no início do período de contingenciamento, o que reduz o consumo de referência (de água potável) em relação ao primeiro cenário.



#### **4.4.1 Definição do volume do reservatório**

O passo anterior à criação das regras consistiu na análise de diferentes volumes e níveis de atendimento à demanda, a fim de se verificar o intervalo no qual a criação de regras de uso de água da chuva tenha influência no consumo e, conseqüentemente, nos custos com água potável, tendo em vista que a adoção de grandes volumes de reservatórios, pela maior capacidade de regularização e níveis de atendimento à demanda próximos a 100%, possibilita o maior benefício econômico sem a necessidade de otimização (desconsiderando-se o custo de aquisição e instalação), enquanto que reservatórios com volumes muito reduzidos não possuem capacidade de regularização, podendo tornar pouco vantajosa a adoção de regras de uso.

Como critério auxiliar, verificou-se o número de vezes em que se atingiu cada faixa de bônus, multa ou a zona para a qual não são aplicados bônus e multas, extraídos da média entre todas as séries sintéticas analisadas, considerando-se que volumes que proporcionam um número elevado na última zona citada não são os mais adequados para a o estudo.

#### **4.4.2 Simulação das regras de uso**

Tendo como base a revisão realizada a respeito das técnicas de otimização e simulação, e devido à existência de diversos coeficientes a serem obtidos e posicionados ao longo da série, optou-se pela investigação simplificada para a verificação da potencialidade das regras, supondo que os resultados oriundos das mesmas se aproximam dos resultados obtidos com técnicas mais sofisticadas de otimização. Dessa maneira, optou-se pela utilização de simulações, que, por meio de algoritmo computacional, levassem ao resultado mais satisfatório, partindo-se de critérios ou restrições previamente definidos, como os limites diários máximos de consumo, por exemplo. Estes resultados, no entanto, podem ser considerados como os mais vantajosos economicamente apenas dentro do universo estudado (ou conjunto de regras analisados), uma vez que não se pode afirmar que o ótimo global foi atingido devido ao fato de não se considerar todos os possíveis conjuntos de regras.

## 5 APLICAÇÃO METODOLÓGICA

Neste capítulo serão apresentadas algumas das definições e dados utilizados na aplicação metodológica.

A princípio, definiu-se a cidade para a qual o reservatório hipotético está localizado. Devido aos recentes problemas em relação à disponibilidade de água potável, apresentado no segundo capítulo, e por se tratar da principal metrópole do Brasil, optou-se pela cidade de São Paulo como base para o estudo. Em consequência, o sistema de tarifas de contingência e bonificação adotado neste trabalho foi o mesmo aplicado pela SABESP no período de crise hídrica enfrentado pela região, já apresentado na Figura 4, tratando-se de um sistema de cobrança com possibilidades variadas, que permite a aplicação de multas ou bônus de acordo com o consumo de água por parte do usuário, o que faz com que a relação entre forma de consumo e custo possa ser amplamente explorada.

Os valores adotados para as tarifas de consumo de água são apresentados na Tabela 5, relacionados ao padrão de consumo “Residencial / Normal” para a Região Metropolitana de São Paulo, vigentes desde maio de 2016.

Tabela 5 Tarifas de consumo de água para a Região Metropolitana de São Paulo

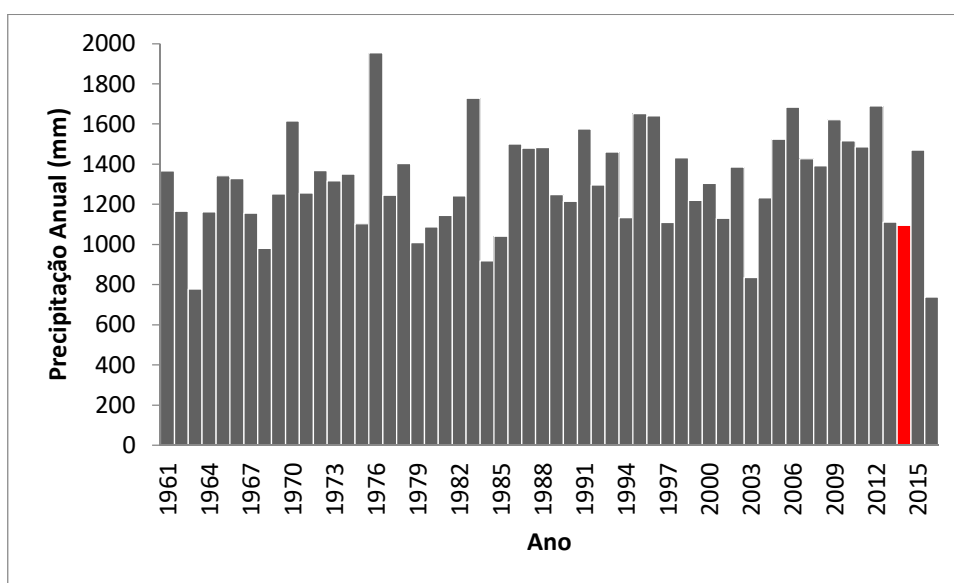
<b>Classe de consumo (m<sup>3</sup>/mês)</b>	<b>Tarifa de água (R\$)</b>
0 a 10	22,38 / mês
11 a 20	3,50 / m <sup>3</sup>
21 a 50	8,75 / m <sup>3</sup>
acima de 50	9,64 / m <sup>3</sup>

(fonte: SABESP, 2016)

Os dados históricos de precipitações diárias foram obtidos para a cidade de São Paulo, servindo como base para as demais etapas. Para isso, optou-se pelo Hidroweb, o banco de dados e informações sobre recursos hídricos, coordenado pela Agência Nacional de Água (ANA). Devido à ausência de falhas, foram extraídos os dados da estação com código 02346117, denominada Mirante Santana, cujo responsável pela operação é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A série obtida compreende o período de 01/01/1961 a 10/07/2016, contendo dados já consistidos pelo INMET.

Para a verificação da real influência das regras de uso no custo anual com água da chuva, tais regras foram testadas em um ano historicamente pouco chuvoso. O ano escolhido foi o de 2014, por estar relacionado, diretamente, com a intensificação da crise hídrica enfrentada em São Paulo entre 2015 e 2016, sendo um dos anos mais críticos da história, situando-se no percentil de 15% da série observada, com precipitação total anual de 1095,80 mm, destacado na Figura 13, e período de retorno calculado em 6 anos, admitindo-se uma distribuição normal de precipitações para os 55 anos completos da série analisada (1961 a 2015).

Figura 13 Precipitações totais anuais observadas



## 5.1 CRITÉRIOS PARA O DIMENSIONAMENTO DO RESERVATÓRIO

Para o dimensionamento do sistema de aproveitamento de água da chuva, necessita-se que alguns parâmetros sejam definidos, possibilitando o desenvolvimento das etapas de elaboração e simulação das regras de uso da água. Com isso, ressalta-se que os resultados obtidos com este trabalho estão limitados a situações em que os parâmetros aqui definidos sejam semelhantes, estando a metodologia disponível para ser replicada em cenários distintos.

Outro ponto fundamental no dimensionamento de um reservatório é a relação entre oferta e demanda de água. A oferta está relacionada ao volume de água disponível para entrar no reservatório “ $Q_{(t)}$ ”, sendo afetada pela disponibilidade hídrica da região, dada pelas séries observada e sintéticas geradas “ $P_{(t)}$ ” para a cidade de São Paulo, e pela área de captação “ $A$ ”. Esta última foi definida visando-se a adoção de uma residência de dimensão mediana,

tomando-se como valor a área de 130 m<sup>2</sup>, resultado da média entre as áreas consideradas no estudo de Dornelles (2012), no qual o autor considerou as áreas de 216 m<sup>2</sup> para residências de classe alta e 45,5 m<sup>2</sup> para residências de padrão popular. Para o cálculo do volume de água que entra no reservatório, deve-se considerar, ainda, os percentuais relativos ao escoamento de água no telhado e ao descarte que ocorre no filtro de pré-tratamento. Para o coeficiente de escoamento “C” adotou-se o valor de 0,95, referente ao valor sugerido por Tomaz (2007) para telhas cerâmicas esmaltadas. Em relação ao coeficiente de descarte “CD”, adotou-se o valor de 0,1, admitindo-se perdas de 10 % nos processos de filtração e *first flush*.

Já a demanda relaciona-se ao consumo diário de água per capita (potável e não potável) e ao número de habitantes da residência em questão. O número de moradores foi definido em três habitantes, de acordo com a relação entre dados de população (11.253.503) e domicílios particulares permanentes (3.573.509), estimados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no Censo de 2010 para o município de São Paulo. A demanda total diária “ $D_{total(t)}$ ”, por sua vez, foi definida em 187,90 litros, tendo como base dados relativos à região Sudeste do País, fornecidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) no Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos de 2014. Deste, considerou-se 38% relativos à demanda por água não potável “ $D_{chuva}$ ”, baseado nos percentuais de consumo apresentados por Tomaz (2007), e resultante da soma de atividades como descarga de bacias sanitárias (27%), lavagem de pátios (3%), irrigação de jardins (5%) e lavagem de automóveis (3%). Para o período de verão, considerou-se, ainda, acréscimos de 35% na demanda por água não potável, resultado da média de estimativas realizadas pela SABESP para o aumento de consumo de água nessa estação, que fica entre 30 e 40%.

Salienta-se que o percentual relativo à irrigação de jardins foi desconsiderado em dias nos quais a precipitação foi superior a 2 mm, correspondente aos 2 L/m<sup>2</sup>.dia recomendados por Tomaz (2007), considerando-se a irrigação por meio da própria chuva nestes casos.

Os valores diários de consumo efetivo de água potável “ $C_{pot(t)}$ ” e consumo efetivo de água da chuva “ $C_{chuva(t)}$ ” variam de acordo com a disponibilidade de água armazenada no reservatório no tempo t. Trata-se estas variáveis como consumos efetivos pelo fato de estar relacionados aos volumes diários realmente consumidos, diferindo-se dos valores fixos relacionados às demandas.

## 5.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA ELABORAÇÃO DAS REGRAS DE USO DE ÁGUA DA CHUVA

Trata-se como regra de uso, neste trabalho, o conjunto de percentuais aplicados sobre a demanda diária de água da chuva, a fim de estabelecer formas diferenciadas de consumo, baseadas em determinados parâmetros, visando benefícios econômicos no decorrer de um ano.

A definição dos diferentes parâmetros a serem considerados para a elaboração das regras de uso de água da chuva teve como primeiro passo a escolha de parâmetros concretos, baseados na observação do usuário, como:

- nível do reservatório observado no dia;
- quantidade de dias restantes para o término do mês;
- período do ano;
- precipitação média histórica do mês;
- consumo de água da chuva acumulado ao longo do mês.

Por fim, verificou-se a influência do fator previsão de chuvas, tratado neste trabalho como “chuva futura” devido à utilização dos próprios valores de precipitação gerados nas séries sintéticas para a previsão. Salienta-se que este parâmetro se difere dos demais devido aos riscos e incertezas relacionados ao mesmo, desconsiderados neste trabalho.

Para cada parâmetro, foram realizadas  $6^5$  simulações<sup>3</sup>, totalizando 7.776 combinações, oriundas dos seis percentuais de uso (0, 20, 40, 60, 80 e 100) e das cinco faixas consideradas, conforme apresentado a seguir. Cada simulação contou com um conjunto de percentuais, aplicados sobre a demanda por água da chuva “*Dchuva*”, de acordo com a faixa do parâmetro analisado. Ao final, foram verificados os custos anuais, com a conta de água, decorrentes da aplicação de cada uma das combinações de percentuais consideradas.

Foram criadas regras que consideram cada parâmetro citado de forma isolada, assim como regras que combinam dois, três e até quatro parâmetros. Combinações com parâmetros que não apresentaram resultados satisfatórios (reduções no custo anual com a conta de água em

---

<sup>3</sup> Para o parâmetro Período do Ano, exclusivamente, foram realizadas  $6^4$  simulações, totalizando 1296 combinações.

relação ao uso desregrado) foram descartadas para simulações com um número elevado de parâmetros.

### **5.2.1 Regra considerando apenas o nível do reservatório**

A primeira regra criada levou em conta apenas o nível do reservatório observado no início do dia de uso, sendo considerado um possível determinante na escolha de volumes e momentos adequados para o consumo de água. Além disso, o parâmetro “nível do reservatório” foi considerado pelo fato de poder ser facilmente observado pelo usuário, tornando viável a sua utilização na prática.

Dividiu-se o reservatório em cinco faixas (Figura 14), de acordo com o volume de água presente no reservatório (0 a 20%, 20 a 40%, 40 a 60%, 60 a 80% e 80% a 100% de sua capacidade). Para cada faixa, foram testados diferentes percentuais, ou regras, aplicados sobre a demanda diária de água da chuva (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%), gerando uma matriz com todas as possíveis combinações de regras, exemplificada na Tabela 6. Salienta-se que um número superior de faixas e percentuais foi testado, porém, os resultados obtidos não apresentaram diferenças significativas, optando-se pelo número reduzido devido à limitação computacional, e adotando-o como padrão para as regras com outros parâmetros.

Figura 14 Divisão do reservatório para simulação com os conjuntos de regras criados

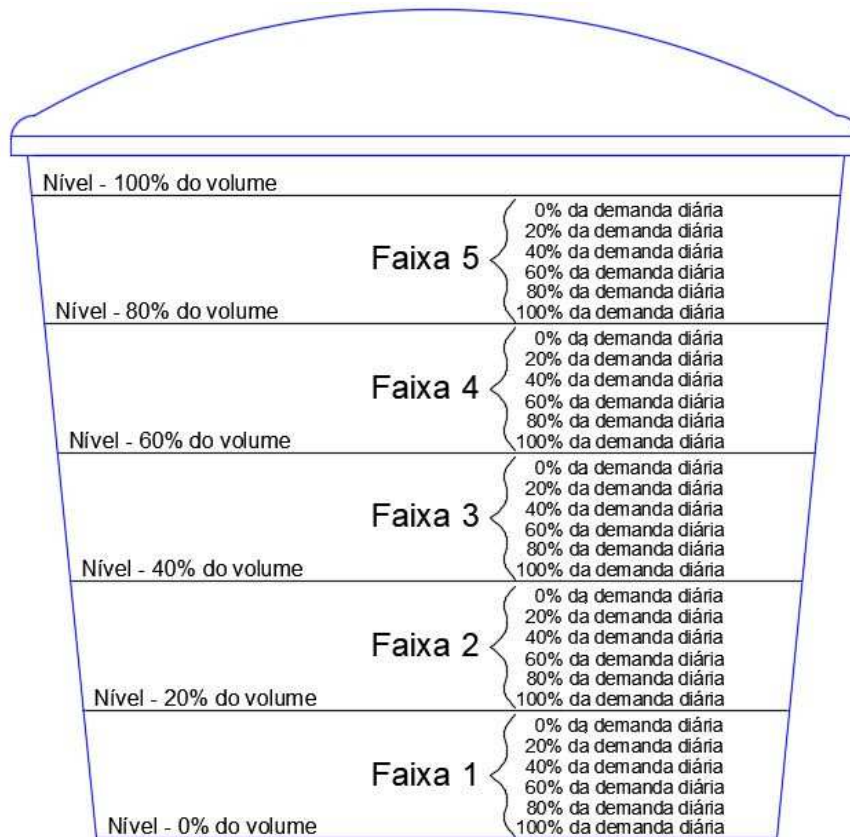


Tabela 6 Exemplo de conjunto de percentuais sobre a demanda diária de água para combinações com o parâmetro Nível do Reservatório

Regras	Nível do Reservatório				
	0 - 20% Vol	20 - 40% Vol	40 - 60% Vol	60 - 80% Vol	80 - 100% Vol
Regra 1	0	0	0	0	0
Regra 2	20	0	0	0	0
Regra 3	40	0	0	0	0
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
•	•	•	•	•	•
Regra 7774	60	100	100	100	100
Regra 7775	80	100	100	100	100
Regra 7776	100	100	100	100	100

### 5.2.2 Regra considerando apenas o período do mês

A segunda regra considerou o período mensal, ou seja, início, meio ou final de mês. Tal regra foi escolhida não só pela facilidade de utilização por parte do usuário, mas também pelo fato

de que o período do mês está relacionado com a quantidade de água já consumida, o que pode gerar alterações no que diz respeito ao melhor conjunto de regras.

Cada mês foi dividido em cinco faixas (do primeiro ao sexto dia, do sétimo ao décimo segundo dia, do décimo terceiro ao décimo oitavo dia, do décimo nono ao vigésimo quarto dia, e do vigésimo quinto ao último dia). Para cada faixa, foram testados diferentes percentuais, ou regras, aplicados sobre a demanda de água da chuva (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%).

Salienta-se que a aplicação desta regra considera, como premissa, que a verificação do consumo de água mensal para cobrança, por parte da concessionária, é realizada no último dia de cada mês.

### **5.2.3 Regra considerando apenas o período do ano**

A terceira regra considerou a época do ano, considerando-se quatro períodos que coincidem, aproximadamente, com as estações do ano:

- período 1: janeiro, fevereiro e março;
- período 2: abril, maio e junho;
- período 3: julho, agosto e setembro;
- período 4: outubro, novembro e dezembro.

Essa regra foi escolhida devido às diferenças existentes entre os períodos, relacionadas à demanda (maiores consumos no verão, por exemplo) e à oferta (histórico de precipitações médias que variam ao longo do ano), o que pode ser explorado a partir da criação de regras de uso para a água da chuva. Além disso, pode ser facilmente aplicada na prática, a partir da simples observação do período do ano pelo usuário.

Para cada período, foram testados diferentes percentuais, ou regras, aplicados sobre a demanda de água da chuva (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%).



### 5.2.4 Regra considerando apenas a precipitação média mensal histórica

A quarta regra analisada também levou em consideração os meses do ano, porém, as cinco faixas foram divididas de acordo com as precipitações médias mensais obtidas por meio das séries observada e sintéticas (Tabela 7).

Tabela 7 Faixas de precipitações médias mensais

Mês	Precipitação Média (mm)	Faixa
Ago	35,9	0 a 50
Jul	43,4	
Jun	45,2	
Set	63,4	50 a 100
Mai	65,0	
Abr	67,7	
Out	94,5	
Nov	123,3	100 a 150
Mar	145,5	150 a 200
Dez	184,8	
Fev	190,4	
Jan	213,0	maior que 200

Para cada período, foram testados diferentes percentuais, ou regras, aplicados sobre a demanda de água da chuva (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%).

Tal regra foi escolhida considerando-se que o uso da água baseado nos volumes médios de água da chuva ofertado ao reservatório, que variam de acordo com as faixas definidas, pode ser, a princípio, um fator relevante para a criação de regras de uso. Também pode ser facilmente aplicada na prática, a partir do acompanhamento do calendário.

### 5.2.5 Regra considerando apenas o consumo acumulado de água da chuva

O último fator concreto analisado foi o consumo de água da chuva acumulado ao longo do mês, justamente por estar diretamente associado ao consumo de água potável que acarretará em bônus ou multas ao final do mês.

Para esta análise, verificou-se, primeiramente, qual a média histórica de consumo de água da chuva para um uso desregrado da água do reservatório, cujo valor obtido foi o de 5,358 m<sup>3</sup>/mês, calculado por meio da simulação para o uso desregrado de água da chuva. Para cada dia, então, subtraiu-se este valor do consumo acumulado de água da chuva, enquadrando-se o resultado em uma das cinco faixas possíveis: valor maior ou igual a 20% do consumo de referência de água potável (bônus de 30%), valor maior ou igual a 15% e menor do que 20% do consumo de referência de água potável (bônus de 20%), valor maior ou igual a 10% e inferior a 15% do consumo de referência de água potável (bônus de 10%), valor maior ou igual a zero e inferior a 10% do consumo de referência (faixa sem bônus e sem multa), e, por fim, valor maior que -20% do consumo de referência de água potável e inferior a 0 (multa de 40%). Para valores inferiores a -20% do consumo de referência de água potável, referente a multa de multa de 100%, atribui-se o percentual de 100% para o consumo sobre a demanda diária.

Como desvantagem do uso desta regra, está o fato da necessidade de controle do consumo de água do reservatório ao longo do mês, que poderia ser realizado de forma manual, a partir da observação diária da diferença de nível do reservatório entre o início e final do dia, ou de forma automática, por exemplo, a partir da instalação de um hidrômetro na tubulação de saída do reservatório e um sensor de nível no reservatório.

### **5.2.6 Regra considerando apenas a chuva futura**

A última regra analisada individualmente levou em conta a chuva futura para diferentes períodos posteriores ao dia analisado. Salienta-se que se considerou o cenário de previsão perfeita, com 100% de acerto, para o qual as próprias séries observadas e sintéticas foram utilizadas como previsão. Foram testados, inicialmente, volumes de chuva oriundos da previsão de 1 até 7 dias, adotando-se a previsão de 3 dias para a criação das regras, por apresentarem resultados mais satisfatórios em relação ao período inferior e não divergindo muito em relação a períodos superiores, para os quais a probabilidade de erros aumenta.

Tal regra foi escolhida por considerar-se, a priori, que o conhecimento de eventos de precipitação futuros é um importante parâmetro para a tomada de decisão em relação ao gerenciamento de reservatórios e, por consequência, à criação de regras de uso para a água da chuva. Além disso, trata-se de um parâmetro que, na prática, pode ser facilmente observado,

por meio das previsões de clima disponíveis em diversos meios (embora tais previsões apresentem incertezas, desconsideradas neste trabalho).

Foram definidas diferentes faixas de previsão, testadas para 3 dias, com base no gráfico de frequências observado para as precipitações:

- faixa 1: 0 mm;
- faixa 2: menor ou igual a 5 mm;
- faixa 3: superior a 5 mm menor ou igual a 15 mm;
- faixa 4: superior a 15 mm e menor ou igual a 30 mm;
- faixa 5: superior a 30 mm.

Para cada faixa de previsão, testou-se diferentes percentuais, ou conjunto de regras, aplicados sobre a demanda de água da chuva (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%).

A Tabela 8 apresenta de forma resumida as faixas consideradas para todos os parâmetros envolvidos no estudo.

Tabela 8 Faixa para cada parâmetro considerado

		<b>Faixa</b>				
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Parâmetro</b>	<b>Nível do Reservatório</b>	0 a 1/5 do volume	1/5 a 2/5 do volume	2/5 a 3/5 do volume	3/5 a 4/5 do volume	4/5 a 5/5 do volume
	<b>Período do Mês</b>	até o 6º dia	entre o 7º e 12º dia	entre o 13º e 18º dia	entre o 19º e 24º dia	após 25º dia
	<b>Período do Ano</b>	janeiro a março	abril a junho	julho a setembro	outubro a dezembro	
	<b>Precipitação Média Mensal</b>	até 50mm (meses 8, 7 e 6)	Entre 50 e 100 mm (meses 9, 5 e 4)	Entre 100 e 150 mm (meses 11 e 3)	Entre 150 e 200 mm (meses 12 e 2)	acima de 200 mm (mês 1)
	<b>Consumo Acumulado de Água da Chuva - Consumo Médio de Água da Chuva</b>	acima de 20% do Consumo de Referência (água potável)	entre 15 e 20% do Consumo de Referência (água potável)	entre 10 e 15% do Consumo de Referência (água potável)	entre 0 e 10% do Consumo de Referência (água potável)	entre -20% e 0% do Consumo de Referência (água potável)
	<b>Chuva Futura para 3 dias</b>	$P = 0 \text{ mm}$	$0 < P \leq 5 \text{ mm}$	$5 < P \leq 15 \text{ mm}$	$15 < P \leq 30 \text{ mm}$	$P > 30 \text{ mm}$

### 5.3 Período utilizado para criação das regras

A criação de regras de uso de água da chuva tem sua importância principal em épocas de escassez de água, relacionadas, normalmente, a períodos de baixas precipitações, que tendem a elevar o consumo de água potável justamente pela reduzida oferta de água da chuva, o que gera, conseqüentemente, multas aos usuários. Sendo assim, buscando-se regras que possam ser aplicadas principalmente nestes períodos, optou-se pela consideração de um período crítico para a criação das regras. Para isso, de cada uma das 20 séries sintéticas de 30 anos, extraiu-se o ano com a menor precipitação total anual, gerando um novo conjunto de 20 séries sintéticas de anos críticos, apresentados na Figura 15. Estes valores estão próximos as menores precipitações anuais constantes na série observada, em torno do percentil de 5% dessa série. Salienta-se que os percentis apresentados são referentes às precipitações anuais da série observada. A Figura 16 apresenta as medias mensais para as 20 séries sintéticas.

Figura 15 Séries sintéticas com precipitações anuais críticas

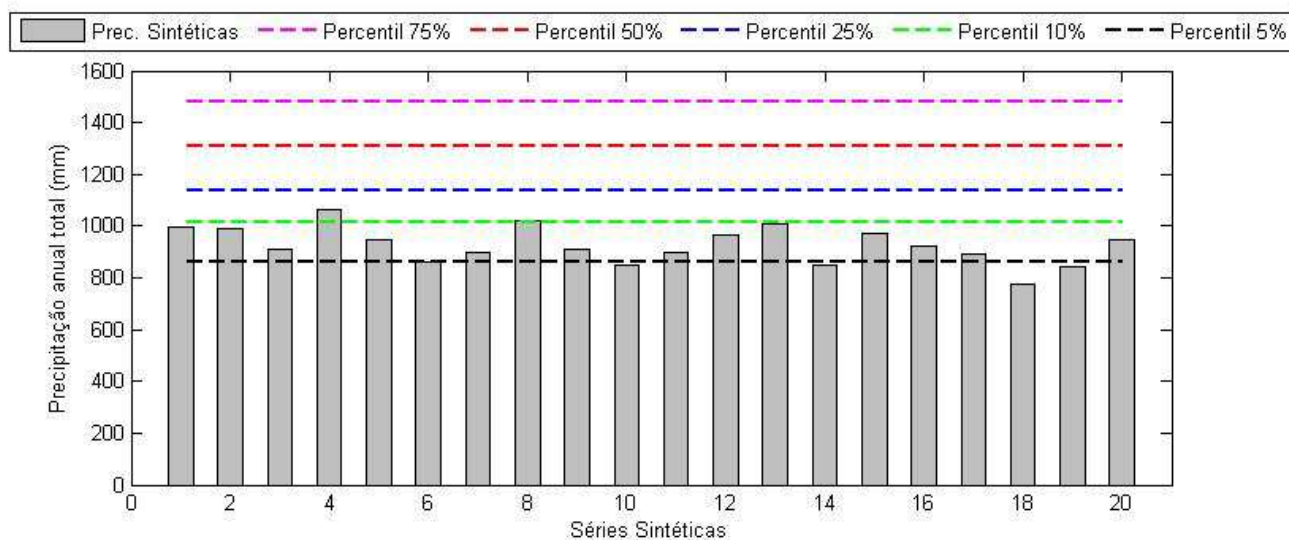
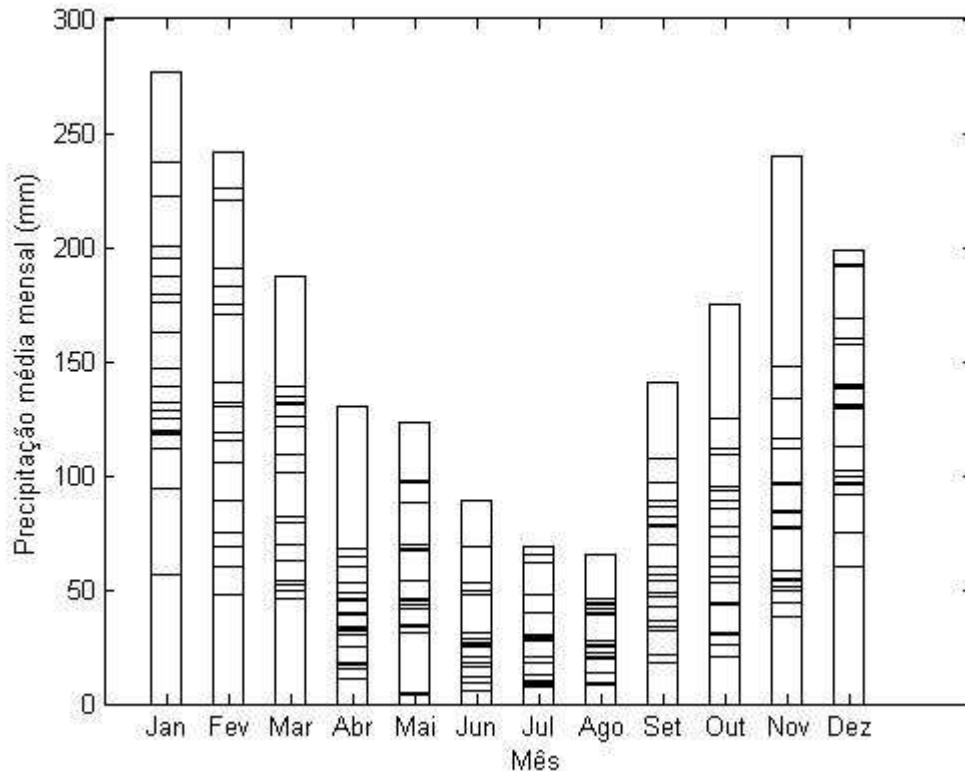


Figura 16 Médias mensais para os 20 anos críticos das séries sintéticas



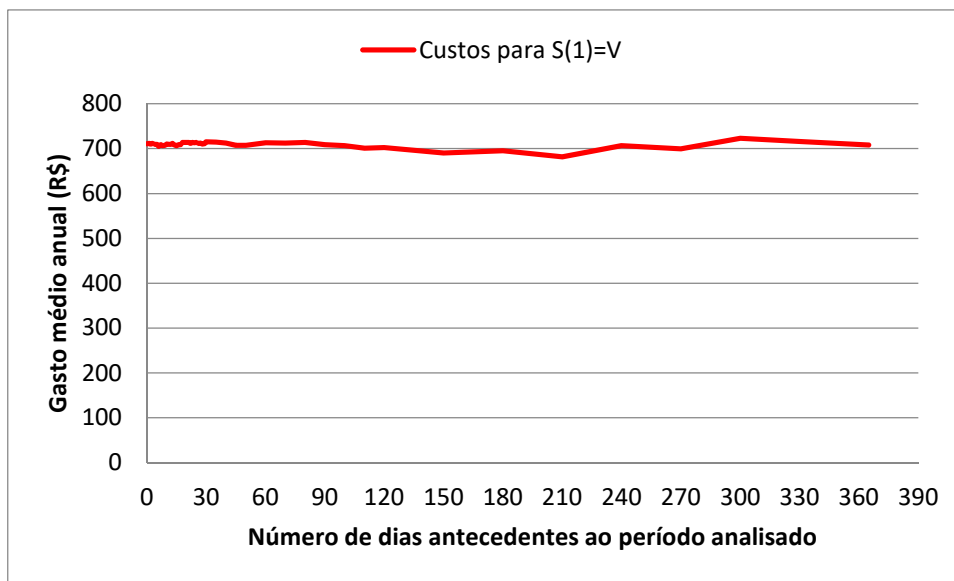
Devido à utilização do período de apenas um ano para as simulações, os resultados podem ser afetados pelo volume inicial “S(1)” considerado para o reservatório, tendo em vista que reservatórios com volumes inferiores não oferecem capacidade de regularização interanual. Sendo assim, optou-se por verificar o número de dias necessários para estabilizar o custo médio anual com água da companhia, a partir de simulações realizadas para o uso desregado da água do reservatório, com diferentes números de dias antecedendo ao período analisado de um ano.

Os resultados, referentes à média obtida entre as 20 séries sintéticas, são apresentados na Figura 17, por meio da qual é possível verificar que os custos anuais, calculados apenas para os 365 dias do ano de interesse, giram em torno de R\$ 700,00, independentemente do número de dias antecedentes ao período analisado.

A pequena variação dos resultados pode ser explicada pelo fato do ano hidrológico considerado para o estudo (janeiro a dezembro) possuir menores precipitações médias nos meses centrais e maiores precipitações médias nos extremos. Por consequência, as altas precipitações normalmente encontradas em períodos próximos a janeiro fazem com que o

reservatório esteja, na maioria das vezes, com altos níveis no início do período analisado, independente dos números de dias que o antecedem, fazendo com que a consideração do volume cheio para início das simulações seja a mais apropriada.

Figura 17 Custo anual com água da companhia em função do número de dias antecedentes ao período analisado



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 SÉRIES SINTÉTICAS GERADAS

As figuras 18, 19, 20 e 21 apresentam os gráficos utilizados para a avaliação da qualidade das séries de precipitações sintéticas geradas, por meio da comparação com a série histórica da estação pluviométrica código 02346117, denominada Mirante Santana, localizada em São Paulo. Os gráficos foram gerados a partir da calibração manual, por tentativa e erro, efetuada por meio dos coeficientes de ponderação A e B da equação 1, da qual obtiveram-se, como melhores resultados, as séries geradas a partir dos valores de  $A = 1,63$  e  $B = 2,61$ . Salienta-se que as séries foram geradas desconsiderando-se a etapa referente à correção do desvio padrão, dada pela equação 3, tendo em vista os melhores resultados obtidos apenas com a correção das médias, dada pela equação 2.

Figura 18 Médias mensais para precipitações sintéticas e observada

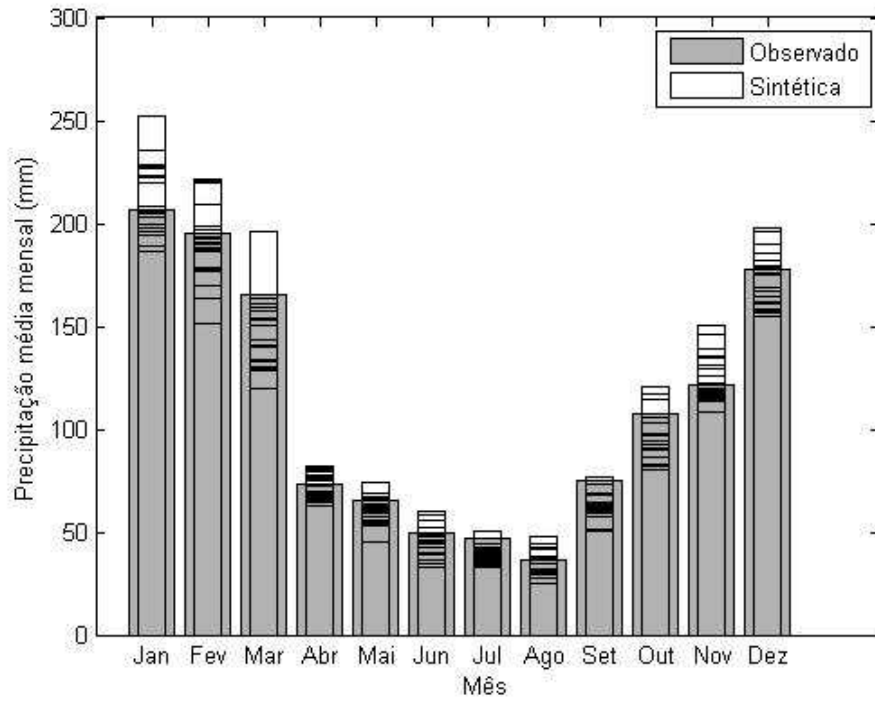


Figura 19 Precipitação acumulada para precipitações sintéticas e observada

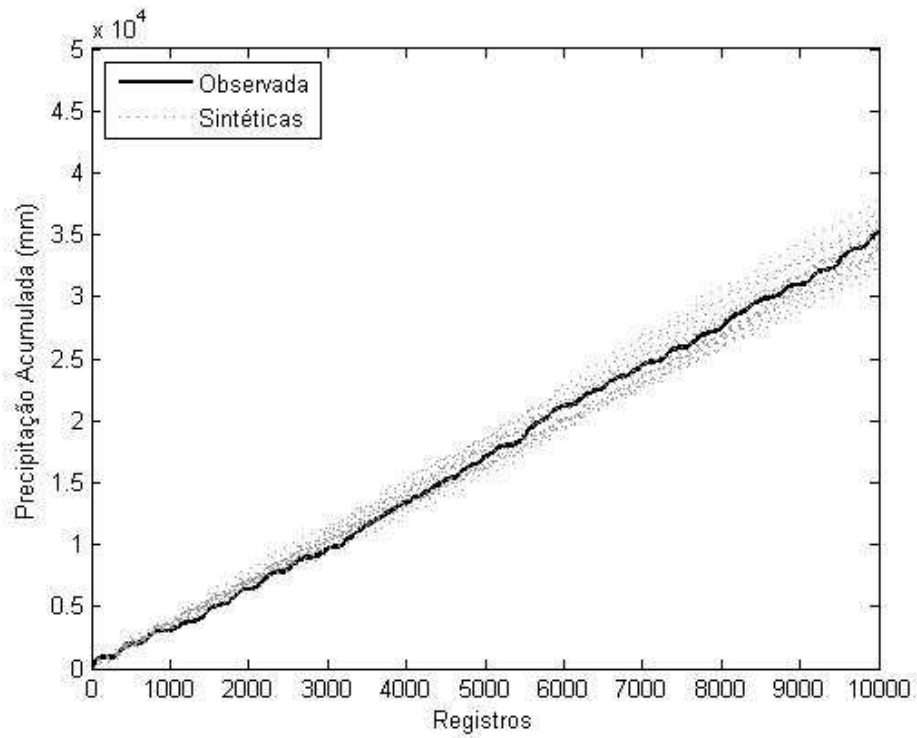




Figura 20 Frequência relativa para precipitações sintéticas e observada

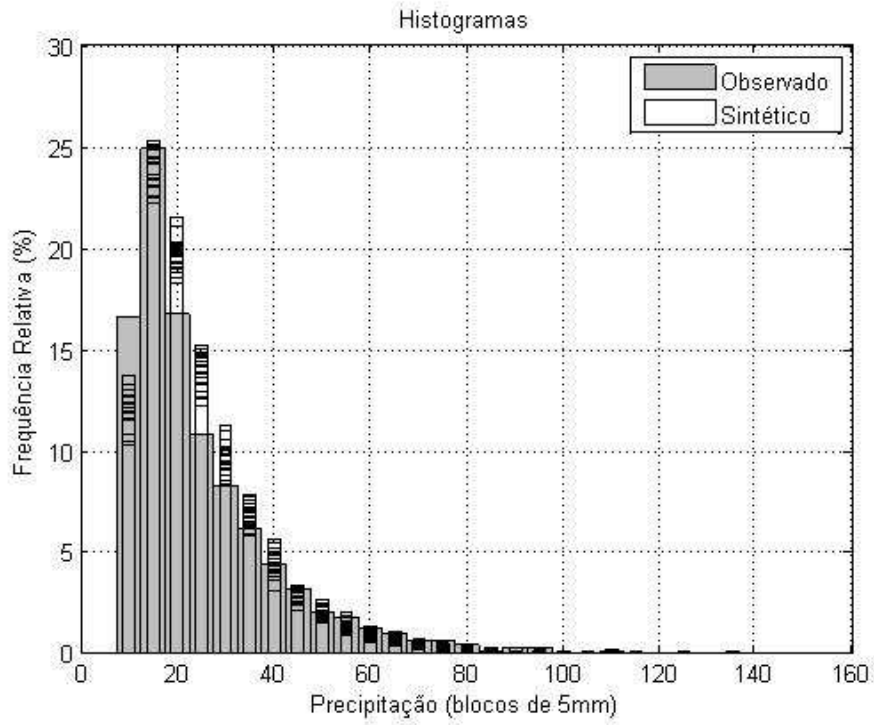
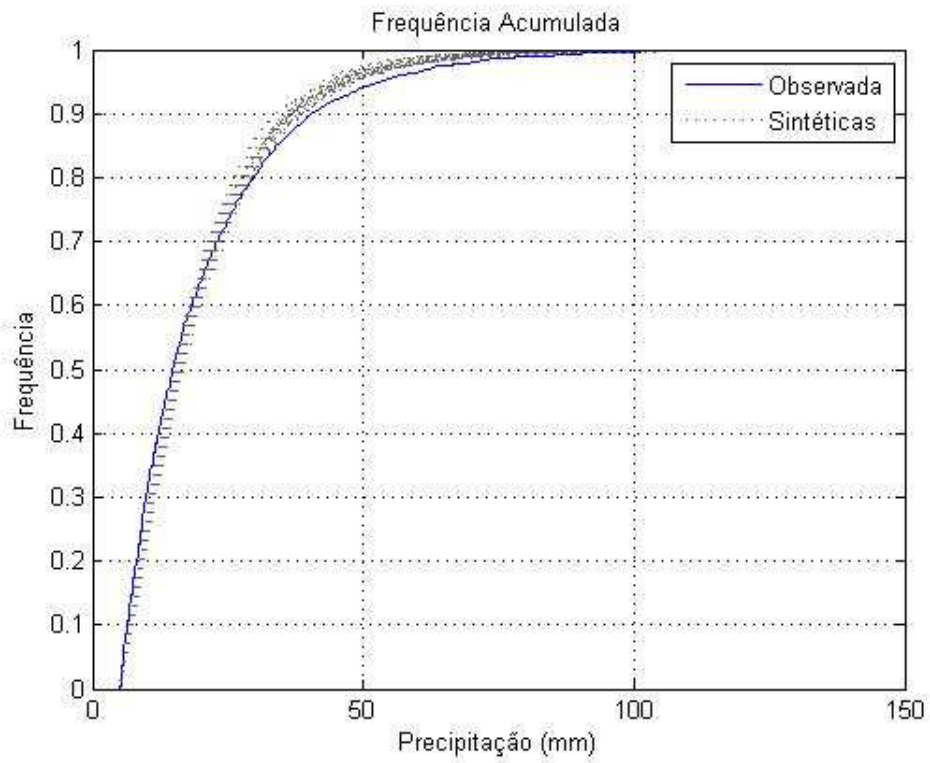


Figura 21 Frequência acumulada para precipitações sintéticas e observada

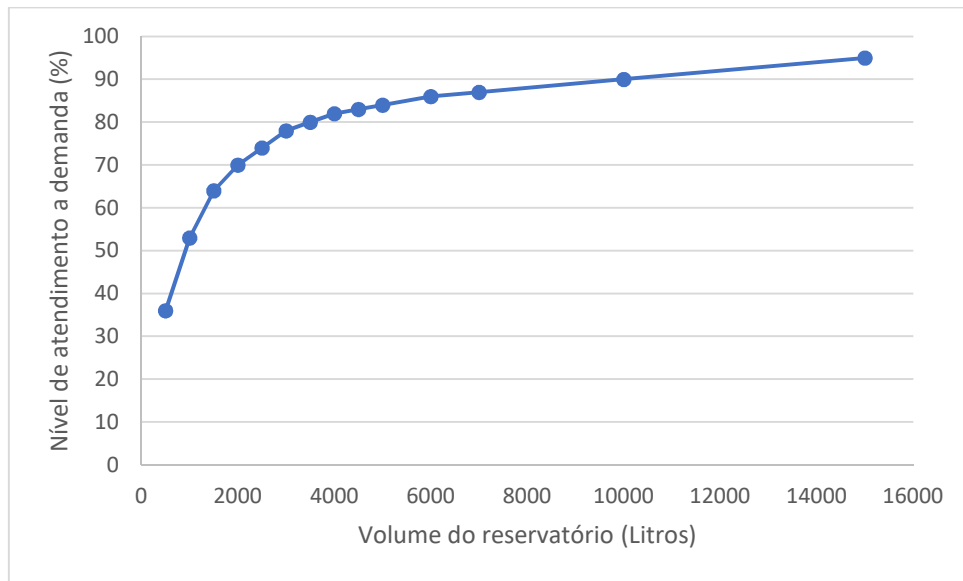


Os gráficos mostram a similaridade existente entre a série observada e as séries sintéticas geradas, demonstrando a preservação das propriedades da série histórica nas novas séries. Percebe-se, também, que o período de menores precipitações médias, em São Paulo, ocorre nos meses centrais do ano, entre abril e setembro, principalmente. Observa-se, ainda, que para dias chuvosos, as precipitações que variam entre 5 e 10 mm ocorrem com maior frequência. Em relação ao gráfico de precipitação acumulada, observa-se que, apesar da dispersão aumentar em termos de valores absolutos para um número maior de registros, a mesma se mantém constante relativamente ao número de registros, resultando em uma envoltória simétrica à série observada.

## 6.2 DEFINIÇÃO DO VOLUME E NÍVEL DE ATENDIMENTO À DEMANDA

Como citado anteriormente, o volume de reservatório adotado teve como premissa um nível de garantia de atendimento a demanda que fornecesse capacidade de regularização ao consumidor (operador) e, ao mesmo tempo, não fosse elevado demais a ponto de tornar desnecessárias possíveis alterações na operação do reservatório na busca por benefícios econômicos. Para todos os volumes testados, cujos níveis de garantia de atendimento à demanda são apresentados na Figura 22, e considerando-se a área de captação definida para o estudo, verificou-se o número de vezes em que o consumo mensal de água da companhia esteve em cada faixa de bônus ou multa, a partir do uso desregrado da água da chuva. Os resultados são apresentados na Tabela 9. Estes valores se referem aos 360 meses que compõem o período de 30 anos analisado, sendo oriundos da média dos resultados para cada série considerada (observada e sintéticas).

Figura 22 Nível de atendimento à demanda em função do volume do reservatório de água pluvial



O curva do gráfico acima demonstra que, a partir de volumes correspondentes a 3.000 e 4.000 litros, grandes acréscimos em volume acarretam em pequenas variações no nível de atendimento a demanda, servindo como indício de que o volume ótimo encontra-se nesta faixa. Como critério auxiliar, verificou-se o número de bônus e multas proporcionados por cada volume.

Tabela 9 Número de bônus e multas obtido para o uso desregrado de água

Volume Reservatório (L)	Consumo Referência (água potável) (m <sup>3</sup> /mês)	Atendimento à demanda (%)	Bônus 30%	Bônus 20%	Bônus 10%	Sem Bônus	Multa 40%	Multa 100%	Total	Total Bônus	Total Multas
500	15,21	36	1,33	7,43	26,67	139,19	185,00	0,38	360	35	185
1000	13,94	53	8,57	22,05	40,71	110,76	165,66	12,24	360	71	178
1500	13,19	64	11,86	33,52	47,53	97,90	139,76	29,43	360	93	169
2000	12,72	70	11,52	23,86	74,81	87,43	123,71	38,67	360	110	162
2500	12,41	74	11,90	30,85	81,14	84,95	106,81	44,33	360	124	151
<b>3000</b>	<b>12,19</b>	<b>78</b>	<b>0,00</b>	<b>23,05</b>	<b>116,86</b>	<b>77,24</b>	<b>96,48</b>	<b>46,38</b>	<b>360</b>	<b>140</b>	<b>143</b>
3500	12,04	80	0,00	24,57	133,00	65,76	89,10	47,57	360	158	137
4000	11,91	82	0,00	20,67	61,00	149,09	79,81	49,43	360	82	129
4500	11,82	83	0,00	21,62	63,43	152,05	74,33	48,57	360	85	123
5000	11,74	84	0,00	22,00	67,71	153,00	69,52	47,76	360	90	117
6000	11,62	86	0,00	22,29	7,19	222,91	62,14	45,48	360	29	108
7000	11,52	87	0,00	22,76	7,05	230,29	56,00	43,91	360	30	100
10000	11,27	90	0,00	0,00	30,00	250,86	43,29	35,86	360	30	79
15000	10,93	95	0,00	0,00	22,95	292,10	25,33	19,62	360	23	45

Analisando-se a Tabela 9, é possível perceber que, dentro da faixa de volumes avaliados, o número total de multas se reduz à medida que o volume do reservatório aumenta. Ao mesmo tempo, o número total de bônus cresce somente até volumes que proporcionam níveis de atendimento à demanda da ordem de 80%, a partir dos quais começa a decrescer. A partir deste ponto, os valores relativos à coluna “sem bônus” crescem com o aumento do volume dos reservatórios, servindo como indício de que, para estes volumes, a operação do reservatório terá pouca influência na aquisição de bônus ou multas, visto que os altos níveis de atendimento a demanda proporcionados, mesmo por um uso desregrado da água, fazem com que os consumos estejam sempre próximos aos respectivos consumos de referência para o cálculo de bônus e multas. Isto pode ser explicado pelo fato de que residências com reservatórios pluviais de maior porte, devido aos maiores volumes armazenados no mesmo, são menos afetadas por variações na oferta de água, tendo em vista uma demanda constante. Observa-se, também, que os altos níveis de atendimento à demanda reduzem o consumo de referência para o consumidor que já possui o reservatório antes do início da aplicação das tarifas, tornando mais difícil a aquisição de bônus.

Sendo assim, decidiu-se pela utilização do volume de 3.000 litros para a obtenção das regras de uso de água da chuva armazenada em reservatórios, volume comercial que se encontra imediatamente antes do início da faixa em que a zona correspondente à coluna “sem bônus” começa a crescer.

### 6.3 CENÁRIO COM IMPLANTAÇÃO DE RESERVATÓRIO NO PRINCÍPIO DA CRISE DE ABASTECIMENTO

Um dos principais fatores que influenciam nos resultados oriundos da aplicação das tarifas de contingência da SABESP é o consumo médio mensal da residência no ano anterior ao início da aplicação das tarifas (consumo de referência). Este consumo pode apresentar diferenças significativas entre casos nos quais a residência já possuía um reservatório instalado e o outro no qual a mesma não possuía tal reservatório.

Sendo assim, a primeira análise realizada levou em conta um cenário no qual a residência não dispunha de reservatório antes da aplicação das tarifas de contingência, passando a adotá-lo após o início do período de contingenciamento, como forma de reduzir o consumo de água

fornecida pela companhia de saneamento. Para este cenário, a partir dos dados de consumo per capita, população por residência e acréscimos de consumo no verão apresentados no capítulo 5, obteve-se o valor de 17,55 m<sup>3</sup>/mês para o consumo de água no período anterior à implantação do reservatório, adotado como consumo de referência para o cálculo das tarifas.

Para este consumo, verificou-se a influência das tarifas de contingência pela simples implantação do reservatório, sem regras de uso de água. Os resultados oriundos das médias obtidas para a simulação de todas as séries analisadas (observada e sintéticas) são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 Consumos e custo com água da companhia para o uso desregrado de água da chuva com implantação posterior de reservatório

Mês	Sem Reservatório			Com Reservatório		
	Consumo Médio (m <sup>3</sup> )	Custo Médio (R\$)	Custo Médio com TC* (R\$)	Consumo Médio (m <sup>3</sup> )	Custo Médio (R\$)	Custo Médio com TC* (R\$)
Jan	19,48	68,17	95,44	11,20	39,20	27,57
Fev	17,75	62,14	85,05	10,24	29,44	20,63
Mar	17,26	60,40	60,40	11,17	39,09	27,42
Abr	16,79	58,76	58,76	11,62	40,66	28,93
Mai	17,37	60,78	60,78	13,05	45,68	34,82
Jun	16,83	58,90	58,90	13,11	45,90	35,25
Jul	17,39	60,86	60,86	13,96	48,85	39,76
Ago	17,40	60,89	60,89	14,59	51,08	43,38
Set	16,79	58,76	58,76	12,79	44,75	33,43
Out	17,31	60,58	60,58	12,01	42,05	30,19
Nov	16,73	58,56	58,56	11,03	38,60	27,10
Dez	19,54	68,40	95,76	11,56	40,47	28,62
Médias	17,55	61,43	67,90	12,19	42,15	31,43

\*tarifa de contingência

Analisando-se a tabela acima, é possível perceber que, com a adoção das tarifas de contingência, há um acréscimo nos valores dos custos relativos aos meses do período de verão para situações em que a residência não conta com o reservatório de água da chuva, ocasionadas pelo pagamento de multas devido ao aumento de consumo de água neste período (acréscimo de 35% no presente estudo).

Porém, percebe-se que a simples implementação do reservatório com nível de atendimento à demanda na ordem de 80% é capaz de reduzir significativamente o consumo médio mensal de água da companhia, atingindo-se reduções, em média, superiores a 20%, gerando bônus de 30% em quase todos os meses do ano.

Sendo assim, percebe-se que a simples instalação do reservatório já traz grandes benefícios econômicos ao consumidor, e a adoção de regras de uso de água da chuva torna-se desnecessária para este cenário.

Contudo, em um cenário no qual a residência já possui reservatório no ano anterior ao início da aplicação das tarifas, parte-se de um menor valor de referência de consumo, que, por consequência, é mais difícil de ser atingido. Os resultados para este cenário são apresentados no próximo item.

#### 6.4 CENÁRIO COM RESERVATÓRIO IMPLEMENTADO ANTES DO PERÍODO DE CRISE DE ABASTECIMENTO

Como citado anteriormente, o consumo de referência para o cálculo da aplicação de multas ou bônus, de acordo com o modelo de tarifas de contingência imposto pela SABESP, é menor para aquelas residências que já possuíam reservatórios de água da chuva no período anterior ao da aplicação das tarifas (crise de abastecimento), o que dificulta a aquisição de bônus. Este valor está associado ao volume de reservatório utilizado, e deve ser definido com base em simulação que leve em conta, entre outros fatores, as séries de precipitações e as demandas por água.

Considerando-se o uso desregrado da água do reservatório de 3000 litros (volume definido para o estudo), utilizou-se como consumo de referência o valor correspondente a média dos consumos mensais de água da companhia para a situação na qual se implantara o reservatório, cujos resultados foram apresentados na Tabela 10. O valor obtido foi de 12,19 m<sup>3</sup>/mês, servindo como base para o cálculo dos bônus e multas a serem adquiridos ao longo do tempo a partir da aplicação das tarifas.

Os resultados oriundos das médias obtidas para a simulação de todas as séries analisadas (observada e sintéticas) são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 Consumos e custo com água da companhia para o uso desregrado de água da chuva com reservatório já implantado

<b>Mês</b>	<b>Consumo Médio Potável (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo Médio Chuva (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Custo Médio sem TC* (R\$)</b>	<b>Custo Médio com TC (R\$)*</b>
Jan	11,20	8,28	39,20	38,37
Fev	10,24	7,51	29,44	31,44
Mar	11,17	6,09	39,09	37,82
Abr	11,62	5,17	40,66	44,57
Mai	13,05	4,31	45,68	63,41
Jun	13,11	3,71	45,90	65,18
Jul	13,96	3,43	48,85	78,42
Ago	14,59	2,80	51,08	87,53
Set	12,79	4,00	44,75	60,16
Out	12,01	5,29	42,05	49,05
Nov	11,03	5,70	38,60	38,20
Dez	11,56	7,98	40,47	42,55
Medias	12,19	5,35	42,15	53,06

\*tarifa de contingência

Analisando-se a tabela, é possível perceber que, embora os valores de consumos e custos com a conta de água, sem a aplicação das tarifas de contingência, permaneçam os mesmos que os da Tabela 10 para situações em que há reservatório instalado, quando as tarifas são aplicadas, os valores das contas de água, em média, tendem a subir consideravelmente. Isso se deve à dificuldade de se atingir as metas de redução de consumo, provenientes de uma referência de consumo baixa devido à utilização prévia da água da chuva para suprimento de parte da demanda, o que acaba gerando multas ao consumidor, principalmente em períodos de seca.

É possível perceber, também, que em alguns meses, embora o consumo médio calculado seja um pouco menor quando comparado com a referência de consumo (12,19 m<sup>3</sup>/mês), os custos médios com tarifas de contingência são superiores aos gastos sem tarifa. Esse fato pode ser explicado pelo maior peso das multas em relação aos bônus, que mesmo em menor número, em média, acabam por elevar os custos.

Sendo assim, como forma de reduzir o pagamento das multas (ou aumentar as bonificações), a primeira alternativa é reduzir o consumo de água da companhia. Porém, em muitos casos, consumidores que já utilizavam a água de maneira moderada, por exemplo, podem ter dificuldades em atingir metas de redução ainda maiores de consumo. Como alternativa, parte-



se para a criação das regras de uso de água da chuva, que, a partir de um mesmo consumo total diário de água, apresentará os melhores momentos para a utilização da água da companhia e da água da chuva armazenada em reservatórios, visando ao benefício econômico do consumidor. Salienta-se que a criação das regras visa ao incentivo à adoção de sistemas de aproveitamento de água da chuva pela população, o que, por consequência, reduz sobrecargas nas companhias de saneamento. Tais regras são apresentadas nos próximos itens.

## 6.5 REGRAS DE USO DE ÁGUA DA CHUVA

A seguir serão apresentados os resultados referentes aos custos médios anuais com água da companhia, obtidos por meio das simulações realizadas para as regras de uso de água da chuva. Foram analisadas regras que consideram um único parâmetro, assim como a combinação entre dois, três e até quatro parâmetros.

### 6.5.1 Regras com 1 parâmetro

As primeiras simulações realizadas consideraram apenas um parâmetro na busca de regras que levassem à redução do custo anual com água da companhia. Todos os parâmetros considerados isoladamente, porém, não proporcionaram reduções para este custo, sendo o uso desregrado de água da chuva o mais viável economicamente, quando extraídas as médias dos resultados entre as simulações realizadas para os anos críticos das 20 séries sintéticas de 30 anos.

Para ilustrar isso, a Tabela 12 apresenta as três melhores regras obtidas para cada parâmetro, por meio da qual é possível visualizar que, independentemente da faixa em questão, o uso de 100% da demanda diária por água da chuva (sempre que possível) proporciona o maior benefício econômico ao consumidor.

Tabela 12 Melhores combinações para um parâmetro

Parâmetro	Custo Anual Sem Tarifa* (R\$)	Consumo Anual* (m³)	Custo Anual Com Tarifa* (R\$)	Percentual de uso sobre a demanda				
				Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Nível do Reservatório	525,11	151,74	713,04	100	100	100	100	100
	525,49	151,86	714,30	80	100	100	100	100
	527,26	152,01	715,62	60	100	100	100	100
Período do Mês	525,11	151,74	713,04	100	100	100	100	100
	534,80	152,80	725,05	100	100	80	100	100
	535,20	152,91	726,22	80	100	100	100	100
Período do Ano	525,11	151,74	713,04	100	100	100	100	
	527,06	152,30	713,79	100	80	100	100	
	526,76	152,21	719,22	100	100	80	100	
Precipitação Mensal Média	525,108	151,742	713,04	100	100	100	100	100
	525,584	151,878	717,04	80	100	100	100	100
	526,696	152,196	720,23	60	100	100	100	100
Consumo Acumulado	525,11	151,74	713,04	100	100	100	100	100
	525,28	151,97	714,06	60	100	100	100	100
	525,50	151,86	714,17	80	100	100	100	100
Chuva Futura	525,11	151,74	713,04	100	100	100	100	100
	531,11	152,28	720,11	100	100	100	100	80
	532,59	152,69	722,60	100	80	100	100	100

\*media entre as 20 séries sintéticas

Apesar do uso desregrado ter-se mostrado o mais viável economicamente para todos os parâmetros isolados, os resultados obtidos serviram como base para a obtenção de regras que consideram a combinação entre dois ou mais parâmetros.

A Tabela 12 apresenta os três melhores resultados de cada parâmetro, porém, conforme mencionado no capítulo de metodologia, no total, foram realizadas 6<sup>5</sup> simulações<sup>4</sup>, totalizando 7776 combinações, oriundas dos seis percentuais de uso (0, 20, 40, 60, 80 e 100) e das cinco faixas consideradas. Sendo assim, para as 100 melhores combinações de cada parâmetro (aquelas que proporcionaram o menor custo anual com água da companhia), verificou-se o número de vezes em que o percentual 100 aparece em cada faixa, cujos resultados são apresentados na Tabela 13.

<sup>4</sup> Conforme citado anteriormente, para o parâmetro Período do Ano, exclusivamente, foram realizadas 6<sup>4</sup> simulações, totalizando 1296 combinações.

Tabela 13 Número de vezes do percentual 100 em cada faixa, para as 100 melhores combinações

Parâmetro	Percentual de uso sobre a demanda total				
	100% na Faixa 1	100% na Faixa 2	100% na Faixa 3	100% na Faixa 4	100% na Faixa 5
Nível do Reservatório	24	40	54	67	86
Período do Mês	54	55	52	53	61
Período do Ano	52	31	29	50	
Precipitação Mensal Media	31	52	50	72	49
Consumo Acumulado	17	30	42	64	100
Chuva futura	79	46	59	63	34

O percentual 100 em determinada faixa indica que, para tal faixa, deve-se utilizar 100% sobre a demanda diária de água da chuva sempre que possível. Logo, faixas que apresentam este percentual em grande parte das melhores regras obtidas estão menos sensíveis a reduções no consumo visando benefícios econômicos.

Ao mesmo tempo, uma quantidade reduzida do percentual 100 em determinada faixa indica que a mesma é suscetível a alterações em relação a percentuais de uso da demanda de água da chuva que proporcionem vantagens econômicas. Sendo assim, para regras que combinam dois parâmetros, considerou-se apenas tais faixas (para um dos parâmetros) para as simulações, a fim de reduzir o número total de combinações, limitado por critério de capacidade computacional, atribuindo o percentual 100 às demais. Salienta-se que não se buscou um computador de alta capacidade, tendo em vista o intuito de a metodologia ser replicada, e a necessidade de um supercomputador não ir ao encontro de tal intuito. No próximo item, são apresentados os critérios considerados para o prosseguimento do estudo.

### 6.5.2 Regras com 2 parâmetros

Como citado no item anterior, das simulações realizadas para cada parâmetro isolado, foi possível verificar quais as faixas mais sensíveis a alterações em relação ao percentual de uso sobre a demanda de água da chuva. Sendo assim, para a combinação de dois fatores, os parâmetros foram classificados como:

- parâmetros variáveis: considerou-se novamente todas as faixas apresentadas na Tabela 8;
- parâmetros fixos: atribui-se o valor 100 para as faixas menos suscetíveis a alterações, agrupando as demais em uma única faixa e combinando-as com o parâmetro variável.

Os critérios utilizados para a divisão dos parâmetros fixos, tendo como base a Tabela 13, são apresentados a seguir:

- nível do reservatório: desconsiderou-se as faixas 4 e 5 para a combinação com outros parâmetros, atribuindo o percentual 100 quando o reservatório estiver com volume superior a 4/5 de sua capacidade;
- período do mês: o único parâmetro para o qual observou-se um equilíbrio entre todas as faixas. Sendo assim, atribuiu-se o percentual 100 para a primeira quinzena do mês, admitindo-se que a segunda quinzena tende a ter mais influência na criação das regras, tendo em vista que nesta faixa, são maiores as chances das metas de consumo do mês em questão já terem sido atingidas;
- período do ano: atribuiu-se o percentual 100 para as faixas 1 e 4, correspondentes aos meses mais chuvosos;
- precipitação média mensal: atribuiu-se o percentual 100 para todas as faixas, exceto a primeira, correspondente aos meses cuja precipitação média histórica é inferior a 50 mm;
- consumo acumulado: atribuiu-se o percentual 100 apenas para a faixa 5, devido ao indicativo de que se deve consumir água equivalente a 100% da demanda por água da chuva enquanto a diferença entre o consumo acumulado e o consumo médio de água da chuva for insuficiente para evitar multas na conta de água do consumidor;
- chuva futura: atribuiu-se o percentual 100 para a faixa 1, correspondente a períodos de três dias para os quais não há previsão de chuva, devido ao fato da ausência de chuvas neste período não oferecer capacidade de regularização suficiente para a obtenção de benefícios econômicos.

Os melhores resultados obtidos para as combinações entre dois parâmetros são apresentados na Tabela 14. Nesta tabela, estão destacadas todas as combinações que proporcionaram vantagem econômica em relação ao uso desregrado, dado pela coluna referente ao Custo Anual com Tarifa (de contingência).

Tabela 14 Melhores combinações para dois parâmetros

Regra	Parâmetro Variável	Parâmetro Fixo	Custo Anual Sem Tarifa* (R\$)	Custo Anual Com Tarifa* (R\$)	Consumo Anual* (m <sup>3</sup> )	Percentual de uso sobre demanda (Parâmetro Variável)				
						Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
1	Nível Reserv.	Período Ano	525,37	712,17	151,82	60	100	100	100	100
2	Nível Reserv.	Período Mês	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
3	Nível Reserv.	Chuva Futura	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
4	Nível Reserv.	Prec. Media	525,31	711,83	151,80	100	100	100	100	60
5	Nível Reserv.	Consumo ac.	526,75	711,80	152,04	0	80	100	100	100
6	Consumo ac.	Período Ano	525,87	708,18	151,96	100	100	100	0	100
7	Consumo ac.	Período Mês	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
8	Consumo ac.	Chuva Futura	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
9	Consumo ac.	Prec. Media	526,50	708,79	152,14	100	100	100	100	0
10	Consumo ac.	Nível Reserv.	527,01	711,15	152,11	100	100	100	60	100
11	Período Ano	Nível Reserv.	525,79	712,40	151,94	100	80	100	100	
12	Período Ano	Período Mês	525,71	710,73	151,92	100	80	100	100	
13	Período Ano	Chuva Futura	525,95	711,85	151,98	100	80	100	100	
14	Período Ano	Consumo ac.	525,48	707,05	151,85	100	0	100	100	
15	Período Mês	Nível Reserv.	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
16	Período Mês	Período Ano	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
17	Período Mês	Chuva Futura	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
18	Período Mês	Prec. Media	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
19	Período Mês	Consumo ac.	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
20	Prec. Media	Nível Reserv.	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
21	Prec. Media	Período Mês	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
22	Prec. Media	Chuva Futura	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
23	Prec. Media	Consumo ac.	527,71	709,64	152,48	0	0	60	100	100
24	Chuva Futura	Nível Reserv.	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
25	Chuva Futura	Período Ano	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
26	Chuva Futura	Período Mês	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100
27	Chuva Futura	Prec. Media	525,44	712,33	151,84	100	0	40	100	100
28	Chuva Futura	Consumo ac.	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100

\*media entre as 20 séries sintéticas

Percebe-se que a economia proporcionada é muito pequena quando comparada ao custo oriundo do uso desregado de água da chuva (R\$ 713,04), devido ao fato desse valor originar-se da média entre os resultados das 20 séries sintéticas consideradas. Portanto, a fim de se verificar a potencial economia proporcionada por tais regras em um período de escassez, as

mesmas foram simuladas no ano crítico de 2014, cujos resultados são apresentados na Tabela 15. Salienta-se que, além das melhores combinações apresentadas na Tabela 14, as simulações foram realizadas também para os demais conjuntos de percentuais que proporcionaram resultados mais econômicos quando comparado ao uso desregrado.

Tabela 15 Melhores regras com dois parâmetros para o ano crítico de 2014

Regra	Parâmetro Variável	Parâmetro Fixo	Custo Anual sem Tarifa (R\$)	Custo Anual com Tarifa (R\$)	Consumo Anual Potável (m³)	Número de bônus/multa em 2014						Percentual de uso sobre demanda (Parâmetro Variável)					Economia Anual (%)
						Bônus 30%	Bônus 20%	Bônus 10%	Sem Bônus	Multa 40%	Multa 100%	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5	
<b>USO DESREGRADO</b>			<b>563,20</b>	<b>866,37</b>	<b>160,91</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>100</b>					
1	Nível Reserv.	Período Ano	563,20	865,50	160,91	0	0	2	1	5	4	40	100	100	100	100	0,1
4	Nível Reserv.	Prec. Media	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	0
5	Nível Reserv.	Consumo Ac.	563,20	852,20	160,91	0	0	1	3	4	4	0	80	60	100	100	1,64
6	Consumo Ac.	Período Ano	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	0
9	Consumo Ac.	Prec. Media	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	0
10	Consumo Ac.	Nível Reserv.	563,20	852,61	160,91	0	0	1	3	4	4	20	100	100	60	100	1,59
11	Período Ano	Nível Reserv.	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100		0,14
<b>12</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Período Mês</b>	<b>563,33</b>	<b>834,25</b>	<b>160,95</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>100</b>		<b>3,71</b>
<b>13</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>563,50</b>	<b>835,71</b>	<b>161,00</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>100</b>		<b>3,54</b>
14	Período Ano	Consumo Ac.	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100		0
23	Prec. Media	Consumo Ac.	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	0,14
27	Chuva Futura	Prec. Media	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	0

A seguir, são apresentadas e analisadas as tabelas de regras de uso de água da chuva para os melhores resultados envolvendo dois parâmetros, destacados na Tabela 15.

#### 6.5.2.1 Período do Ano x Período do Mês

Tabela 16 Período do ano x Período do Mês (Regra 12)

		Período do Mês	
		até 15° dia	16° ao último dia
Período do Ano	Janeiro - Março	100	100
	Abril - Junho	100	<b>80</b>
	Julho - Setembro	100	100
	Outubro - Dezembro	100	100

Analisando a regra da Tabela 16, é possível perceber que na quinzena final dos meses, é conveniente reduzir de maneira moderada o uso de água da chuva, a fim de que uma parcela desta água seja consumida no mês seguinte. Isto ocorre apenas entre abril e junho, meses historicamente pouco chuvosos em São Paulo, nos quais o consumo total da água da chuva em um mês pode ser insuficiente para o alcance de uma nova faixa de bônus, ao mesmo tempo em que o armazenamento da água de um mês para outro pode ser essencial para a saída de uma faixa de multa.

#### 6.5.2.2 Período do Ano x Chuva Futura

Tabela 17 Período do Ano x Chuva Futura para 3 Dias (Regra 13)

		Chuva Futura para 3 Dias				
		P = 0 mm	0 < P ≤ 5 mm	5 < P ≤ 15 mm	15 < P ≤ 30 mm	P > 30 mm
Período do Ano	Janeiro - Março	100	100	100	100	100
	Abril - Junho	100	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
	Julho - Setembro	100	100	100	100	100
	Outubro - Dezembro	100	100	100	100	100

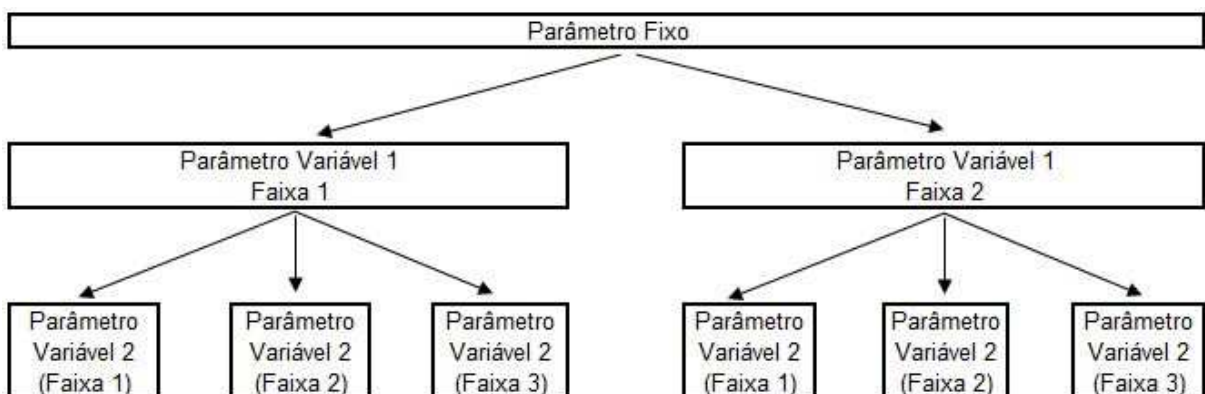


A análise da regra da Tabela 17 permite observar que a redução do consumo de água da chuva permanece sendo vantajosa economicamente apenas para o período de baixas precipitações médias, compreendido entre abril e junho. Ao mesmo tempo, tal redução é viável somente quando há previsão de chuva para os próximos três dias, independentemente do volume, o que mostra que a ausência de chuvas em períodos futuros acarreta na falta de capacidade de recarga do reservatório, inviabilizando o armazenamento de água de um mês para outro sem que prejuízos econômicos ocorram no próprio mês.

### 6.5.3 Regras com 3 parâmetros

A consideração de três parâmetros para a criação das regras de uso de água da chuva tornou necessária a realização de algumas alterações em relação à divisão e número de faixas utilizadas. Devido à capacidade computacional limitada para a simulação de todas as combinações, reduziu-se a dois o número de faixas do primeiro parâmetro variável e a três o número de faixas do segundo parâmetro variável. O parâmetro fixo, por sua vez, permaneceu com as definições utilizadas anteriormente. A Figura 23 ajuda a explicar como foram realizadas as 6<sup>6</sup> simulações, totalizando 46.556 combinações diferentes para cada conjunto de parâmetros, oriundas dos seis percentuais de uso (0, 20, 40, 60, 80 e 100) e das seis faixas consideradas.

Figura 23 Esquema de combinação para regras de 3 parâmetros



As divisões utilizadas para cada parâmetro, nas condições de variável 1 e 2, são apresentadas na Tabela 18. Seguiram-se os critérios utilizados para as divisões anteriores, porém, adaptando-os para o novo número de faixas.

Tabela 18 Divisão de faixas para regras com três parâmetros

Parâmetro considerado	Parâmetro Variável 1		Parâmetro Variável 2		
	$\leq 0,5V$	$= 0,5V$	$\leq 1/3 V$	$1/3 < V \leq 2/3 V$	$> 2/3 V$
<b>Nível do Reservatório</b>	$\leq 0,5V$	$= 0,5V$	$\leq 1/3 V$	$1/3 < V \leq 2/3 V$	$> 2/3 V$
<b>Período do Ano</b>	entre abril e setembro	demais meses	entre janeiro e abril	entre maio e agosto	entre setembro e dezembro
<b>Período do Mês</b>	anterior ao 15º dia	após 15º dia	anterior ao 10º dia	entre 10º e 20º dia	após 20º dia
<b>Chuva Futura</b>	0	$> 0$	0	$< 15$	$> 15$
<b>Precipitação Média</b>	entre abril e setembro	demais meses	entre junho e setembro	demais meses	entre janeiro e março mais dezembro
<b>Consumo Acumulado - Consumo Médio (Água da Chuva)</b>	$\leq 0$	$> 0$	$> 20\%$	$\leq 20$ e $\geq 0$	$< 0$ e $\geq -20\%$

Os melhores resultados obtidos para as combinações entre três parâmetros são apresentados na Tabela 19. Nesta tabela, estão destacadas todas as combinações que proporcionaram economia em relação ao uso desregrado, dado pela coluna referente ao Custo Anual com Tarifa.

Tabela 19 Melhores combinações para três parâmetros

Regra	Parâmetro Fixo	Parâmetro Variável 1	Parâmetro Variável 2	Custo Anual Sem Tarifa* (R\$)	Custo Anual Com Tarifa* (R\$)	Consumo Anual* (m³)	Percentual de uso sobre a demanda					
							Parâmetro Variável 2					
							Parâmetro Variável 1 (Faixa 1)			Parâmetro Variável 1 (Faixa 2)		
							Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
<b>29</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Período Mês</b>	<b>525,75</b>	<b>711,97</b>	<b>151,93</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
30	Período Ano	Nível Reserv.	Chuva Futura	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100	100
<b>31</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>525,87</b>	<b>708,18</b>	<b>151,96</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
<b>32</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Período Ano</b>	<b>525,16</b>	<b>708,56</b>	<b>151,76</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
33	Consumo Ac.	Nível Reserv.	Período Mês	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100	100
<b>34</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>527,46</b>	<b>710,78</b>	<b>152,07</b>	<b>0</b>	<b>40</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>35</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Prec. Media</b>	<b>527,03</b>	<b>710,48</b>	<b>152,29</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
<b>36</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Período Ano</b>	<b>525,16</b>	<b>708,56</b>	<b>151,76</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
37	Nível Reserv.	Consumo Ac.	Período Mês	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100	100
<b>38</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>527,53</b>	<b>711,86</b>	<b>152,30</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>20</b>	<b>100</b>
<b>39</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Prec. Media</b>	<b>527,03</b>	<b>710,48</b>	<b>152,29</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>
40	Nível Reserv.	Período Ano	Período Mês	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100	100
<b>41</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>525,85</b>	<b>710,47</b>	<b>151,95</b>	<b>100</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>42</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>525,60</b>	<b>708,96</b>	<b>151,88</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
43	Período Mês	Período Ano	Nível Reserv.	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100	100
<b>44</b>	<b>Período Mês</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>525,86</b>	<b>711,54</b>	<b>151,96</b>	<b>100</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>45</b>	<b>Período Mês</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>525,87</b>	<b>708,18</b>	<b>151,96</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

<b>46</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>526,89</b>	<b>712,78</b>	<b>152,25</b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
47	Chuva Futura	Período Ano	Período Mês	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100	100
<b>48</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>525,37</b>	<b>711,03</b>	<b>151,82</b>	<b>100</b>	<b>20</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>49</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Prec. Média</b>	<b>Nível Reserv.</b>	<b>525,66</b>	<b>707,98</b>	<b>151,90</b>	<b>0</b>	<b>60</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>50</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Prec. Média</b>	<b>Período Mês</b>	<b>525,87</b>	<b>708,18</b>	<b>151,96</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>51</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>Prec. Média</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>525,39</b>	<b>707,03</b>	<b>151,82</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
52	Período Ano	Chuva Futura	Nível Reserv.	525,11	713,04	151,74	100	100	100	100	100	100
<b>53</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>Período Mês</b>	<b>526,09</b>	<b>712,63</b>	<b>152,02</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>54</b>	<b>Período Ano</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>525,39</b>	<b>707,03</b>	<b>151,82</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

\*média entre as 20 séries sintéticas

Percebe-se que a economia proporcionada, ainda que superior em relação às regras com dois parâmetros, ainda é muito pequena quando comparada ao custo oriundo do uso desregrado de água da chuva (R\$ 713,04), devido ao fato desse valor originar-se de uma média entre os resultados das 20 séries sintéticas consideradas, como mencionado anteriormente. Logo, a potencial economia, proporcionada por tais regras em um período de escassez, foi verificada, novamente, em simulações para o ano crítico de 2014, cujos resultados são apresentados na Tabela 20. Além das melhores regras apresentadas na Tabela 19, as simulações foram realizadas também para os demais conjuntos de percentuais que proporcionaram resultados mais econômicos quando comparados ao uso desregrado.

Tabela 20 Melhores regras com três parâmetros para o ano crítico de 2014

Regra	P. Fixo	P. Variável 1	P. Variável 2	Custo Anual Sem Tarifa (R\$)	Custo Anual Com Tarifa (R\$)	Consumo Anual (m³)	Bônus 30%	Bônus 20%	Bônus 10%	Sem Bônus	Multa 40%	Multa 100%	Percentual de uso sobre a demanda						Economia Anual (%)
													Parâmetro Variável 2						
													P. Variável 1 (Faixa 1)			P. Variável 1 (Faixa 2)			
													Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	
<b>USO DESREGRADO</b>				563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100						
29	Período Ano	Nível Reserv.	Período Mês	563,20	833,88	160,91	0	0	2	1	6	3	100	100	60	100	100	100	3,75
31	Período Ano	Nível Reserv.	Consumo Ac.	563,20	849,44	160,91	0	0	2	0	7	3	100	100	0	100	0	100	1,95
32	Consumo Ac.	Nível Reserv.	Período Ano	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
34	Consumo Ac.	Nível Reserv.	Chuva Futura	563,77	849,00	161,08	0	0	2	2	4	4	0	100	100	80	100	100	2,00
35	Consumo Ac.	Nível Reserv.	Prec. Media	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
36	Nível Reserv.	Consumo Ac.	Período Ano	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
38	Nível Reserv.	Consumo Ac.	Chuva Futura	563,56	849,26	161,02	0	0	2	2	4	4	100	100	100	60	100	100	1,97
39	Nível Reserv.	Consumo Ac.	Prec. Media	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
41	Nível Reserv.	Período Ano	Chuva Futura	563,58	836,25	161,02	0	0	2	1	6	3	100	60	100	100	100	100	3,48
42	Nível Reserv.	Período Ano	Consumo Ac.	563,20	847,51	160,91	0	0	2	2	4	4	100	80	80	60	100	100	2,18
44	Período Mês	Período Ano	Chuva Futura	563,20	835,41	160,91	0	0	2	1	6	3	100	80	100	100	100	100	3,57
45	Período Mês	Período Ano	Consumo Ac.	563,20	849,12	160,91	0	0	2	2	4	4	100	60	100	20	100	100	1,99
46	Chuva Futura	Período Ano	Nível Reserv.	563,20	835,68	160,91	0	0	2	1	6	3	80	60	100	100	100	100	3,54

48	Chuva Futura	Período Ano	Consumo Ac.	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
49	Consumo Ac.	Prec. Media	Nível Reserv.	563,38	848,53	160,97	0	0	2	2	4	4	0	60	20	60	80	100	2,06
50	Consumo Ac.	Prec. Media	Período Mês	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
51	Consumo Ac.	Prec. Media	Chuva Futura	563,77	849,00	161,08	0	0	2	2	4	4	0	60	40	80	100	100	2,00
53	<b>Período Ano</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>Período Mês</b>	<b>563,50</b>	<b>834,23</b>	<b>161,00</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>3,71</b>
54	<b>Período Ano</b>	<b>Chuva Futura</b>	<b>Consumo Ac.</b>	<b>563,20</b>	<b>818,60</b>	<b>160,91</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>5,51</b>

A seguir, são apresentadas e analisadas as tabelas de regras de uso de água da chuva para os melhores resultados envolvendo três parâmetros, destacados na Tabela 20.

Tabela 21 Período do Ano x Nível do Reservatório x Período do Mês (Regra 29)

		Período do Mês					
		Nível do reservatório igual ou inferior a 50%			Nível do reservatório superior a 50%		
		até o 10º dia	entre o 10º e 20º dia	após o 20º dia	até o 10º dia	entre o 10º e 20º dia	após o 20º dia
Período do Ano	Janeiro – Março	100	100	100	100	100	100
	Abril – Junho	100	100	<b>60</b>	100	100	100
	Julho – Setembro	100	100	<b>60</b>	100	100	100
	Outubro - Dezembro	100	100	100	100	100	100

Analisando-se a regra da Tabela 21, percebe-se que, assim como nas regras anteriores, meses menos chuvosos são suscetíveis a reduções de consumo de água da chuva na busca por benefícios econômicos. Tais reduções, no entanto, são necessárias apenas no período final de cada mês, quando já se atingiu a meta de consumo e o volume poupado pode auxiliar no alcance de metas para o mês seguinte. A consideração do parâmetro nível do reservatório, ainda, sinaliza que a redução no consumo de água da chuva deve ocorrer apenas quando o reservatório apresentar níveis reduzidos, indicando que, para grandes volumes, mesmo ao utilizar-se 100% da demanda por água da chuva, é possível obter benefícios econômicos, tanto no mês considerado, como no mês seguinte.



Tabela 22 Nível do Reservatório x Período do Ano x Chuva Futura (Regra 41)

		Chuva Futura para 3 Dias					
		Período do Ano (entre abril e setembro)			Período do Ano (demais meses)		
		0 mm	entre 0 e 15 mm	superior a 15 mm	0 mm	entre 0 e 15 mm	superior a 15 mm
Nível do Reservatório	inferior a 1/5V	100	<b>60</b>	100	100	100	100
	entre 1/5V e 2/5V	100	<b>60</b>	100	100	100	100
	entre 2/5V e 3/5V	100	<b>60</b>	100	100	100	100
	entre 3/5V e 4/5V	100	100	100	100	100	100
	superior a 4/5V	100	100	100	100	100	100

A análise da regra da Tabela 22 permite reforçar a ideia de que, para meses historicamente mais chuvosos, a maior vantagem econômica é obtida por meio do uso de 100% da demanda diária por água da chuva. Assim como nas regras anteriores, para meses menos chuvosos em São Paulo, entre abril e setembro, e para níveis reduzidos de água no reservatório, a redução do consumo de água da chuva pode trazer benefícios econômicos. No entanto, ao considerar o parâmetro chuva futura, mais um detalhe deve ser avaliado.

Quando a previsão de chuva para os próximos três dias é nula, a redução do consumo de água não é necessária, visto que a falta de capacidade de recarga do reservatório impossibilita, por exemplo, a transferência de volumes para o mês seguinte sem prejuízos no mês em questão. Ao mesmo tempo, quando a previsão de chuva é para grandes volumes, também se pode utilizar 100% da demanda por água da chuva, tendo em vista a recarga imediata do reservatório. Porém, para previsões inferiores a 15 mm, como no caso analisado, a recarga será limitada, e reduções no consumo diário de água da chuva podem ser uma boa opção, visando o alcance de metas não só no mês em questão, como também no mês seguinte.

Tabela 23 Período do Mês x Período do Ano x Chuva Futura (Regra 44)

		Chuva futura para 3 Dias					
		Período do Ano (entre abril e setembro)			Período do Ano (demais meses)		
		0 mm	inferior ou igual a 15 mm	superior a 15 mm	0 mm	inferior ou igual a 15 mm	superior a 15 mm
Período do Mês	1º ao 6º dia	100	100	100	100	100	100
	7º ao 12º dia	100	100	100	100	100	100
	13º ao 18º dia	<b>80</b>	<b>60</b>	100	100	100	100
	19º ao 24º dia	<b>80</b>	<b>60</b>	100	100	100	100
	25º ao último dia	<b>80</b>	<b>60</b>	100	100	100	100

A regra apresentada na Tabela 23 é semelhante à regra anterior, com indicativos de que a redução deve ocorrer apenas em períodos de meses historicamente pouco chuvosos, sendo a redução desnecessária quando a previsão de chuva para três dias for superior a 15 mm. Neste caso, o consumo da água da chuva é importante para que se crie um volume de espera que possa armazenar os volumes futuros, tendo em vista a previsão de recarga imediata do reservatório. Porém, a inclusão do parâmetro período do mês, em substituição ao parâmetro nível do reservatório, traz uma alteração em relação à primeira faixa do parâmetro chuva futura. Agora, mesmo que a previsão de chuva para os próximos três dias seja nula, é possível reduzir uma pequena parcela do consumo de água da chuva, pois, estando no período final do mês, o volume armazenado até o dia em questão pode ser consumido de modo a garantir o cumprimento das metas no mês atual e auxiliar no alcance das metas do mês seguinte.

Tabela 24 Chuva Futura x Período do Ano x Nível do Reservatório (Regra 46)

		Nível do Reservatório					
		Período do Ano (entre abril e setembro)			Período do Ano (demais meses)		
		inferior ou igual a 1/3V	entre 1/3V e 2/3V	superior a 2/3V	inferior a 1/3V	entre 1/3V e 2/3V	superior a 2/3V
Chuva Futura para 3 Dias	0 mm	100	100	100	100	100	100
	inferior a 5mm	<b>80</b>	<b>60</b>	100	100	100	100
	entre 5 e 15mm	<b>80</b>	<b>60</b>	100	100	100	100
	entre 15 e 30mm	<b>80</b>	<b>60</b>	100	100	100	100
	superior a 30mm	<b>80</b>	<b>60</b>	100	100	100	100

A regra apresentada na Tabela 24 envolve os mesmos parâmetros da regra 41 (chuva futura para três dias, período do ano e nível do reservatório), porém, com alterações na consideração de parâmetros fixos e variáveis. Assemelhando-se aos resultados obtidos anteriormente, reduções no consumo de água da chuva podem ser vantajosas em termos econômicos em meses menos chuvosos e para níveis baixos de água no reservatório. Uma diferença, no entanto, é observada em relação ao parâmetro de chuva futura, para o qual as reduções são benéficas sempre que houver previsão de chuva, independentemente do valor. Tal diferença, por sua vez, se deve ao fato deste parâmetro, definido como fixo, ter sido dividido em 2 faixas: sem chuva (100% da demanda); e com chuva (combinação com demais parâmetros).

Tabela 25 Período do Ano x Chuva Futura x Período do Mês (Regra 53)

		Período do Mês					
		Chuva Futura p/ 3 dias igual a 0 mm			Chuva Futura p/ 3 dias superior a 0 mm		
		até o 10º dia	entre o 10º e 20º dia	após o 20º dia	até o 10º dia	entre o 10º e 20º dia	após o 20º dia
Período do Ano	Janeiro – Março	100	100	100	100	100	100
	Abril – Junho	100	100	<b>80</b>	100	<b>80</b>	100
	Julho - Setembro	100	100	<b>80</b>	100	<b>80</b>	100
	Outubro - Dezembro	100	100	100	100	100	100

Da mesma maneira do caso anterior, a regra apresentada na Tabela 25 envolve os mesmos parâmetros da regra 44. Meses menos chuvosos permanecem sensíveis a reduções no consumo de água da chuva, assim como o período final de cada mês. Contudo, uma pequena alteração é observada, em relação à regra anterior, quando se analisa o parâmetro chuva futura. Sem previsão, a redução só é possível a partir do vigésimo dia do mês, quando, possivelmente, a meta mensal já foi atingida e o volume armazenado pode ser consumido no mês seguinte, acarretando em benefícios econômicos. Com previsão de chuva, no entanto, a redução do consumo de água é antecipada, possivelmente, devido à capacidade de recarga do reservatório, o que torna possível a redução do consumo sem prejuízos no próprio mês. Salienta-se que, após o 20º dia, e com previsão de chuva, embora a melhor combinação tenha apresentado 100% de uso sobre a demanda por água da chuva, resultados com valores muito

próximos indicaram um consumo de 80% nesta faixa, sinalizando que uma redução de consumo no final do mês também é viável para estes casos.

Tabela 26 Período do Ano x Chuva Futura x Consumo Acumulado de Chuva (Regra 54)

		Consumo acumulado de chuva					
		Chuva Futura p/ 3 dias igual a 0 mm			Chuva Futura p/ 3 dias superior a 0 mm		
		superior a 20%	igual ou superior a 0%	entre 0 e -20%	superior a 20%	Igual ou superior a 0%	entre 0 e -20%
Período do Ano	Janeiro – Março	100	100	100	100	100	100
	Abril – Junho	0	0	0	100	100	100
	Julho - Setembro	0	0	0	100	100	100
	Outubro - Dezembro	100	100	100	100	100	100

A última regra obtida para a combinação de três parâmetros, apresentada na Tabela 26, mantêm a tendência de que as reduções no consumo de água da chuva devam ser realizadas apenas em meses historicamente pouco chuvosos. Porém, ao combinar os parâmetros chuva futura e consumo acumulado de água da chuva ao longo do mês, uma nova ideia é apresentada.

Havendo previsão de chuva para os próximos três dias, a capacidade de recarga do reservatório faz com que o consumo de 100% da demanda diária por água da chuva seja a alternativa mais benéfica em termos econômicos. No entanto, para períodos de ausência de chuva, o melhor a fazer é não utilizar a água armazenada no reservatório, consumindo-a em períodos futuros. Isso se explica, possivelmente, pelo fato de que o consumo da água armazenada no reservatório, sem recarga prevista para o mesmo, pode ser insuficiente para a fuga da faixa relacionada ao pagamento de multas no próprio mês, sendo conveniente consumi-la no mês seguinte, de acordo com as condições a serem observadas.

#### **6.5.4 Regras com 4 parâmetros**

As últimas simulações realizadas envolveram a combinação de quatro parâmetros, admitindo-se que o envolvimento de um número superior a este torna complexa a operação do reservatório. Para estas combinações, seguiu-se os mesmos critérios definidos para as regras com três parâmetros, adicionando-se, no entanto, o último fator como parâmetro fixo em todos os conjuntos de regras, o que não eleva o número de combinações possíveis, algo necessário devido a limitação imposta pela capacidade computacional, tendo em vista o método de simulação adotado.

Os melhores resultados obtidos para as combinações entre quatro parâmetros são apresentados na Tabela 27. Nesta tabela, estão destacadas todas as combinações que proporcionaram economia em relação ao uso desregrado, dado pela coluna referente ao Custo Anual com Tarifa.

Tabela 27 Melhores combinações para quatro parâmetros

Regra	Parâmetro Fixo 1	Parâmetro Fixo 2	Parâmetro Variável 1	Parâmetro Variável 2	Custo Anual Sem Tarifa* (R\$)	Custo Anual Com Tarifa* (R\$)	Consumo Anual* (m³)	Percentual de uso sobre a demanda					
								Parâmetro Variável 2					
								Parâmetro Variável 1 (Faixa 1)			Parâmetro Variável 1 (Faixa 2)		
								Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
55	Período Ano	Chuva Futura	Nível Reserv	Período Mês	525,85	712,21	151,96	100	100	60	100	100	80
56	Período Ano	Consumo Ac.	Nível Reserv	Período Mês	525,87	708,18	151,96	100	100	0	100	100	0
57	Período Ano	Período Mês	Nível Reserv	Chuva Futura	525,73	708,89	151,92	100	0	100	100	100	100
58	Período Ano	Consumo Ac.	Nível Reserv	Chuva Futura	525,39	707,02	151,82	0	60	100	0	100	100
59	Nível Reserv	Período Mês	Período Ano	Chuva Futura	525,54	709,96	151,86	100	60	100	100	100	100
60	Nível Reserv	Consumo Ac.	Período Ano	Chuva Futura	525,28	708,13	151,79	0	60	100	100	100	100
61	Período Mês	Consumo Ac.	Período Ano	Chuva Futura	525,39	707,03	151,82	0	100	100	100	100	100
62	Chuva Futura	Período Mês	Período Ano	Nível Reserv	525,85	710,76	151,95	100	60	100	100	100	100
63	Chuva Futura	Consumo Ac.	Período Ano	Nível Reserv	525,21	710,50	151,77	40	20	100	100	100	100
64	Período Ano	Nível Reserv	Chuva Futura	Período Mês	525,94	711,67	151,98	100	100	100	100	100	60
65	Período Ano	Consumo Ac.	Chuva Futura	Período Mês	525,39	707,03	151,82	100	100	0	100	100	100
66	Período Ano	Nível Reserv	Chuva Futura	Consumo Ac.	525,47	708,21	151,84	100	80	60	100	60	100
67	Período Ano	Período Mês	Chuva Futura	Consumo Ac.	525,39	707,03	151,82	100	0	100	100	100	100

\*média entre as 20 séries sintéticas

Percebe-se que apesar da adição de um parâmetro, a economia proporcionada permanece na mesma faixa observada para as regras com três parâmetros, sendo muito pequena quando comparada ao custo oriundo do uso desregrado de água da chuva (R\$ 713,04), devido ao fato desse valor, como já salientado, originar-se de uma média entre os resultados das 20 séries sintéticas consideradas. Sendo assim, a potencial economia proporcionada por tais regras em um período de escassez foi verificada, também, em simulações para o ano crítico de 2014, cujos resultados são apresentados na Tabela 28. Além das melhores regras apresentadas na Tabela 27, as simulações foram realizadas também para os demais conjuntos de percentuais que proporcionaram resultados mais econômicos quando comparado ao uso desregrado.

Tabela 28 Verificação das regras com quatro parâmetros no ano crítico de 2014

Regra	P. Fixo 1	P. Fixo 2	P. Variável 1	P. Variável 2	Custo Anual Sem Tarifa (R\$)	Custo Anual Com Tarifa (R\$)	Cons. Anual (m³)	Bônus 30%	Bônus 20%	Bônus 10%	Sem Bônus	Multa 40%	Multa 100%	Percentual de uso sobre a demanda						Econ. Anual (%)
														Parâmetro Variável 2						
														Parâmetro Variável 1 (Faixa 1)			Parâmetro Variável 1 (Faixa 2)			
														Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	
<b>USO DESREGRADO</b>					563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100						
55	Período Ano	Chuva Futura	Nível Reserv	Período Mês	563,50	835,71	161,00	0	0	2	1	6	3	100	100	80	100	80	80	3,54
56	Período Ano	Consumo Ac.	Nível Reserv	Período Mês	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
57	Período Ano	Período Mês	Nível Reserv	Chuva Futura	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
58	Período Ano	Consumo Ac.	Nível Reserv	Chuva Futura	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
59	Nível Reserv	Período Mês	Período Ano	Chuva Futura	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
60	Nível Reserv	Consumo Ac.	Período Ano	Chuva Futura	563,56	848,81	161,02	0	0	2	2	4	4	0	100	100	60	100	100	2,03
61	Período Mês	Consumo Ac.	Período Ano	Chuva Futura	563,77	849,00	161,08	0	0	2	2	4	4	0	60	40	80	100	100	2,00
62	Chuva Futura	Período Mês	Período Ano	Nível Reserv	563,20	835,41	160,91	0	0	2	1	6	3	100	80	80	100	100	100	3,57
63	Chuva Futura	Consumo Ac.	Período Ano	Nível Reserv	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
64	Período Ano	Nível Reserv	Chuva Futura	Período Mês	563,58	836,40	161,02	0	0	2	1	6	3	100	100	100	100	80	60	3,46
65	Período Ano	Consumo Ac.	Chuva Futura	Período Mês	563,20	866,37	160,91	0	0	2	1	5	4	100	100	100	100	100	100	0,00
66	Período Ano	Nível Reserv	Chuva Futura	Consumo Ac.	563,20	849,44	160,91	0	0	2	0	7	3	100	100	0	100	100	100	1,95
67	Período Ano	Período Mês	Chuva Futura	Consumo Ac.	563,20	849,44	160,91	0	0	2	0	7	3	100	100	40	100	100	100	1,95



A seguir, são apresentadas e analisadas as tabelas de regras de uso de água da chuva para os melhores resultados envolvendo quatro parâmetros, destacados na Tabela 28.

Tabela 29 Período do Ano x Chuva Futura x Nível do Reservatório x Período do Mês (Regra 55)

Válido para período do ano compreendido entre abril e setembro (nos demais, 100%)		Período do Mês					
		Nível do reservatório igual ou inferior a 50%			Nível do reservatório superior a 50%		
		até o 10º dia	entre o 10º e 20º dia	após o 20º dia	até o 10º dia	entre o 10º e 20º dia	após o 20º dia
Chuva Futura para 3 Dias	0 mm	100	100	100	100	100	100
	inferior a 5mm	100	100	<b>80</b>	100	<b>80</b>	<b>80</b>
	entre 5 e 15mm	100	100	<b>80</b>	100	<b>80</b>	<b>80</b>
	entre 15 e 30mm	100	100	<b>80</b>	100	<b>80</b>	<b>80</b>
	superior a 30mm	100	100	<b>80</b>	100	<b>80</b>	<b>80</b>

A regra apresentada na Tabela 29 já considera, a priori, o uso de 100% da demanda diária por água da chuva para os meses mais chuvosos do ano e para períodos nos quais não haja previsão de chuva para os próximos três dias, de acordo com os resultados observados para regras com número inferior de parâmetros. Para os demais casos, os parâmetros variáveis seguem a tendência observada até esta etapa do trabalho, indicando uma redução do consumo no período final de cada mês, que pode ser antecipada caso o reservatório apresente volumes elevados, tornando possível o alcance de metas para o presente e auxiliando no futuro.

Tabela 30 Chuva Futura x Período do Mês x Período do Ano x Nível do Reservatório (Regra 62)

Válido após o 15º dia do mês (nos demais dias, 100%)		Nível do Reservatório					
		Período do Ano (entre abril e setembro)			Período do Ano (demais meses)		
		inferior ou igual a 1/3V	entre 1/3V e 2/3V	superior a 2/3V	inferior a 1/3V	entre 1/3V e 2/3V	superior a 2/3V
Chuva Futura para 3 Dias	0 mm	100	100	100	100	100	100
	inferior a 5mm	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	100	100	100
	entre 5 e 15mm	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	100	100	100
	entre 15 e 30mm	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	100	100	100
	superior a 30mm	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	100	100	100

A regra da Tabela 30 envolve os mesmos quatro parâmetros da regra 55, porém, substituindo o período do ano pelo período do mês para um dos postos de parâmetros fixo, definindo, a priori, o consumo de 100% da demanda por água da chuva na primeira quinzena do mês, menos sensível a alterações, conforme observado até esta etapa do trabalho. Embora haja uma pequena diferenciação de percentuais, oriundas das alterações entre parâmetros fixos e variáveis, a ideia de consumo permanece a mesma, com indicativos de que se deve optar pela redução apenas em meses historicamente menos chuvosos (entre abril e setembro, para São Paulo), observando-se as maiores reduções quando o nível do reservatório estiver mais baixo, tornando possível o armazenamento de volumes suficientes para o alcance de benefícios econômicos futuros.

Tabela 31 Período do Ano x Nível do Reservatório x Chuva Futura x Período do Mês x (Regra 64)

Válido para período do ano compreendido entre abril e setembro (nos demais, 100%)		Período do Mês					
		Chuva Futura p/ 3 dias igual a 0 mm			Chuva Futura p/ 3 dias superior a 0 mm		
		até o 10º dia	entre o 10º e 20º dia	após o 20º dia	até o 10º dia	entre o 10º e 20º dia	após o 20º dia
Nível do Reservatório	inferior a 1/5V	100	100	100	100	<b>80</b>	<b>60</b>
	entre 1/5V e 2/5V	100	100	100	100	<b>80</b>	<b>60</b>
	entre 2/5V e 3/5V	100	100	100	100	<b>80</b>	<b>60</b>
	entre 3/5V e 4/5V	100	100	100	100	100	100
	superior a 4/5V	100	100	100	100	100	100

A última regra analisada, apresentada na Tabela 31, também envolve os mesmos parâmetros das anteriores, com uma inversão de posição dos parâmetros nível do reservatório e chuva futura, quando comparada à regra 55. Assim como nas demais, as faixas propícias para a redução do consumo de água da chuva se referem a reservatórios com níveis reduzidos e períodos finais de cada mês, desde que haja previsão de chuva para os dias seguintes e esteja-se em um mês compreendido entre abril e setembro, período do ano historicamente menos chuvoso.

Embora haja uma pequena variação de percentuais nas últimas três regras, envolvendo os mesmos parâmetros, em todas é possível perceber a mesma tendência de consumo visando ao máximo benefício econômico, o que colabora para a validade de tais regras. Nestes casos,

cabe ao consumidor optar por aquela que julgue mais simples de ser aplicada, tendo em vista que tais regras propiciam economias muito semelhantes na conta mensal de água. Sugere-se, entretanto, a aplicação da regra número 62, tendo em vista a necessidade de observação dos parâmetros apenas na segunda quinzena dos meses compreendidos entre abril e setembro, estando o usuário livre para suprir 100% de sua demanda (não potável) com água da chuva nos demais períodos.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos com este trabalho, assim como as conclusões aqui apresentadas, são exclusivos para a aplicação metodológica utilizada, não devendo ser generalizados. A metodologia empregada, no entanto, pode ser replicada visando ao desenvolvimento de novas regras para situação distintas.

Neste trabalho, foram avaliados os benefícios econômicos individuais proporcionados pelo uso regrado da água da chuva armazenada em reservatórios, enfocando-se períodos de crise hídrica, nos quais a implantação de tarifas de contingência sobre o uso da água das companhias de saneamento é adotada. Neste sentido, constatou-se que os impactos econômicos de tais tarifas estão relacionados, em grande parte, ao consumo de água da residência no período anterior ao contingenciamento (consumo de referência para as multas e bônus da tarifa de contingência), referência para o cálculo das tarifas, e que é influenciado pela prévia adoção ou não de reservatórios pluviais.

Para residências que não dispunham de reservatório e, por consequência, apresentam consumos médios mensais mais elevados, os resultados demonstraram que a simples implementação de um reservatório, após início da aplicação das tarifas de contingência, é capaz de reduzir significativamente o consumo de água potável, trazendo o máximo benefício econômico ao consumidor a partir do uso desregrado da água, o que torna desnecessária a criação de regras de uso da água da chuva para estes casos.

Para um cenário no qual a residência já possui um reservatório pluvial instalado, no entanto, constatou-se que a redução do consumo de referência, devido aos menores consumos de água potável proporcionados pelo reservatório, dificulta o alcance de metas de consumo em períodos de aplicação de tarifas. Nestes cenários, a adoção de regras de uso de água da chuva pode contribuir para a redução de prejuízos econômicos ao consumidor, reduzindo as chances de aquisição de multas na conta de água ao longo de um ano com escassez de chuva.

A criação de regras de uso de água da chuva é viável, contudo, para uma determinada faixa de nível de atendimento a demanda do reservatório, cujo valor obtido para a aplicação metodológica do presente trabalho foi de, aproximadamente, 80% (considerando-se a série completa). Constatou-se que volumes de reservatórios com níveis de atendimento inferiores a este, devido à sua menor capacidade de regularização, são menos afetados por períodos de

escassez de chuvas, justamente por não terem capacidade de armazenar grandes volumes de águas pluviais, e o consumo de 100% sobre a demanda diária por água da chuva, mesmo em épocas de tarifas de contingência, pode não influenciar nos volumes totais consumidos em um mês, não acarretando em maiores prejuízos econômicos ao consumidor. Por outro lado, para níveis de atendimento à demanda superior a 80%, a alta capacidade de regularização, independentemente da maneira de utilização da água, torna desnecessária a redução do consumo da água armazenada, e faz com que os consumos de água potável mensais convirjam para os consumos de referência.

Em relação aos parâmetros utilizados na criação das regras de uso de água da chuva, alguns pontos em comum foram observados nas melhores regras obtidas. O parâmetro Nível do Reservatório indicou que a redução no consumo de água da chuva deve ser feita apenas para baixos níveis de água no reservatório, admitindo-se que grandes volumes possibilitam o uso desregrado da água. Para o parâmetro Período do Ano, observou-se que o uso regrado da água é benéfico economicamente apenas para meses com baixas precipitações médias históricas, período no qual o uso devidamente distribuído da água ao longo dos meses pode auxiliar na redução de multas decorrentes das tarifas de contingência. Em relação ao parâmetro Período do Mês, os melhores resultados obtidos mostraram que reduções no consumo de água da chuva na última quinzena de cada mês podem trazer benefícios econômicos ao consumidor, na medida em que, nesta etapa do mês, a meta mensal já pode ter sido atingida, e o volume poupado auxilia no alcance da meta no mês seguinte.

O parâmetro Chuva Futura não apresentou resultados definidos de forma tão clara, mas ainda assim, algumas observações puderam ser realizadas. Este parâmetro indicou, em grande parte dos resultados, que para cenários de ausência de precipitação, a redução do consumo de água da chuva sobre a demanda diária é insuficiente para proporcionar benefícios econômicos em relação ao uso desregrado, devido à falta de capacidade de recarga do reservatório. Por sua vez, para previsões com grandes volumes, o consumo de 100% sobre a demanda diária de água da chuva também se mostrou como a opção mais vantajosa, justamente pela recarga imediata do reservatório. Dessa forma, apenas a faixa situada entre 0 mm e 15 mm de previsão para o período posterior de três dias mostra-se como a mais adequada para possíveis reduções no presente visando consumos futuros.

Para os dois parâmetros restantes, Consumo Acumulado e Precipitação Média Mensal, a análise individual é dificultada devido à ausência dos mesmos nas melhores regras obtidas. Embora o Consumo Acumulado esteja presente na regra mais econômica, é importante salientar que o resultado encontrado, que indica a ausência de consumo de água da chuva para a faixa correspondente a multas na conta de água, é específico para a combinação com os outros dois parâmetros analisados (chuva futura e período do ano).

Todas as regras criadas apresentaram resultados muito semelhantes em termos de economia na conta de água proporcionada ao longo de um ano, cabendo ao usuário optar por aquela que julgue a mais simples de ser aplicada na prática. Como sugestão, recomenda-se a utilização da regra número 12, que envolve a simples observação dos parâmetros período do ano e período do mês para definição do consumo diário de água da chuva mais adequado.

Quanto aos consumos de água da companhia, os resultados para as melhores regras demonstraram que, apesar do ganho econômico do consumidor (ou redução do prejuízo), o consumo de água potável ao longo do ano permanece praticamente o mesmo. Isto se deve ao fato de que a utilização das regras apenas modifica a forma de utilização da água ao longo do tempo, não impactando nos volumes consumidos. Neste aspecto, salienta-se que a criação das regras de uso não prejudica economicamente as companhias de saneamento, visto que os benefícios econômicos ao consumidor são obtidos apenas por meio de reduções de multas, na medida em que o alcance de bônus é dificultado justamente pela baixa oferta de chuva em períodos de escassez. Além disso, os benefícios proporcionados pela adoção das regras podem servir como incentivo a outros consumidores que ainda não dispõem de reservatórios pluviais em suas residências, auxiliando as companhias com a redução da demanda por água tratada.

Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de reduções anuais na conta de água do consumidor na faixa de 3 a 5%, percentuais não desprezíveis, apesar de não tão elevados em termos de valores absolutos para as características de consumo da aplicação metodológica adotada. Contudo, ressalta-se que tais percentuais estão relacionados às simplificações adotadas neste trabalho, necessárias devido à limitação imposta pela capacidade computacional, tendo em vista o método de simulação adotado.

Sendo assim, recomenda-se, como pesquisa futura, uma exploração mais aprofundada para os parâmetros que se mostraram mais sensíveis à otimização (nível do reservatório, período do ano, período do mês e chuva futura), a partir da consideração de um número maior de faixas e

de percentuais de uso de água sobre a demanda de água da chuva, e da eliminação de parâmetros fixos nas combinações, por exemplo. Sugere-se, também, a adoção de uma função objetivo visando à minimização de extravasamentos, não avaliada neste trabalho.

Por fim, ressalta-se que os percentuais correspondentes às reduções na conta de água do consumidor final, obtidos por meio da criação das regras de uso de água da chuva, quando aplicados a consumos mais elevadas, podem gerar benefícios ainda maiores. Desse modo, sugere-se, também como pesquisa futura, a aplicação da metodologia deste trabalho em cenários que apresentem consumos de água mais elevados, como em estabelecimentos comerciais, empresas ou indústrias, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

ADASA – AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL. **Resolução nº 17 de 07 de outubro de 2016**. Disponível em: <[http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/8Legislacao/Res\\_ADASA/resolucao17\\_2016\\_tarif\\_acontingencia.pdf](http://www.adasa.df.gov.br/images/stories/anexos/8Legislacao/Res_ADASA/resolucao17_2016_tarif_acontingencia.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil**: abastecimento urbano de água – panorama nacional. Brasília: 2010, v. 1.

\_\_\_\_\_. **A água no Brasil e no mundo**. 2012?. Disponível em: <[http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20070129082304\\_AAquaNoBrasilENoMundo.pdf](http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20070129082304_AAquaNoBrasilENoMundo.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2017.

\_\_\_\_\_. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**: Relatório Pleno. Brasília: 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15527**: Água de chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. do V. **Introdução à engenharia**: conceitos, ferramentas e comportamento. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

BICUDO, C. E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. **Águas do Brasil**: Análises Estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010.

BOVO, R. V. **Otimização do uso de água de chuva armazenada em face de tarifas de contigência**. 2016. 76 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BRASIL. Presidência da República. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei n. 11.445**, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, DF, 2007.

BRAVO, J. M. **Otimização da operação de um reservatório para controle de cheias com base na previsão de vazão**. 2006. 155 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

\_\_\_\_\_. **Subsídios à operação de reservatórios baseada na previsão de variáveis hidrológicas**. 2010. 226 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

CAGECE. *Web site* da Companhia de Água e Esgoto do Ceará. 2016. Disponível em: <<https://www.cagece.com.br>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

CAESB. *Web site* da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

CARDOSO, M. P. **Viabilidade do aproveitamento de água de chuva em zonas urbanas**: estudo de caso no município de Belo Horizonte – MG. 2009. 192 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.



CHE-ANI, A. I.; SHAARI, N.; SAIRI, A. ZAIN, M. F. M.; TAHIR, M. M. Rainwater harvesting as an alternative water supply in the future. **European Journal of Scientific Research**, v. 34, n. 1, p. 132-140, 2009.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Calibração automática global do modelo IPH2**. In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, n. 14, 2001, Aracaju.

\_\_\_\_\_. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27-39, 2003.

CRUZ, M. A. S. **Otimização do controle da drenagem em macro-bacias urbanas**. 2004. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DETZEL, D. H. M. **Geração de séries sintéticas de precipitação**. 2009. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná

DORNELLES, F. **Aproveitamento de água de chuva no meio urbano e seu efeito na drenagem pluvial**. 2012. 234 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DUAN, Q. Y.; GUPTA, V. K.; SOROOSHIAN, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. **Journal of optimization theory and applications**, v. 76, n. 3, p. 501-521, 1993.

\_\_\_\_\_. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. **Journal of hydrology**, n. 58, p. 265-284, 1994.

FORMIGA, K. T. M. **Otimização multiobjetivo de projetos de redes de distribuição de água**. 2005. 305 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

GALVÃO, C. O.; VALENÇA, M. J. S. (org). 1999. **Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Porto Alegre. Ed. Universidade / ABRH / UFRGS.

HESPAHOL, I. Águas cinzas. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 162, dez. 2010. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/162/artigo287780-1.aspx>>. Acesso em: 13 jan. 2017.

HEIJNEN, H. **A captação de água da chuva: aspectos de qualidade da água, saúde e higiene**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, n. 8., 2012, Campina Grande.

HELMREICH, B.; HORN, H. **Opportunities in rainwater harvesting**. *Desalination*, v. 248, n. 1-3, p. 118-124, 2009.

HERMANN, R. M. Geração de séries sintéticas de precipitações. **Revista DAE**, v. 35, n. 103, p. 57-79, 1975.

KELMAN, J. Modelos estocásticos no gerenciamento de recursos hídricos. \_\_\_\_\_. **Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos I**. São Paulo: Nobel/ABRH, p. 325-424, 1987.

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. 93-111, 2004.

LIAW, C. H.; TSAI, Y. L. Optimum storage volume of roof top rain water harvesting systems for domestic use. **Journal of the American Water Resources Association**. 2004.

LUND, J. R.; FERREIRA, I. **Operating rule optimization for Missouri River reservoir system**. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 122, p. 287-295, 1996.

LOUCKS, D. P.; BEEK, E. V.; STEDINGER, J. R.; DIJKMAN, J. P. M.; VILLARS, M. T. **Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications**. Paris: Unesco, 2005.

MANO, R. S. **A captação residencial de água da chuva para fins não potáveis em Porto Alegre: aspectos básicos da viabilidade e benefícios do sistema**. 2004. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MÉLLO JR, A. V.; MATOS, L. N. Otimização da operação de reservatório pela programação dinâmica em um processo de decisão markoviano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 3, p. 5-15, 1999.

MIELKI, A. C. IPTU verde. **Infraestrutura urbana: projetos, custos e construção**, n. 16, dez. 2011. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/artigo260567-1.aspx>>. Acesso em: 13 jan. 2017.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The computer journal**, v. 7, n. 4, p. 308-313, 1965.

OLIVEIRA, V. P. S. **Modelo para geração de séries sintéticas de precipitação**. 2003. 156 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Água para um mundo sustentável: sumário executivo**. 2015. Disponível em:

<[http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015ExecutiveSummary\\_POR\\_web.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015ExecutiveSummary_POR_web.pdf)>. Acesso em: 24 jan. 2017.

PARKINSON, A. R.; BALLING, R. J.; HEDENGREN, J. D. **Optimization methods for engineering design: applications and theory**. Brigham Young University, 2013.

PERIUS, C. F. Variáveis de projeto e sua influência no desempenho e dimensionamento de reservatórios de aproveitamento de água da chuva. 2016. 133 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

SABESP. *Web site* da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. 2016. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/>>. Acesso em: 09 jan. 2017.

SAUTCHUK, C. A. Aparelhos economizadores. **Revista Técnica**, São Paulo, n. 162, dez. 2010. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/162/artigo287780-1.aspx>>. Acesso em: 13 jan. 2017.

SENADO FEDERAL. **Projeto de lei n. 324**, de 2015. Institui obrigatoriedade para as novas construções, residenciais, comerciais, e industriais, público ou privado, a inclusão no projeto técnico da obra, item referente a captação de água da chuva e seu reuso não potável e dá outras providências.

Brasília, DF, 2015. Disponível em: <<http://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/121525>>. Acesso em: 21 jan. 2017.

SIQUEIRA, T. G.; SOARES FILHO, S. **Comparação entre programação dinâmica estocástica primal e dual no planejamento da operação energética**. Campinas, 2003.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva de telhados em áreas urbanas para fins não potáveis**: diretrizes básicas para um projeto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, n. 6., 2007, Belo Horizonte.

TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. La política hídrica en Brasil. In: CISNEROS, B. J.; TUNDISI, J. G (coord.). **Diagnóstico del agua en las Américas**. México: 2012, p. 169-194.

U. S. GEOLOGICAL SURVEY. **Distribution of Earth's water**. 2016. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

WHITE, K. H.; SOWARD, L. R.; SHANKLE, G. **Harvesting, storing, and treating rainwater for domestic indoor use**. Austin, TX: Texas Commission on Environmental Quality, 2007.

WURBS, Ralph A. Reservoir-system simulation and optimization models. **Journal of water resources planning and management**, v. 119, n. 4, p. 455-472, 1993.