

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA  
DOUTORADO EM ECONOMIA**

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA APOIO A  
DECISÃO NA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SISTEMAS  
INTEGRADOS DE ABASTECIMENTO**

**LIDIA MARIA ALVES RODELLA**

**RECIFE - PE  
2014**

**LIDIA MARIA ALVES RODELLA**

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA APOIO A DECISÃO NA  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SISTEMAS INTEGRADOS DE  
ABASTECIMENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Pernambuco (PIMES-UFPE), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Economia.

**Orientador: Prof.<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup>. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes**

**RECIFE - PE  
2014**

Catálogo na Fonte  
Bibliotecária Ângela de Fátima Correia Simões, CRB4-773

- R687o Rodella, Lidia Maria Alves  
Modelo de programação linear para apoio a decisão na distribuição de água de sistemas integrados de abastecimento / Lidia Maria Alves Rodella. - Recife : O Autor, 2014.  
93 folhas : il. 30 cm.
- Orientador: Prof<sup>ª</sup> Dra. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes.  
Tese (Doutorado em Economia) ó Universidade Federal de Pernambuco, CCSA, 2014.  
Inclui referências e anexos.
1. Otimização. 2. Abastecimento de água. 3. Valoração. 4. Água ó qualidade. I. Moraes, Márcia Maria Guedes Alcoforado de (Orientador). II. Título.
- 33 CDD (22.ed.) UFPE (CSA 2014 ó 086)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA  
PIMES/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE DO  
DOUTORADO EM ECONOMIA DE:

**LIDIA MARIA ALVES RODELLA**

A Comissão Examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera a candidata Lidia Maria Alves Rodella **APROVADA**.

Recife, 14/03/2014.

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes**  
**Orientadora**

---

**Prof. Dr. Francisco de Sousa Ramos**  
**Examinador Interno**

---

**Prof. Dr. José Lamartine Távora Júnior**  
**Examinador Interno**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria do Carmo Martins Sobral**  
**Examinador Externo/UFPE/Dept<sup>o</sup>. de Eng. Civil**

---

**Prof. Dr. José Almir Cirilo**  
**Examinador Externo/UFPE/Dept<sup>o</sup>. de Eng. Civil**

*À minha mãe.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela sua infinita misericórdia, por estar sempre comigo e pelas bênçãos que recebi ao longo dessa jornada.

À minha mãe por estar sempre comigo, apesar da distância, pela sua fé inabalável, pelas orações e pela força e o colo de sempre e por me ensinar que a educação é o melhor caminho a seguir.

Ao meu pai pelos ensinamentos sobre a vida e aos meus irmãos Mateus e Gláucia, pela amizade e carinho.

Ao Carlos, amigo, companheiro, sempre paciente, por estar sempre ao meu lado, por não me deixar desistir e me mostrar sempre o lado positivo de tudo.

À professora Márcia M<sup>a</sup>. G. Alcoforado de Moraes, pelo exemplo de professora, pela orientação, dedicação e pela confiança.

Ao professor John Braden, que me recebeu na *University of Illinois at Urbana-Champaign*, pelas orientações, conselhos e, principalmente, por ter me ensinado a ver a vida acadêmica com outros olhos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Economia (PIMES) da UFPE e do *Department of Agricultural and Consumer Economics* da *University of Illinois at Urbana-Champaign*, com os quais tive a oportunidade e o prazer de aprender.

À CAPES, pela oportunidade de participar do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) e através dele conhecer a *University of Illinois at Urbana-Champaign*.

À FINEP, pelo apoio à pesquisa através do Projeto FINEP - REHIDRO 1830.

À minha equipe de trabalho da Diretoria de Convênios e Contratos Acadêmicos na PROPLAN/UFPE e ao meu chefe, Prof. Hermano Perrelli, pelo apoio e compreensão.

À equipe da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), Dr. Daniel Genuíno Bezerra, Sérgio Torres, Maria Lúcia Martins de Lima, Luis Henrique Pereira da Silva, Aprígio Cunha e Écio Gominho, pela atenção, ajuda, disponibilização dos dados e paciência.

## RESUMO

O presente estudo propõe uma plataforma capaz de determinar a quantidade ótima de água distribuída a cada município pelos sistemas integrados de abastecimento de água de forma a garantir a minimização dos custos de energia elétrica e de tratamento, esse último considerado no modelo como despesas com produtos químicos. A partir do modelo é possível calcular os custos reduzidos e os custos de oportunidade dos sistemas integrados, bem como o valor de uso da qualidade da água. O problema de otimização apresentado utiliza a técnica de programação linear e tem como restrições a capacidade máxima de oferta de água de cada sistema integrado, a rede adutora instalada e o volume mínimo de água a ser distribuído para cada município. Dados da Região Metropolitana do Recife permitiram a validação e calibração do modelo. Os resultados do modelo mostraram que a otimização leva a uma redução de 4,82% dos custos, em especial a partir de um aumento de 20,73% no volume produzido pelo sistema Pirapama, o mais novo e maior sistema de abastecimento do estado de Pernambuco, a paralisação em alguns meses do ano dos menores sistemas integrados da região, que também têm o m<sup>3</sup> de água tratada mais caro da região. Ao mesmo tempo impõe uma redução de 15,38% nas atividades do sistema Tapacurá, que sofre com problemas de eutrofização na barragem de mesmo nome, seu principal manancial. Através do custo reduzido é possível saber em quanto os custos dos sistemas que não operam na solução ótima precisam ser reduzidos para que os mesmos passem a ser considerados como opção no uso para captação, tratamento e distribuição de água. Desta forma, pode-se assim identificar o custo de oportunidade de cada um desses sistemas. Um dos cenários estudados considerou o custo de oportunidade do sistema Tapacurá e os resultados mostraram uma redução anual no valor da função-objetivo de 6,98% (R\$ 3.138.175,76) em relação à solução ótima no cenário 1 (condições atuais) e de 11,47% (R\$ 5.414.987,10) se comparado com o realizado pela COMPESA em 2013. Esses resultados mostram a economia que a empresa de abastecimento teria durante um ano caso investisse no sistema Tapacurá na busca pela redução de seus custos de energia e de tratamento, através da instalação de bombas mais eficientes ou políticas de melhoria da qualidade da água da bacia Tapacurá, por exemplo. A partir da análise de cenários que consideram diferentes condições de qualidade da água dos principais reservatórios de captação de água para os sistemas integrados da região, Pirapama e Tapacurá, o estudo calcula o valor de uso direto da qualidade da água para a empresa responsável pelo abastecimento urbano na região, apresentando uma proposta de valoração da qualidade da água baseada no método dos custos evitados.

*Palavras-chave:* Otimização. Abastecimento de água. Valoração. Qualidade da água.

## ABSTRACT

This study proposes a platform able to determine the optimum amount of water distributed to each municipality by integrated systems of water supply to ensure the minimization of energy costs and treatment, the latter considered in the model as chemicals expenses. From the model it is possible to calculate the reduced costs and the opportunity costs of integrated systems, as well as the use value of water quality. The optimization problem presented uses the linear programming techniques with constraints on the maximum supply capacity of each integrated water system, the installed pipeline network and the minimum volume of water to be distributed to each city. Data from the Metropolitan Region of Recife led to the validation and calibration of the model. The results showed that the optimization leads to a reduction of 4.82% of the costs, particularly from an increase of 20.73% in volume produced by Pirapama system, the newest and largest supply system of the state of Pernambuco, the standstill in some months of the smallest integrated systems in the region, which also have the m<sup>3</sup> of treated water more expensive in the region. At the same time requires a reduction of 15.38% in the activities of Tapacurá system, which suffers from eutrophication problems in the dam of the same name, its main source. By the reduced cost is possible to know how much the cost of the systems that do not operate at the optimal solution must be reduced so that they start to be considered as an option for use in catchment. Indeed, it may identify the opportunity cost of each of these systems, which is an important concept of economic theory. One of the scenarios studied considered the opportunity cost of Tapacurá system and the results showed a reduction in the value of the objective function of 6.98% (R\$ 3,138,175.76) in relation to the optimal solution in scenario 1 (current conditions) and 11.47% (R\$ 5,414,987.10) compared with that achieved by COMPESA in 2013. These results show the economy that the supply company would have for a year if invested in Tapacurá system to achieve lower energy and treatment costs, by installing more efficient pumps or policies to improve the water quality of the Tapacurá basin, for example. From the analysis of scenarios that consider different conditions of water quality of the main reservoirs of water catchment for integrated systems in the region, Pirapama and Tapacurá, the study estimates the direct use value of water quality for the company responsible for supplying water in the region, presenting a proposal for value the quality of water based on the avoided cost method.

*Key-words:* Optimization. Water supply. Valuation. Water quality.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Estado de Pernambuco ó Mesorregiões .....	19
Figura 2 - Principais sistemas integrados da região metropolitana do Recife .....	24
Figura 3 - Sistema Pirapama no Google Earth.....	26
Figura 4 - Sistema Tapacurá no Google Earth.....	28
Figura 5 - Volume mensal de água distribuída por sistemas integrados para os municípios da RMR (D <sup>202</sup> ) .....	41
Figura 6 - Custo de energia elétrica anual por sistema.....	49
Figura 7 - Custo de tratamento anual por sistema .....	50
Figura 8 - Variação percentual no volume (m <sup>3</sup> ) produzido no ano por sistema em comparação com o realizado .....	52
Figura 9 - Participação dos sistemas integrados na produção anual.....	53
Figura 10 - Participação dos sistemas integrados na distribuição anual para o município de Recife.....	59
Figura 11 - Participação dos sistemas integrados na distribuição anual para o município de Jaboatão dos Guararapes.....	60
Figura 12 - Participação dos sistemas integrados na distribuição anual para o município de Cabo de Santo Agostinho.....	60
Figura 13 - Custos de tratamento no ano por sistema ó comparação entre os resultados do realizado, cenário 1 e cenário 2. ....	66
Figura 14 - Variação percentual no volume (m <sup>3</sup> ) produzido no período por sistema considerando melhoria na qualidade da água de Tapacurá .....	67
Figura 15 - Participação dos sistemas integrados na produção anual no cenário de melhoria da qualidade da água de Tapacurá.....	68

Figura 16 - Participação dos sistemas integrados na produção anual no cenário de piora da qualidade da água de Pirapama.....	76
Figura 17 - Comparação do volume produzido mensalmente pelo sistema Pirapama.....	76
Figura 18 - Comparação do volume produzido mensalmente pelo sistema Tapacurá.....	80
Figura 19 - Participação dos sistemas integrados na produção anual no cenário que considera o custo de oportunidade do sistema Tapacurá. ....	81

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - População por município da região metropolitana do Recife .....	20
Tabela 2 - Sistemas produtores da Região Metropolitana do Recife .....	22
Tabela 3 - Possibilidade de distribuição dos sistemas integrados produtores da RMR .....	31
Tabela 4 - Preço da energia elétrica por sistema integrado (R\$/m <sup>3</sup> ) .....	34
Tabela 5 - Preço de tratamento (R\$/m <sup>3</sup> ) .....	37
Tabela 6 - Capacidade máxima de produção mensal (S <sub>i</sub> ) .....	39
Tabela 7 - Volume mínimo distribuído mensalmente por sistemas integrados .....	40
Tabela 8 - Volume máximo mensal distribuído pelos sistemas integrados para cada município em virtude da rede adutora instalada (v <sub>ij</sub> ) .....	42
Tabela 9 - Custo no ano por sistema integrado .....	51
Tabela 10 - Alocação ótima de água (m <sup>3</sup> ) ó Janeiro a Junho .....	54
Tabela 11 - Alocação ótima de água (m <sup>3</sup> ) ó Julho a Dezembro .....	55
Tabela 12 - Custo Reduzido e Custo de Oportunidade (R\$) .....	57
Tabela 13 - Preço-sombra médio de aumento no volume distribuído (R\$/m <sup>3</sup> ) .....	61
Tabela 14 - Valor absoluto do preço-sombra do aumento na capacidade de produção do sistema Pirapama (R\$/m <sup>3</sup> ) .....	62
Tabela 15 - Custos unitários mensais de tratamento dos sistemas Tapacurá e Pirapama (R\$/m <sup>3</sup> ) .....	64
Tabela 16 - Custo médio dos sistemas Caixa D'Água, Marcos Freire e Tapacurá no cenário de melhoria da qualidade da água de Tapacurá .....	68
Tabela 17 - Custo no ano por sistema integrado nos cenários atual (1) e de simulação de redução nos custos de tratamento de Tapacurá (2) .....	69
Tabela 18 - Comparação custo reduzido (R\$) .....	71
Tabela 19 - Variação no volume de água (m <sup>3</sup> ) alocado por sistema para cada município na solução ótima do cenário 3 em relação ao ótimo do cenário 1 .....	77

Tabela 20 - Custo de oportunidade do sistema Tapacurá nos meses de Junho a Dezembro (R\$/m <sup>3</sup> ). .....	78
--	----

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo geral.....	3
1.2 Abordagem do problema.....	3
1.3 Estrutura.....	4
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1 Otimização.....	5
2.1.2 Otimização na questão da água.....	6
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	19
3.1 Composição dos sistemas Pirapama e Tapacurá.....	24
3.1.1 Sistema Pirapama.....	25
3.1.2 Sistema Tapacurá.....	27
4. METODOLOGIA.....	30
4.1 Modelo de otimização.....	30
4.1.1 Parâmetros do caso da região metropolitana do Recife.....	33
4.1.2 Análise de sensibilidade ó custo reduzido, custo de oportunidade e preço-sombra.....	42
4.1.3 Estimando o valor da qualidade da água.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5.1 Cenário 1 - atual.....	48
5.2 Cenário 2 - simulação da melhoria da qualidade da água bruta do sistema Tapacurá.....	63
5.3 Cenário 3 - simulação da piora da qualidade da água bruta do sistema Pirapama.....	73

5.4 Cenário 4 ó considerando o custo de oportunidade do sistema Tapacurá .....	78
6. CONCLUSÕES .....	83
7. REFERÊNCIAS .....	86
ANEXOS .....	90

## 1. INTRODUÇÃO

Na última década, a crescente preocupação por parte dos governos e sociedade com a disponibilidade e qualidade da água decorre do fato de que, por mais abundante que pareça ser este recurso, não é raro ocorrer sua escassez, tanto pela ocorrência de períodos prolongados de seca como pela pouca disponibilidade hídrica existente (ROSAL *et al.*, 2013).

O desenvolvimento econômico e o rápido crescimento das cidades geralmente resultam no incremento da demanda de água e aumento da poluição dos recursos hídricos disponíveis. Diante da crescente disputa entre as demandas hídricas, sobressai-se a percepção de que a água é um bem econômico, de elevado valor estratégico, e que deve ser gerenciada de forma racional (Andrade, Curi e Curi, 2002). Para garantir o atendimento dessa demanda temos os sistemas de abastecimento de água, que são caracterizados por uma ampla variedade e complexidade, fornecendo grande oportunidade para atuação na economia e/ou melhoria da eficiência energética (Coelho e Andrade-Campos, 2013). Esses sistemas são compostos por uma rede de componentes (e.g. tubulações, bombas, válvulas, tanques, etc.) que transporta água de uma fonte (e.g. reservatório, estação de tratamento, tanque, etc.) até os consumidores (e.g. usuário doméstico, comercial e industrial) (ZECCHIN *et al.*, 2006).

Segundo Carrijo *et al* (2003), o crescimento desordenado das cidades, aliado à falta de financiamentos para o setor de saneamento básico no Brasil, tornaram os sistemas de abastecimento de água complexos e de difícil operacionalidade. Reconhece-se, no entanto, que a operação eficiente desses sistemas é fundamental para que sua vida útil se prolongue o máximo possível, garantindo o atendimento aos consumidores, além de manter os custos de energia elétrica e manutenção dentro de padrões aceitáveis. Assim, um modelo que, reproduzindo o comportamento do sistema de maneira adequada, possibilite a definição de estratégias operacionais ótimas, mostra-se de grande valia à medida que possibilita que decisões sejam tomadas em substituição ao julgamento pessoal de operadores experientes, pautadas em soluções bem sucedidas no passado. Essa sistemática seria mais racional no sentido de possibilitar soluções mais adequadas face às novas conjunturas.

O aproveitamento de fontes hídricas de potencialidade significativa que permitam atender às crescentes demandas por água implica, regra geral, em soluções técnicas cada vez mais

complexas que geram obras de custos vultosos. Pela limitação da disponibilidade de recursos financeiros, principalmente nos países em desenvolvimento, além da necessidade de um eficiente planejamento de investimentos na construção de novos empreendimentos hídricos, torna-se imprescindível que os benefícios advindos do aproveitamento dos sistemas já existentes sejam maximizados, resultando no uso mais racional da água e melhor atendimento de maiores parcelas da sociedade (Andrade, Curi e Curi, 2002).

Destaca-se que o abastecimento de água em todo o mundo representa uma parcela significativa do consumo de energia global. Esse consumo de energia, relacionado à captação, tratamento e distribuição da água implica um grande montante de custos (Coelho e Andrade-Campos, 2013). De acordo com a *Alliance to Save Energy, 2002 apud* Coelho e Andrade-Campos, 2013, o consumo mundial de energia para distribuição de água é aproximadamente 7% da energia global consumida. Assim, com a atual preocupação sobre desenvolvimento sustentável, os pesquisadores destacam que a melhoria na eficiência energética nos sistemas de abastecimento de água deve ser de grande importância.

Agrega-se a isso a preocupação com a questão ambiental, que têm exercido um significativo papel nas decisões governamentais, empresariais e planejamento corporativo nas últimas décadas, conforme apresenta Thomas e Callan (2010). Segundo eles, o mundo torna-se cada vez mais consciente a respeito do ambiente natural e mais sensibilizado com as consequências de um dano ecológico, como a poluição das águas, por exemplo. A poluição vem afetando os sistemas de abastecimento da região metropolitana do Recife de acordo com Braga et al (2010), que relatam que a barragem Tapacurá, onde é captada boa parte da água tratada pelo sistema de mesmo nome, o segundo maior do estado de Pernambuco, tem sofrido com as frequentes florações de cianobactérias, que pela toxicidade ao morrer acarretam dificuldades ao sistema de tratamento e distribuição da água para consumo, operado pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA).

Diante do problema exposto foram delimitados os objetivos do presente estudo, elencados na sequência, que nortearão o teste da hipótese de que, apesar da complexidade dos sistemas de abastecimento de água, é possível o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio a

decisão que visa minimizar os custos com energia elétrica e tratamento de água desses sistemas e, ainda, auxilia na estimação do valor de uso da qualidade da água.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Construir uma plataforma de otimização que identifique: valores de distribuição de água aos municípios pelos sistemas integrados de abastecimento resultantes de uma minimização de custos de energia elétrica e de tratamento; custos de oportunidade dos sistemas de tratamento que não operam na solução ótima; e custos evitados provenientes de cenários de alteração na qualidade da água nos mananciais dos principais sistemas integrados.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

1. Desenvolver, calibrar e obter solução de um modelo de programação linear representativo da operação dos sistemas integrados que abastecem a RMR.
2. Estabelecer cenários com custos de oportunidade de sistemas integrados que não operam na solução ótima.
3. Estabelecer diferentes cenários de qualidade de água dos mananciais dos principais sistemas e associar custos de tratamento aos mesmos.
4. Determinar valores de uso<sup>1</sup> direto da qualidade da água dos mananciais dos principais sistemas integrados, através da mensuração dos custos evitados.

## **1.2 Abordagem do problema**

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas diversas visitas técnicas à empresa responsável pelo abastecimento de água da região metropolitana do Recife, a Companhia Pernambucana de Saneamento ó COMPESA, que através da Superintendência de Manutenção e Produção, Gerência de Controle Operacional, suas coordenações de Eficiência Energética e de Controle Operacional, além da Gerência de Informações Operacionais e

---

<sup>1</sup> Valor de uso: o valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental pelo fato de que dele se utilizam direta ou indiretamente. Por exemplo, na forma de extração, de visitação, ou outra atividade de produção ou consumo direto ou quando o benefício do seu uso deriva de funções ecossistêmicas, como, por exemplo, a contenção de erosão e reprodução de espécies marinhas pela conservação de florestas de mangue (Motta, 2006).

Coordenação de Tratamento, forneceram os dados necessários para o modelo desenvolvido e apresentado no capítulo 4.

O modelo desenvolvido considera as características dos sistemas de abastecimento da região metropolitana do Recife, tendo como parâmetros da função objetivo o preço por metro cúbico da energia elétrica e de produtos químicos consumidos no processo de captação, tratamento e distribuição de água na região. A infraestrutura física instalada dos sistemas e o volume de água mínimo distribuído em cada município mensalmente foram incorporados através de restrições, sendo os parâmetros do ano 2013, definido<sup>2</sup> pela empresa como um ano típico de pouca disponibilidade hídrica na região de estudo.

### **1.3 Estrutura**

Além desta introdução, o presente trabalho está dividido em mais cinco capítulos.

No capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, com uma revisão da literatura sobre otimização, em especial aplicada à questão da água, e sobre o método de custos evitados, utilizado para a valoração de recursos ambientais.

No capítulo seguinte é apresentada a área do estudo de caso, bem como uma descrição simplificada da complexa rede de abastecimento de água da região metropolitana do Recife.

Em seguida, no capítulo 4, é descrita a metodologia e, na sequência, apresentados e discutidos os resultados obtidos com a plataforma (capítulo 5).

Por fim, no capítulo 6, são destacadas as principais conclusões do estudo e contribuições, bem como suas limitações, além de sugeridos trabalhos futuros.

---

<sup>2</sup> Conforme relatado por Antônio Sérgio Caseira Gonçalves Torres, Engenheiro e Assessor da Diretoria da COMPESA em reunião no dia 23 de dezembro de 2013 na Superintendência de Manutenção e Produção da COMPESA.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Otimização<sup>3</sup>

Otimização é o ato de obter o melhor resultado sob dadas circunstâncias. Matematicamente, isto significa encontrar o valor mínimo ou máximo de uma função de  $n$  variáveis, digamos  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , onde  $n$  pode ser qualquer inteiro maior que zero, e ela pode ser irrestrita ou estar sujeita a certas restrições sobre as variáveis que a compõem.

Essa função, denominada função objetivo, representa medidas reais, que no presente estudo será uma parcela dos custos totais da empresa responsável pelo abastecimento de água da Região Metropolitana de Recife (Companhia Pernambucana de Saneamento ó COMPESA). Esta parcela do custo será relativa às despesas com energia elétrica e com produtos químicos para tratamento da água. Isto porque a primeira representa, na média dos últimos anos, o terceiro maior custo da companhia, atrás apenas do custo de construção e folha de pessoal, e a última é diretamente afetada pela qualidade da água bruta captada nos mananciais. Isto possibilitará que o problema de otimização consiga mensurar, através da metodologia de custos evitados, o valor da melhoria da qualidade da água em alguns mananciais da empresa.

O objetivo último das decisões que são tomadas a partir da resolução dos problemas de otimização tanto pode ser minimizar o esforço requerido (no caso, minimizar o custo) como maximizar um benefício desejado. Desde que o esforço requerido ou o benefício desejado em qualquer situação prática possa ser expresso como uma função de certas variáveis de decisão, o problema de otimização pode ser definido como uma abordagem para identificar as condições que fazem o valor de uma função mínimo ou máximo.

Um problema de otimização pode ser estabelecido como segue:

---

<sup>3</sup> Os conceitos básicos de otimização descritos nesta seção foram baseados no Capítulo 1 ó Otimização estática ou técnicas de programação matemática da apostila da profa. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes, UFPE.

Encontrar

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)' = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Tal que minimize (ou maximize)  $f(X)$  sujeito às restrições:

$$l_i(X) = 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$g_j(X) \leq 0, j = m+1, m+2, \dots, p$$

onde:

$X$  é vetor  $n$ -dimensional chamado de vetor de escolha ou vetor de decisão,

$f(X)$  é função-objetivo

$l_i(X)$  é restrições de igualdade

$g_j(X)$  é restrições de desigualdade

A função-objetivo nada mais é do que a representação do critério de otimização escolhido, expresso como uma função das variáveis de escolha ou decisão.

Na maioria dos problemas econômicos, as variáveis de decisão não podem ser escolhidas em todo o seu domínio, tendo em vista que a Economia estuda a alocação dos recursos escassos e escassez implica restrições, como  $l_i(X)$  e  $g_j(X)$  apresentadas acima. Quando as restrições de desigualdade são de tal forma que tratá-las como restrições de igualdade produz o mesmo resultado, ou mesma solução, diz-se que as restrições são ativas, isto é, altera o valor ótimo da variável de escolha e a restrição mantém-se como uma igualdade no valor ótimo de  $x$ , caso contrário elas são denominadas inativas.

### 2.1.2 Otimização na questão da água

Os modelos de otimização aplicam-se aos casos em que se procura identificar a alternativa operacional ótima de um sistema. Estes modelos utilizam algoritmos para selecionar,

sistematicamente, soluções ótimas, procurando satisfazer uma função objetivo e restrições operacionais (Wurbs, 1996). De acordo com o mesmo autor, os modelos de otimização são formulados com o intuito de se determinar os melhores valores, para um dado conjunto de variáveis de decisão, que irão maximizar ou minimizar uma determinada função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições.

Segundo Andrade, Curi e Curi (2002), os modelos de otimização são representados por uma formulação matemática, na qual um algoritmo formal é usado para calcular um conjunto de valores para as variáveis de decisão que maximizam ou minimizam uma função objetivo, sujeita a restrições. Ainda, diversos objetivos podem ser configurados na função objetivo de um modelo de otimização, como os seguintes exemplos, que envolvem a questão da água: custos e benefícios econômicos (maximizar a oferta de água e/ou do rendimento da geração hidroelétrica, minimizar o custo de bombeamento de água num sistema de distribuição, minimizar perdas econômicas decorrentes de escassez hídrica, maximizar benefícios líquidos advindos de usos múltiplos da água, etc.); disponibilidade de água (maximizar o volume acumulado ao final de um horizonte de otimização, minimizar vertimentos ou perdas por evaporação, etc.); geração hidroelétrica (maximizar a energia potencial de água armazenada no sistema, minimizar a escassez de energia, etc.).

Corroborando com o exposto, Bouzon *et al* (2013) destacam que as técnicas de Pesquisa Operacional (PO) vêm ganhando importância na análise de sistemas hídricos, uma vez que viabilizam uma modelagem mais adequada de problemas reais. Segundo Yang et al (1996) *apud* Bouzon *et al* (2013), entre os trabalhos realizados com aplicação de PO em sistemas hídricos, há uma preferência pela programação linear por propiciar algumas vantagens, como: adequação para problemas de grandes dimensões, não necessidade de uma política inicial e grande número de sub-rotinas já disponíveis.

Estabelecer problemas de otimização em sistemas de abastecimento de água, conforme Swamee e Sharma (2008) *apud* Coelho e Andrade-Campos (2014), baseia-se na busca por características do sistema que minimizem o custo total do sistema sem afetar a adequada operação do sistema hidráulico e o abastecimento do consumidor. Isso significa que o sistema

deve ser econômico e confiável. Porém, aumentar a confiança do sistema pode implicar em maiores custos.

No que se refere a técnicas de otimização focadas no *design* e operação dos sistemas de abastecimento de água, Coelho e Andrade-Campos (2014) apresentam uma revisão de artigos sobre medidas e métodos, resumindo e comparando estudos anteriores a fim de apresentar o estado da arte sobre o tema. Apresentam tabelas com resumos dos diversos métodos, disponíveis na literatura, aplicados à otimização do *design* das redes, considerando seus diversos tipos, além de uma tabela com resumo dos resultados de aplicações de diferentes métodos de otimização para a otimização do controle de diferentes sistemas de abastecimento de água. Salientam que o desenvolvimento dos sistemas de abastecimento urbano sem o uso de otimização resulta em estruturas não ótimas, baseadas essencialmente em respostas imediatas ao crescimento da demanda por água pela população e indústria (Kiselychnyk *et al*, 2009 *apud* Coelho e Andrade-Campos, 2013). Destacam ainda que essa estrutura não ótima é traduzida em sistemas não eficientes em termos de *design* e operação. Concluem que o processo de otimização de uma rede de distribuição de água, por exemplo, nunca pode fornecer melhorias significantes (i) se o modelo hidráulico de simulação não é adequado, (ii) se o modelo de estimação da demanda falhar, ou também (iii) se a formulação do problema a ser resolvido não considera requisitos específicos do sistema. Destacam, ainda, que qualidade da água e esgoto são tópicos não discutidos no texto, mas reconhecem a importância dessas questões para a melhoria dos sistemas de abastecimento de água no mundo.

Além dessa revisão, os parágrafos a seguir apresentam artigos que utilizam modelos de otimização em sistemas de abastecimento de água, em geral visando definir operações ótimas de controle dos sistemas visando minimização de custos, considerando as restrições de infraestrutura instalada ou propondo ampliações. Outros ainda consideram a abordagem multiobjetivo, propondo também a minimização da variação da vazão na Estação de Tratamento de Água (Francato e Barbosa, 2004), maximização da confiabilidade hidráulica (Carrijo *et al*, 2003) e redução dos impactos ambientais (Lim *et al*, 2010).

Bouzon *et al* (2013) apresentam um modelo de otimização em Programação Linear (PL) para o funcionamento de um sistema de distribuição de água de uma cidade no interior do Estado

de São Paulo, que contempla duas bombas e três reservatórios de água. Foi criado um modelo para determinar o padrão ótimo de operação para as duas bombas no período de 24 horas, a fim de minimizar o custo energético e, ao mesmo tempo, obedecer às restrições do sistema, tais como vazão de fornecimento de água da Estação de Tratamento de Água (ETA), capacidades mínima e máxima dos reservatórios, demanda de água do sistema, dentre outras. A análise foi realizada sob um determinado esquema tarifário da concessionária de energia elétrica, que varia de acordo com o período do dia utilizado. A solução do problema forneceu um padrão de funcionamento para cada uma das bombas em termos de tempo de bomba ligada para cada hora do dia, variando de zero a 60 minutos. Os resultados obtidos mostram que a utilização da PL é satisfatória para a resolução deste tipo de problema, podendo beneficiar a empresa de saneamento, a população atendida e até mesmo o meio-ambiente, ao consumir menos energia.

Segundo Francato e Barbosa (2004) o planejamento da operação dos sistemas urbanos de abastecimento de água é um setor que vem experimentando, na última década, o desenvolvimento e aplicação de técnicas específicas de pesquisa operacional que visam subsidiar os projetos e a gestão operacional dos mesmos. Nesse artigo foi feita uma comparação entre dois objetivos operacionais conflitantes (a minimização da variação da vazão na Estação de Tratamento de Água e a minimização do custo com energia elétrica no booster<sup>4</sup>), analisando as relações de dependência entre os mesmos. Para tal estudo, aplicaram a metodologia desenvolvida ao sistema adutor metropolitano de abastecimento da grande São Paulo, conhecido como Alça Leste. A técnica de otimização utilizada foi a programação linear, apesar do problema apresentar natureza não-linear, porém utilizaram procedimentos iterativos da programação linear, com o que se obteve soluções muito satisfatórias. Na análise dos resultados construíram curvas de soluções não-dominadas combinando duas funções, analisando assim os trade-offs entre as soluções encontradas, visualizando o quanto uma função ganha em detrimento da outra associada, por meio da análise multiobjetivo. Para quantificar o grau de compromisso entre as soluções criaram um parâmetro com capacidade de medir o grau de dependência entre as soluções, baseado no conceito de elasticidade da demanda, amplamente utilizado em Economia.

---

<sup>4</sup> Booster - bomba que, intercalada em uma tubulação, aumenta a energia de pressão, auxiliando o escoamento da água. Proporciona energia necessária quando as condições topográficas ou as perdas de carga nas linhas assim o exigirem (CEDAE, 2006).

Os autores identificaram, diante dos resultados, um forte grau de compromisso entre a vazão bombeada pelo booster do sistema e a vazão aduzida na ETA.

Carrijo *et al* (2003) desenvolveram uma metodologia para atingir a operação ótima de sistemas de distribuição de água, aplicado ao sistema macro-adutor (esqueleto) da cidade de Goiânia, composto por adutoras, elevatórias, reservatórios e estruturas de controle com válvulas de controle automático. A otimização implementada no trabalho utiliza o simulador hidráulico EPANET2 e os algoritmos genéticos multiobjetivo como ferramentas para a otimização operacional de um sistema, levando em consideração dois objetivos: a minimização de custos operacionais e a maximização da confiabilidade hidráulica, considerando o índice de atendimento da demanda, os níveis adequados de água nos reservatórios e as pressões mínimas e máximas nos pontos de demanda, para um período de análise de 24 horas.

Visando contribuir para o planejamento e o desenvolvimento de políticas de abastecimento de água urbano sustentável, Lim *et al* (2010) desenvolveram um modelo matemático para integrar e otimizar a infraestrutura urbana de oferta de água visando reduzir os impactos ambientais e os custos. Recursos de água doce e tratamento de águas residuais foram alocados em várias categorias de demanda por água a fim de reduzir a poluição nos afluentes utilizados para fornecimento de água potável, e para reduzir o consumo de recursos hídricos importados de regiões além dos limites do município. O modelo matemático consiste de uma função objetivo para minimizar o consumo de recursos hídricos importados de regiões fora da cidade, balanços de massa para representar a infraestrutura do sistema de abastecimento e as restrições necessárias para representar as situações reais. Para validar o modelo o mesmo foi aplicado para a cidade de Ulsan, Coréia do Sul. Um sistema ótimo de abastecimento urbano de água de uma cidade metropolitana foi calculado, utilizando o *software* GAMS para resolver o problema de programação não linear, com base no modelo desenvolvido e comparado com o sistema de água existente. Como resultado, a integração e otimização diminuíram (i) a concentração média de poluentes nos afluentes utilizados para abastecimento de água potável, o que pode melhorar a saúde e a higiene humana; (ii) o consumo total de recursos hídricos, bem como eletricidade, reduziram de modo geral os impactos ambientais; (iii) o ciclo de vida do custo; e (iv) a dependência de recursos hídricos de outras regiões, melhorando a segurança regional.

Já Andrade, Curi e Curi (2002) apresentam um estudo com função objetivo diferente das minimizações de custos citadas anteriormente, o objetivo é maximizar a receita líquida potencial advinda da agricultura irrigada e da piscicultura extensiva nos reservatórios também utilizados para o abastecimento urbano. Para isso, aplicaram o modelo ORNAP, que é um software de otimização baseado em programação não linear, na análise da operação integrada de dois reservatórios, Jucazinho e Carpina, de usos múltiplos (abastecimento, irrigação, piscicultura, controle de cheias e perenização do rio a jusante), localizados na bacia do rio Capibaribe, no estado de Pernambuco, Brasil. Os dados de entrada do modelo ORNAP se relacionam a elementos naturais (hidroclimáticos e hidroagrícolas) e artificiais (demandas, características físicas, parâmetros comerciais, entre outros) pertinentes ao sistema hídrico. Os resultados do processo de otimização para os cenários idealizados, definidos para um período de doze meses com base nas séries de valores médios mensais de pluviometria e de vazões médias mensais afluentes aos reservatórios, foram analisados através dos seguintes enfoques básicos: a) valoração da receita líquida ótima potencial da agricultura irrigada, externalizando-se áreas otimizadas para cada cultura e perímetro, vazões para a irrigação, e áreas máximas irrigadas em relação à área total apta a irrigação; b) valoração da receita líquida potencial com piscicultura extensiva e áreas otimizadas de espelho de água nos reservatórios, externalizando-se produção de pescado e mão de obra ocupada com essa atividade; c) análise da performance dos reservatórios, externalizando-se variações mensais de volumes armazenados e de outras variáveis de decisão como, vazão afluente e demanda de evaporação nos reservatórios, demanda de abastecimento e variações de descargas nas calhas do rio. De acordo com os autores, os resultados obtidos possibilitam sugerir uma alternativa para reforço da oferta de água para o abastecimento da cidade de Recife e permitem concluir pela aplicabilidade e viabilidade do modelo como uma importante ferramenta para subsidiar o planejamento da operação de reservatórios, considerando múltiplos usos.

Além da questão dos sistemas de abastecimento, muitos modelos de otimização tratam da questão da alocação ótima de água. Draper *et al.* (2003) apresentaram o desenvolvimento de um modelo de otimização que leva em consideração critérios de eficiência econômica na simulação da operação do sistema que compõe a infra-estrutura hídrica do estado da Califórnia, Estados Unidos. O modelo desenvolvido é denominado CALVIN e visa minimizar o custo da escassez

advindo da alocação de água dentre os usuários de irrigação, geração hidrelétrica e abastecimento urbano, levando-se em conta restrições físicas do sistema e demais aspectos de ordem ambiental e político da região. Em sua análise, Draper *et al.* (2003) empregaram curvas de demanda de água para as duas principais categorias de uso do Estado, irrigação e abastecimento urbano. A representação do sistema nesse modelo foi feita por meio de uma rede de fluxo e o objetivo do trabalho foi o de maximizar o benefício líquido resultante da operação do sistema até o ano de 2020, utilizando, para tanto, um período histórico de 72 anos de dados observados. A conclusão do estudo apontou vantagens em se combinar otimização de sistemas de grande porte em infra-estrutura hídrica e funções econômicas que expressem o valor econômico da água dentre distintos usos.

Ampliando a pesquisa citada acima, Jenkins *et al* (2004), aplicaram um modelo de otimização *economic-engineering* de larga escala ao sistema de abastecimento de água da Califórnia, utilizando o CALVIN, um modelo que combina ideias de otimização de economia e engenharia com os avanços em *softwares* e dados para sugerir uma gestão mais integrada de abastecimento de água regionalmente e por toda a Califórnia. Os resultados ilustram o valor de um modelo de otimização para fornecer informação integrada necessária para gerir um complexo sistema de abastecimento de água multiuso. Essas informações incluem benefícios econômicos de operações flexíveis, valor econômico de oportunidades de expansão da capacidade, estimativa da disposição a pagar dos usuários por água adicional, custo de oportunidade econômico de fluxos ambientais, e identificação de uso conjunto e oportunidades de transferência de água. De modo geral, os resultados sugerem melhorias para a operação do sistema e alocação de água com um valor esperado para todo o estado potencialmente tão alto quanto \$1,3 bilhões/ano. Melhorias significantes na performance parece possível através de transferências e trocas de água, uso conjunto, e várias mudanças operacionais para aumento da flexibilidade. Essas mudanças também reduzem amplamente os custos para os usos agrícola e urbano para atender as exigências ambientais. Os resultados apresentados no artigo têm implicações de longo prazo nas políticas de água, planejamento e gestão na Califórnia. Além disso, destacam que os objetivos da modelagem computacional são (1) fazer uma melhor análise de sistemas complexos; (2) sugerir operações promissoras e infraestrutura; e (3) desenvolver ideias para melhor gestão.

Os modelos econômico-hidrológicos integrados, que são em sua maioria modelos de otimização, vêm trazendo importante contribuição na questão da alocação ótima de água, mais especificamente possibilitando a identificação de um ótimo econômico, preços-sombra e custos de oportunidade dos recursos escassos.

Um exemplo é o estudo de Moraes, Sampaio e Cirilo (2006), em que os autores apresentam a aplicação de um modelo econômico-hidrológico integrado para gestão de recursos hídricos, na bacia do rio Pirapama, Pernambuco, que integra um grande número de relações físicas, econômicas, institucionais e agrônômicas numa plataforma única para subsidiar decisões quanto a alocação ótima de água entre os usos alternativos e vinhoto para fertirrigar áreas plantadas de cana a montante da barragem Pirapama. Restrições de qualidade da água foram introduzidas no modelo final, tendo como consequência a redução substancial dos benefícios líquidos totais, principalmente aqueles relacionados ao uso industrial e a fertirrigação. Com essas restrições o modelo considera a diluição de cargas orgânicas como um outro uso, restringindo retiradas de água para que o rio possa se recuperar através do processo de autodepuração, em outras palavras usando a capacidade de assimilação dos rios.

Já Carrera-Fernandez e Ferreira (2003) abordaram a questão da alocação conjunta dos recursos hídricos em sistemas de bacia hidrográfica, tomando-se como referência a bacia do rio Formoso, no estado da Bahia. Foram considerados os três principais usos da bacia: agricultura irrigada, geração de energia elétrica e abastecimento humano, com o objetivo de otimizar o benefício social líquido, estabelecendo um padrão de utilização dos recursos hídricos em uma perspectiva mais ampla para a sociedade. Para isto, otimizaram uma função de excedente econômico agregado, a qual engloba os lucros conjuntos dos setores usuários, sem estabelecer, *a priori*, qualquer preferência sobre a utilização dos recursos hídricos. A solução desse problema gera uma repartição dos recursos da água de modo a igualar-se o benefício marginal líquido entre os vários setores usuários, em conformidade com o importante princípio dos usos. Conclui-se que a política mais apropriada de gestão dos recursos hídricos é aquela em que o predomínio na bacia hidrográfica é outorgado ao uso que, comprovadamente, gera o maior benefício líquido para a sociedade.

## 2.2 Método de Custos Evitados

O Método de Custos Evitados (MCE) pertence à categoria de valoração dos benefícios advindos de bens ambientais denominada conceito de ligação comportamental, apresentada por Smith e Krutilla (1982) *apud* Thomas e Callan (2010). Segundo esses autores, o conceito de ligação comportamental para quantificar os benefícios baseia-se nas observações do comportamento de mercados reais ou em respostas a pesquisas sobre mercados hipotéticos para bens ambientais. Envolvidas por essa categoria estão as técnicas que avaliam as respostas imediatamente relacionadas com as mudanças ambientais, que são divididas em métodos diretos, como o Método de Valoração Contingente, por exemplo, que usa dados hipotéticos do mercado para estimar o valor dos benefícios de um bem ambiental, e métodos indiretos, que são aqueles que examinam as respostas não sobre o recurso ambiental em si, mas sobre um conjunto de condições de mercado a ele relacionadas, como é o caso do Método de Custos Evitados.

O MCE é um método indireto de estimação dos benefícios das melhorias da qualidade ambiental que estima indiretamente a disposição a pagar (DAP) para produtos não comercializáveis, como o ar limpo ou a água, a partir das mudanças nas despesas com bens que são substitutos para a qualidade ambiental. Assim, se o meio ambiente em geral for melhorado por alguma iniciativa, o indivíduo poderá gastar menos com os bens substitutos e é exatamente essa diminuição de despesas que dá uma indicação indireta da DAP do indivíduo para os benefícios incrementais<sup>5</sup> decorrentes (THOMAS e CALLAN, 2010).

Boardman *et al* (2011) o denominam método de despesas defensivas, que representam o montante gasto para mitigar ou mesmo eliminar o efeito de uma externalidade<sup>6</sup> negativa. Os autores citam o método como pertencente à ampla classe dos métodos da função de produção, uma vez que nesses métodos o nível de um bem público<sup>7</sup> ou externalidade (por exemplo,

---

<sup>5</sup> A redução dos danos à saúde, na ecologia e na propriedade, vinculados a uma iniciativa de política ambiental.

<sup>6</sup> Externalidade é definida como um efeito de propagação associado a produção ou consumo que se estende a um terceiro, fora do mercado. Se o feito externo gera custos a um terceiro é denominada externalidade negativa, se gera benefícios a um terceiro, externalidade positiva (THOMAS e CALLAN, 2010).

<sup>7</sup> Bem público é um bem não-rival no consumo e que produz benefícios não-excludentes. Não-rival é quando o bem é consumido por um indivíduo, outra pessoa não é impossibilitada de consumir o mesmo bem, ao mesmo tempo, e não-excludente significa que não é possível impedir que outros compartilhem os benefícios do consumo de um bem (THOMAS e CALLAN, 2010).

poluição) e outros bens são insumos para algum processo produtivo. Se o nível do bem público ou da externalidade varia, então o nível de outros insumos pode ser modificado na direção oposta e ainda permite que a quantidade do bem produzido permaneça a mesma. Por exemplo, no caso da água tratada fornecida para abastecimento urbano, quando a externalidade negativa de poluição é reduzida, menos produto químico é requerido para produzir o mesmo volume de água tratada. A mudança nas despesas com os insumos substitutos (produtos químicos) é usada como medida do benefício da redução do bem público ou externalidade (Boardman *et al*, 2011 adaptado), por exemplo a redução da poluição.

De acordo com Antoci e Bartolini (2004), o conceito de despesa defensiva foi introduzido na literatura econômica por Hirsch (1976) para se referir a todas as escolhas de consumo feitas pelos indivíduos para se defender contra externalidades negativas decorrentes do crescimento econômico. Posteriormente, o conceito de despesa defensiva se tornou conhecido na literatura ambiental. Na verdade, despesas que são intrinsecamente defensivas são raras. Porém, muitos dos exemplos canônicos da literatura têm uma natureza claramente defensiva: o uso de vidros duplos é certamente uma forma de defesa contra o ruído, o uso de água mineral é um substituto para a água da torneira; gastos para a redução da poluição ou prevenção, para o tratamento de doenças causadas por poluição, ou para restauração do solo são uma resposta direta à degradação ambiental.

Para explicitar o método, os autores Boardman *et al* (2011) citam o exemplo de uma cidade poluída, onde você provavelmente vai encontrar janelas frequentemente precisando de limpeza. Se contratar alguém para limpar as janelas periodicamente, o custo dessa ação em resposta a poluição é denominado despesa defensiva. Suponha que a cidade passe a ter uma norma que reduz o nível de poluição, então as janelas ficarão menos sujas. Agora gastará menos com limpadores de janelas. A redução da despesa defensiva é a despesa defensiva evitada e tem sido sugerida como uma medida dos benefícios da nova norma.

Entretanto, Boardman *et al* (2011) citam pelo menos cinco problemas com o método de despesas defensivas (ou MCE). Primeiro, redução nos gastos ou despesa defensiva irá subestimar os benefícios que estão sendo medidos. Segundo, assume implicitamente que os indivíduos rapidamente se adaptam ao novo equilíbrio. Terceiro, uma despesa defensiva pode não remediar

todo o dano, de modo que a redução desta despesa não mede totalmente os benefícios. Quarto, a despesa defensiva pode ter outros benefícios além da reparação do dano e, por fim, nem todas as medidas defensivas são compradas em mercados. Por exemplo, algumas pessoas podem limpar as suas próprias janelas, nesse caso a redução no seu custo de oportunidade poderá também ser incluída como benefício.

Contudo, vários estudos utilizaram o MCE para identificar e estimar os benefícios ambientais, com variações na metodologia que utilizam visando superar os problemas citados acima. Por exemplo, no artigo de Abdalla, Roach e Epp (1992) o método de custos evitados para valoração de melhorias ambientais é examinado e usado para aproximar-se do custo econômico da degradação das águas subterrâneas para os moradores do sudeste da Pensilvânia. Foram examinados os custos da degradação incluindo cinco categorias de custos, aumento nas compras de garrafas de água, novas compras de garrafas de água, instalação de sistemas de tratamento de água nas residências, transporte de água e fervura da água, incluindo o custo de oportunidade do lazer (gasto de tempo) nessas duas últimas categorias. Dessa forma os pesquisadores buscaram evitar o terceiro problema do MCE citado acima e estimaram um custo de degradação no valor de US\$ 61.200, baseado no valor do tempo de lazer igual ao salário mínimo, e de US\$ 131.200, no caso do custo baseado no valor do tempo de lazer igual ao salário do indivíduo. Os resultados da pesquisa também indicam que o conhecimento dos moradores sobre a contaminação, a percepção do risco e a presença de criança determina se devem tomar ações preventivas e que seus níveis de despesa preventiva são maiores se as crianças estão presentes.

Uma outra pesquisa utilizando o MCE foi desenvolvida pelos pesquisadores Bresnahan, Dickie e Gerking (1997) *apud* Thomas e Callan (2011), que identificaram três comportamentos dos moradores de Los Angeles para mitigar os efeitos do *smog* urbano. Especificamente, os indivíduos passariam menos tempo fora de casa, mudariam as atividades recreativas quando a qualidade do ar fosse ruim e/ou ampliariam o uso de condicionadores de ar em suas casas. As mudanças, no caso redução, nas despesas de qualquer uma dessas atividades em função da melhoria da qualidade do ar induzida por uma política pública representariam benefícios incrementais. Os autores ainda citam Abrahams, Hubbell e Jordan (2000), que usaram o MCE para estimar os benefícios anuais aos moradores da Georgia em função da água potável de

melhor qualidade. Os pesquisadores fizeram isso medindo as mudanças nos gastos dos moradores ao comprarem água engarrafada e filtros de água. Com base nos resultados, a DAP de um indivíduo para água potável de qualidade é de aproximadamente US\$ 57 (US\$ de 2003) anuais, e os benefícios totais para todos os residentes da Geórgia são estimados em US\$ 417 milhões (US\$ de 2003).

No modelo desenvolvido por Antoci e Bartolini (2004), os indivíduos eram forçados cada vez mais a satisfazer suas necessidades baseando-se em bens de mercado, a fim de compensar uma diminuição no seu bem-estar devido à redução dos recursos livres, isto é, os indivíduos devem realizar despesas defensivas para compensar a deterioração ambiental. O modelo evolucionário apresentado por eles sugere que externalidades negativas podem gerar um aumento do produto *per capita* devido a um aumento na oferta de trabalho. Uma vez que, confrontados com uma redução do recurso (por exemplo, redução na disponibilidade de água de boa qualidade), os agentes podem reagir através do aumento na oferta de trabalho, a fim de produzir e consumir bens privados substitutos que substituem o recurso cada vez menor, ou seja, eles podem aumentar as suas despesas defensivas. Um dos exemplos desse mecanismo é a poluição da água onde as pessoas podem nadar de graça (mar ou rio próximo a suas casas), agentes podem decidir comprar um substituto, ex. uma piscina ou passar um feriado em algum resort tropical.

Já McConnell e Rosado (2000) mostram como benefícios não marginais da melhor qualidade da água potável podem ser medidos a partir de uma análise de bem-estar, onde os parâmetros para a análise são obtidos através de um modelo logit (*õnestedö*) estruturado de acordo com insumos defensivos para o tratamento da água potável. Foi explorada a natureza da adaptação do comportamento e a disposição a pagar (DAP) implícita para ter água potável segura no contexto de uma área urbana do Brasil, na Grande Vitória (Espírito Santo). Os parâmetros estimados mostram que os moradores dessa região estão dispostos a pagar, em média, \$ 3 por mês para ter água potável segura.

Na presente pesquisa o método de custos evitados será utilizado para se obter o valor para a COMPESA da melhoria da qualidade da água das barragens onde são realizadas captações de água para o abastecimento da região metropolitana de Recife. Tal valor será estimado a partir da

redução das despesas da empresa com produtos químicos utilizados para o tratamento da água distribuída para a RMR, resultante da melhoria da qualidade da água das barragens de captação de água bruta, conforme metodologia apresentada no Capítulo 3 adiante.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo é apresentada a área do estudo de caso, bem como uma descrição simplificada da complexa rede de abastecimento de água da região metropolitana do Recife.

Pernambuco possui 185 municípios e uma população de cerca de 7,05 milhões de habitantes. A região metropolitana do Recife (RMR), identificada na Figura 1, é constituída por 14 municípios (Recife, Olinda, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe, São Lourenço da Mata, Paulista, Abreu e Lima, Igarassu, Itapissuma, Itamaracá, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca e Moreno), corresponde a 51% da população do Estado de Pernambuco e está inserida na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, em que a oferta de água é um pouco maior do que a porção oriental do Estado, inserida na Região Hidrográfica do São Francisco (ANA, 2010).



**Figura 1 - Estado de Pernambuco ó Mesorregiões**  
Fonte adaptada: CONDEPE/FIDEM, 2014.

A RMR apresenta uma população estimada de aproximadamente 3,8 milhões em 2013 (IBGE, 2010), distribuída entre seus municípios conforme Tabela 1, sendo Recife, capital do estado de Pernambuco, o município mais populoso da região, seguido por Jaboatão dos Guararapes, Olinda e Paulista, todos com mais de trezentos mil habitantes.

**Tabela 1 - População por município da região metropolitana do Recife**

<b>Município da RMR</b>	<b>População Estimada 2013</b>
Recife	1.599.513
Olinda	388.127
Abreu e Lima	97.786
Paulista	316.714
Igarassu	109.322
Itapissuma	25.220
Ilha de Itamaracá	23.923
Araçoiaba	19.333
Camaragibe	151.587
São Lourenço da Mata	108.301
Moreno	59.836
Jaboatão dos Guararapes	675.599
Cabo de Santo Agostinho	196.152
Ipojuca	87.926
<b>TOTAL</b>	<b>3.859.339</b>

**Fonte: IBGE (2010).**

Com uma demanda de cerca de 14 m<sup>3</sup>/s, a população da RMR, tem enfrentado sérios problemas com o déficit do abastecimento público (MONTENEGRO *et al*, 2009) e ao longo do ano de 2013 a maioria de suas cidades tem sofrido com o racionamento de água, de acordo com Relatório de População Abastecida sem Rodízio e Quadro da Situação Atual de Abastecimento, obtidos junto à COMPESA.

De acordo com o Manual de Operações do Projeto de Sustentabilidade Hídrica ó PSHPE ó Volume 1, elaborado pelo Governo do Estado (2009, p. 8), no litoral e na Zona da Mata, onde está situada a RMR, o clima é classificado como quente e úmido, os índices pluviométricos atingem 2.000 mm/ano e as chuvas se distribuem ao longo de seis meses. Além disso, 80% dos volumes aproveitáveis estão localizados nas bacias do litoral e zona da mata pernambucanos, onde o volume aproveitável dos recursos hídricos pode alcançar 80% de sua potencialidade.

Segundo o Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água (ANA, 2010), a região

metropolitana do Recife (RMR) é abastecida por um conjunto complexo e interligado de mananciais e sistemas de produção (incluindo captação, adução, tratamento e distribuição), com destaque aos sistemas integrados<sup>8</sup>, que respondem por quase 90% do volume total produzido, operados pela Companhia Pernambucana de Saneamento ó COMPESA. Têm como principais fontes de água oito barragens que fornecem 50% da água disponível, nove pontos de captação de água de rios, que produzem 37% da água, e mais de cem poços operados pela companhia, que cobrem o restante 13% da demanda (PERNAMBUCO, 2009).

Para se ter uma ideia da complexidade do sistema de abastecimento da RMR, de acordo com os Relatórios de Produção da COMPESA (Jan. a Dez. 2013), para fornecer água para essa região em 2013 foram acionados 9 (nove) sistemas integrados e 17 (dezessete) isolados<sup>9</sup> complementares. Em termos de mananciais superficiais, destacam-se as Barragens de Tapacurá, Pirapama, Gurjaú e Botafogo, além dos rios Capibaribe, Ipojuca, Beberibe, entre outros. Muitos municípios complementam o abastecimento com a utilização de manancial subterrâneo e apenas dois (Ilha de Itamaracá e Itapissuma) captam exclusivamente em poços (ANA, 2010).

Além dos poços da COMPESA, milhares de poços particulares vêm sendo utilizados principalmente para abastecer edifícios residenciais, os quais bombeiam em média 5,0 m<sup>3</sup>/h (Montenegro *et al.*, 2009). Conforme destaca Manoel Filho (2004), a captação de água subterrânea na RMR é usada principalmente para abastecimento urbano e industrial e tem participação estimada na ordem de 15% no sistema de abastecimento administrado pela COMPESA. De acordo com o autor, a maior parte da água subterrânea da região é explorada através de poços particulares.

Diante de cenários recorrentes de escassez, Rosal *et al.* (2013) destacam que as águas subterrâneas ganham projeção como alternativa atraente de abastecimento para empreendimentos públicos e privados, pois apresentam baixo custo de tratamento e distribuição, sendo naturalmente protegidas de variações sazonais bruscas e possuem, em geral, uma boa qualidade para consumo. Os autores salientam que atualmente Pernambuco possui aproximadamente 5000

---

<sup>8</sup> Sistemas integrados: sistemas que abastecem diversos municípios simultaneamente ou quando mais de uma unidade produtora abastece um único município, bairro, setor ou localidade (BRASIL, 2007).

<sup>9</sup> Sistemas isolados: sistemas que abastecem isoladamente bairros, setores ou localidade (BRASIL, 2007). Considerando os diversos poços utilizados como um único sistema isolado nessa contagem.

poços outorgados, dos quais 75% estão localizados na RMR, que corresponde a mais de 80% da vazão de água subterrânea outorgada no estado.

Por outro lado, na exploração de águas superficiais para abastecimento na RMR são utilizados sistemas integrados, listados na Tabela 2, todos considerados no modelo que será apresentado adiante, com informações sobre os seus mananciais e quais municípios são atendidos por cada um deles. Nota-se que os sistemas Alto do Céu, Caixa D'água e Marcos Freire têm como mananciais apenas rios e riachos, que os municípios Araçoiaba, Moreno, Ilha de Itamaracá e Itapissuma não são abastecidos por sistemas integrados e, portanto, não entraram no modelo desenvolvido nesta tese, os municípios de Abreu e Lima, Igarassu, Paulista e Ipojuca são abastecidos por apenas um sistema integrado, sendo o sistema Botafogo a distribuir para os três primeiros e Suape para o último, que também são atendidos por sistemas isolados.

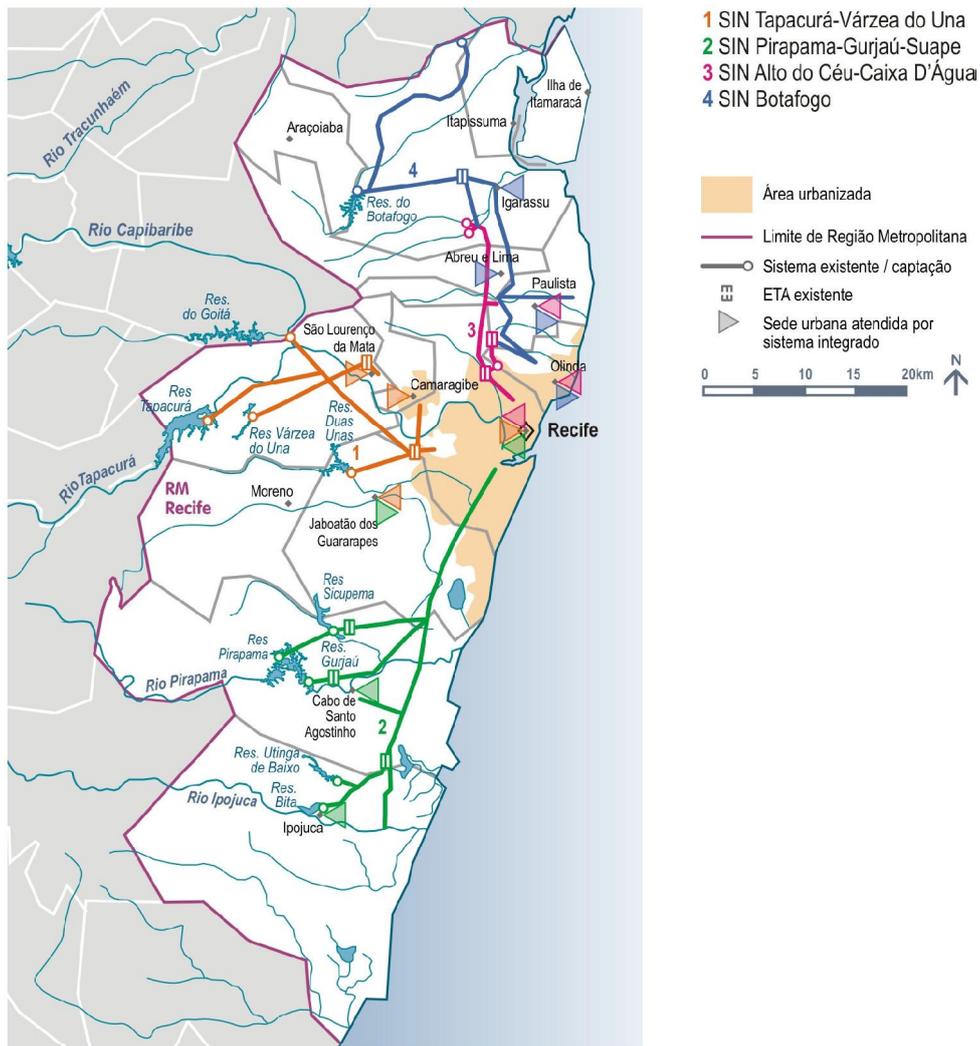
**Tabela 2 - Sistemas produtores da Região Metropolitana do Recife**

<b>N.</b>	<b>Sistema integrado</b>	<b>Mananciais</b>	<b>Sedes urbanas atendidas</b>
1	ALTO DO CÉU	Rio Utinga Rio Pitanga Rio Paratibe Rio Beberibe	Olinda Recife
2	BOTAFOGO	Barragem de Botafogo (Rio Catucá) Rio Cumbe Rio Pilão Rio Tabatinga Rio Conga Rio Arataca/Jardim Rio Pitanga Rio Utinga	Abreu e Lima Igarassu Olinda Paulista
3	CAIXA D'ÁGUA	Rio Beberibe	Recife Olinda
4	GURJAÚ	Barragem Gurjaú Rio Sicupema Rio Pirapama	Cabo de Santo Agostinho Jaboatão dos Guararapes
5	MARCOS FREIRE	Riacho Zumbi	Recife Jaboatão dos Guararapes
6	PIRAPAMA	Barragem de Pirapama	Recife Cabo de Santo Agostinho Jaboatão dos Guararapes

<b>N.</b>	<b>Sistema integrado</b>	<b>Mananciais</b>	<b>Sedes urbanas atendidas</b>
7	SUAPE	Barragem de Utinga Barragem do Bitá Rio Ipojuca	Cabo de Santo Agostinho Ipojuca
8	TAPACURÁ	Barragem Tapacurá Barragem Duas Unas Rio Capibaribe	Camaraçibe Jaboatão dos Guararapes Recife São Lourenço da Mata
9	VÁRZEA DO UNA	Barragem Várzea do Una	São Lourenço da Mata Camaraçibe

Fonte: Relatórios de Produção da COMPESA (Jan. a Dez. 2013) e site da COMPESA, disponível em <<http://www.compesa.com.br/saneamento/abastecimentodeagua>> Acesso em 22 jan. 2014.

No mapa dos principais sistemas integrados da RMR (Figura 2) é possível visualizar a distribuição da rede adutora dos sistemas na região, inclusive do novo Sistema Produtor Pirapama, em operação plena a partir de 2011, que ampliou em 40% a oferta de água na Região Metropolitana do Recife, beneficiando um total de 2,5 milhões de pessoas dos municípios do Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes e Recife. As obras do novo sistema, que resultam em reforço de 5,1 m<sup>3</sup>/s, previram três etapas: 1ª) ligação entre os reservatórios Pirapama e Gurjaú, de modo a aumentar a disponibilidade de água no reservatório Gurjaú; 2ª) duplicação da adutora do Gujaú e Modernização da adutora existente; 3ª) implementação do Sistema Produtor Pirapama, com captação no reservatório Pirapama e nova adutora (ANA, 2010).



**Figura 2 - Principais sistemas integrados da região metropolitana do Recife**  
 Fonte: ANA (2010).

### 3.1 Composição dos sistemas Pirapama e Tapacurá<sup>10</sup>

Conforme apresentado na Tabela 2, são nove os sistemas integrados que são responsáveis pelo abastecimento da região metropolitana do Recife, destacando-se os sistemas Pirapama e Tapacurá, os maiores do estado de Pernambuco, e juntos são responsáveis, em média, por 62%<sup>11</sup> da produção mensal dos sistemas integrados que abastecem a RMR.

<sup>10</sup> Todas as informações contidas nesta seção foram obtidas no site da COMPESA, disponível em <<http://www.compesa.com.br/saneamento/abastecimentodeagua>> Acesso em 22 jan. 2014.

<sup>11</sup> Estimado pelo autor a partir de dados dos Relatórios de Produção da COMPESA (Jan. a Dez. 2013).

### **3.1.1 Sistema Pirapama**

O Sistema Pirapama, localizado no Cabo de Santo Agostinho, na região metropolitana do Recife, é o maior sistema de abastecimento de água de Pernambuco e um dos maiores do Brasil. O projeto foi executado em três etapas, sendo a última finalizada em novembro de 2011.

O novo sistema produz 5.130 litros de água (5,13 m<sup>3</sup> água/segundo), o que representa um incremento de 50% da produção de água da RMR. Foram beneficiadas cerca de 3 milhões de pessoas no Recife, Jaboatão dos Guararapes, Cabo de Santo Agostinho e, indiretamente, as cidades de São Lourenço da Mata e Camaragibe. Pirapama retirou vários bairros dessas cidades do racionamento de água, resolvendo um problema crônico de falta de água existente por mais de duas décadas. A área plana do Recife, por exemplo, não enfrenta mais rodízio na distribuição de água. As regiões de topografia elevadas estão recebendo obras complementares para que a água de Pirapama também chegue nessas regiões.

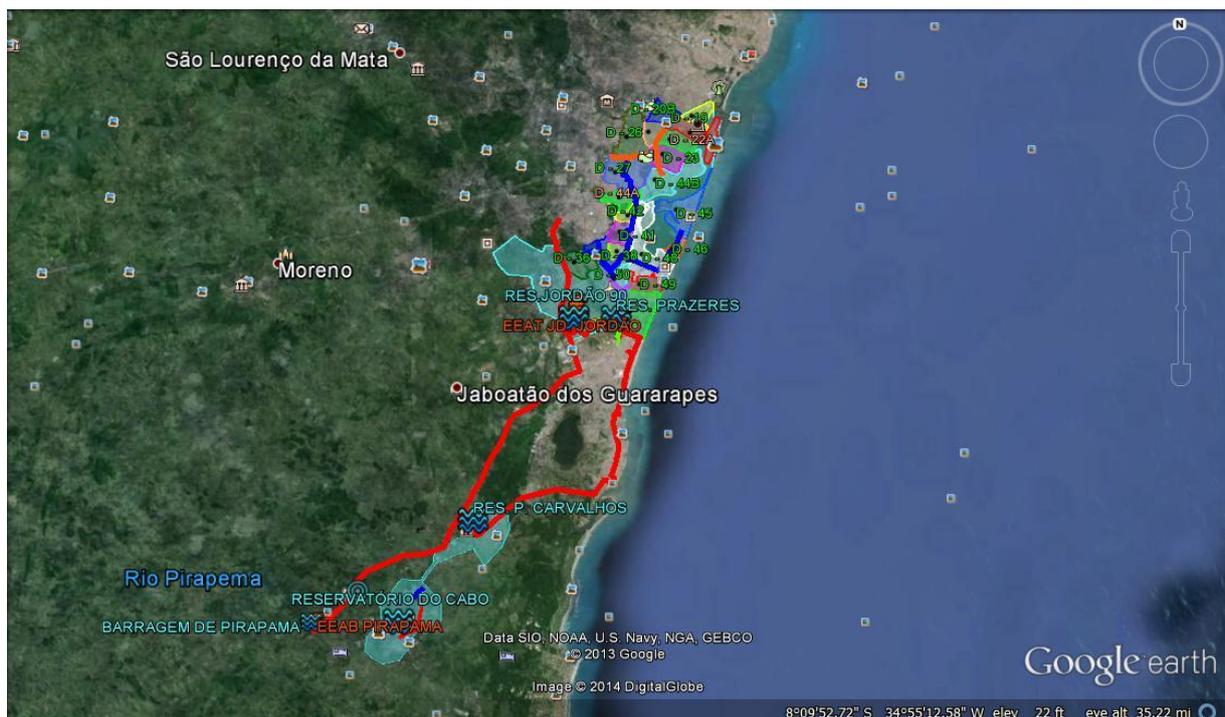
A Barragem de Pirapama, também localizada no Cabo de Santo Agostinho, tem a capacidade de acumular 61 milhões de metros cúbicos de água. Ela foi concluída em 2008 e representou um investimento na época de R\$ 20 milhões. As obras da estação de tratamento de água e dos reservatórios do Sistema Pirapama também foram iniciadas em 2008. Foram investidos mais de R\$ 600 milhões, com recursos do governo federal (Ministério da Integração Nacional e BNDES), estadual e da Compesa.

O sistema é composto por:

- Barragem Pirapama: localizada no Cabo de Santo Agostinho. Capacidade acumulação: 61 milhões de metros cúbicos.
- Estação de Tratamento de Água: localizada no Cabo de Santo Agostinho. Capacidade de tratamento: 5,13 m<sup>3</sup> água/segundo ou 5.130 litros de água por segundo.
- Adutora de Água Bruta com diâmetro de 1700mm: 3,40 km de extensão.
- Adutora de Água Tratada com diâmetro de 1880 mm: 20,31 km de extensão.
- Estação elevatória de água bruta constituída de 6 conjuntos motobomba: 6 x 1600 cv e 6 x 1,026 m<sup>3</sup>/s alimentadas através de uma SE -69 kV. Potência total: 9600 cv.

- Anéis de Distribuição de Água: constituídos pelos Grandes Anéis da Muribeca - GAM e Grandes Anéis do Recife ó GAR, com diâmetros variáveis, o primeiro com 18,37 km de extensão e o segundo com 13,65 km.
- Reservatório Jordão ó capacidade para acumular 90 mil metros cúbicos de água.
- Subadutora do Jordão, com diâmetro de 1800 mm e 3,15 km de extensão.
- Reservatório de Ponte dos Carvalhos ó capacidade para acumular 17 mil metros cúbicos de água.
- Subadutora de Pontes dos Carvalhos, com diâmetro de 800 mm e 1,44 km de extensão.
- Reservatório do Cabo de Santo Agostinho ó capacidade para acumular 5,5 mil metros cúbicos de água.
- Subadutora do Cabo, com diâmetro de 500 mm e 3,44 km de extensão.

Na Figura 3 abaixo é possível visualizar a abrangência do sistema Pirapama, os distritos atendidos, as adutoras e as unidades que o compõem.



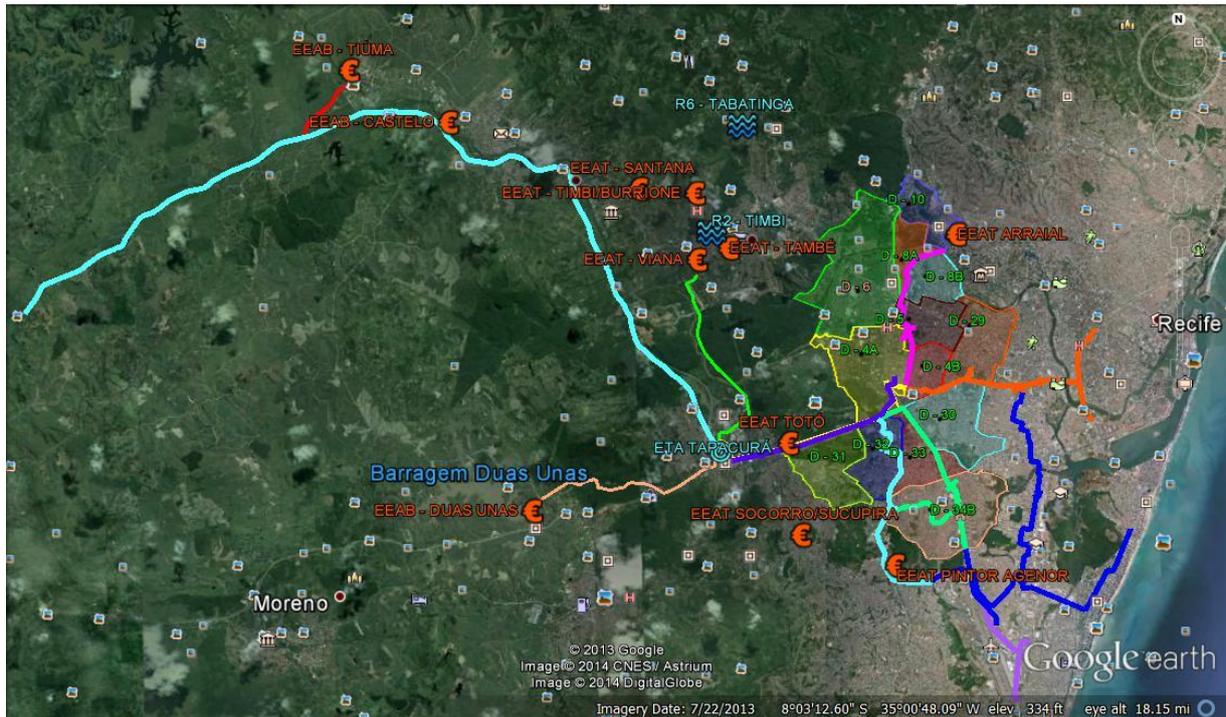
**Figura 3 - Sistema Pirapama no Google Earth**  
 Fonte: Elaborado pela COMPESA ó Gerência de Controle Operacional.

### **3.1.2 Sistema Tapacurá**

A primeira etapa do sistema Tapacurá entrou em operação em 1975 e a segunda, em 1982, sendo atualmente o segundo maior sistema do estado de Pernambuco, distribuindo água para os municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe e São Lourenço da Mata. Tem como mananciais os rios Tapacurá e Duas Unas e, posteriormente, com unidades de captação construídas durante situações de emergência, os Rios Capibaribe e Várzea do Una. O mesmo pode ser visualizado na Figura 4 adiante, destacados os distritos atendidos e a rede adutora.

O rio Tapacurá é explorado através da Barragem Tapacurá, localizada em São Lourenço da Mata, que é composta por um sistema de três barragens, sendo duas de terra e uma de concreto (principal), com uma bacia hidrográfica a montante de 360 km<sup>2</sup> e um volume útil de 94,2 x 106 m<sup>3</sup>. Já o rio Duas Unas é explorado através da Barragem Duas Unas, localizada em Jaboatão dos Guararapes, que é uma barragem de terra, com vertedor central de concreto e que possui uma bacia hidrográfica a montante de 75 km<sup>2</sup> e volume útil de 24 x 106 m<sup>3</sup>.

O rio Capibaribe, explorado através das estações elevatórias de Tiúma, cuja operação foi iniciada em 1983, e Castelo, com início de operação em 1993. Para que estas elevatórias operassem normalmente, o Rio Capibaribe foi regularizado através das Barragens do Carpina e Goitá (estando esta última localizada no Rio Goitá, um de seus afluentes) que, inicialmente construídas para contenção de enchentes, passaram a desempenhar também a função de abastecimento público.



**Figura 4 - Sistema Tapacurá no Google Earth**

Fonte: Elaborado pela COMPESA ó Gerência de Controle Operacional.

A adução de água bruta é realizada através das adutoras do Tapacurá, de Duas Unas e de Tiúma. A adutora do Tapacurá funciona no regime de gravidade da barragem de mesmo nome até a ETA Castello Branco, tem extensão de 27,3km e diâmetro de 1.600mm, sendo que 24,8km são de tubos de concreto armado protendido do tipo ponta e bolsa e os 2,5km restantes são em aço, com chapas de 3/8", e a capacidade nominal de transporte da adutora é de 3.100l/s. Ainda no trecho da adutora em concreto armado, existem as interligações do Sistema Várzea do Una e das elevatórias de Tiúma e Castelo. A adutora está localizada nos municípios de São Lourenço da Mata (onde tem início) e Jaboatão dos Guararapes (onde termina na ETA). A adutora de Duas Unas é uma adutora por recalque em aço carbono com diâmetro de 800mm, com capacidade para transportar 1.000l/s, tendo uma extensão total de aproximadamente 7,6km da barragem até a ETA e está localizada no município de Jaboatão dos Guararapes. A adutora de Tiúma funciona por recalque da elevatória de mesmo nome até a injeção na adutora do Tapacurá. Localizada no município de São Lourenço da Mata, possui uma extensão total de 2.034m, com tubulações de 600mm de diâmetro, em ferro dúctil, podendo transportar até 500l/s.

A elevação de água bruta é feita pelas estações elevatórias Duas Unas, Tiúma e Castelo. A primeira está localizada na BR-232, em Jabotão dos Guararapes, e recalca da Barragem de Duas Unas até a ETA Tapacurá. A segunda está situada na localidade de Tiúma, próxima à BR-408, em São Lourenço da Mata, recalca do Rio Capibaribe e injeta na Adutora do Tapacurá. Enquanto a estação elevatória Castelo, localizada em São Lourenço da Mata, próxima à BR-408, recalca do Rio Capibaribe e injeta na Adutora do Tapacurá.

O tratamento da água do sistema Tapacurá é realizado na Estação de Tratamento de Água (ETA) Castelo Branco, também conhecida como ETA Tapacurá, localizada no bairro do Curado, no município de Jabotão dos Guararapes, e tem capacidade nominal para tratamento de  $4\text{m}^3/\text{s}$ . A construção das unidades de tratamento da ETA se deu em duas etapas, a primeira concluída em 1975 e a segunda em 1982. Ainda como parte do tratamento da água, a ETA Tapacurá possui um pavilhão de cloro, podendo funcionar uma bateria de até 24 cilindros de cloro (no estado gasoso), que ficam estocados no mesmo local. Nesta ETA é utilizado também cloro no estado líquido (que fica armazenado numa carreta, próximo a esse pavilhão) que passa por um vaporizador para depois ser aplicado à água. Existe também um prédio de química, onde ficam localizadas as tinas (tanques) de dissolução de sulfato, onde o mesmo é dissolvido para ser aplicado à água. É utilizado sulfato no estado líquido que fica armazenado em tanques de fibra de vidro próximos ao pavilhão de cloro. Há ainda um pavilhão de carvão ativado, onde o mesmo é armazenado e aplicado à água.

Para reservação o sistema conta com três reservatórios, localizados na área da própria ETA Castello Branco, sendo: 2 (dois) de  $23.000\text{m}^3$  cada, construídos na 1ª Etapa, e 1 (um) de  $35.000\text{m}^3$ , construído na 2ª Etapa, perfazendo um total de  $81.000\text{m}^3$  de armazenamento.

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a construção da plataforma de otimização. São apresentadas a função objetivo, as variáveis de decisão e as restrições construídas para o problema, bem como as hipóteses assumidas. Em seguida, será apresentado como a plataforma pôde ser utilizada para identificar além da solução ótima, os custos de oportunidade de alguns sistemas integrados, o preço-sombra de algumas restrições e o valor de uso da qualidade da água. Além disso, são disponibilizados os dados utilizados na pesquisa, bem como uma breve análise dos mesmos e a indicação de como foram obtidos.

### 4.1 Modelo de otimização

No presente estudo foi desenvolvido um modelo que minimiza uma parte significativa dos custos de uma empresa de abastecimento de água, a soma do custo de energia elétrica (CE) com os custos de tratamento da água (CT), esse último representado no modelo pelas despesas com produtos químicos utilizados no tratamento de água. A partir desse modelo, desenvolvido com parâmetros do sistema de abastecimento da região metropolitana do Recife, busca-se fornecer um instrumento de gestão para as empresas de abastecimento de água, na procura da eficiência energética e redução nos gastos com produtos químicos.

De acordo com o documento Análise do Relatório da Administração - Demonstrações Contábeis (COMPESA, 2013), as despesas com energia elétrica da empresa representam em média 19% dos seus custos dos serviços prestados, ocupando a terceira posição na lista dos seus maiores gastos, atrás apenas de custo de construção<sup>12</sup> e folha de pessoal. Já as despesas com produtos químicos representam em torno de 5% desses custos, ficando na sétima posição da lista.

O modelo elaborado é formulado a seguir como um problema de programação linear de minimização do custo anual, com energia elétrica (CE) e produtos químicos (CT), que tem como variável de decisão (endógena) o volume de água (m<sup>3</sup>) alocado por cada sistema integrado de abastecimento de água em cada município da região metropolitana do Recife em cada mês do ano.

---

<sup>12</sup> A Companhia efetua as obras de expansão e melhorias (aumento da capacidade produtiva) em sistemas de água e esgoto e considera como custo de construção o valor incorrido nestas obras (COMPESA, 2013).

$$\text{Min } \sum_{i=1}^9 (CE_i + CT_i) = \text{Min } \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^9 (\sum_{j=1}^9 (pe_i^t x_{ij}^t + pt_i^t x_{ij}^t)) \quad 4.1$$

Sujeito a:

Restrição de capacidade máxima de produção mensal dos sistemas integrados de abastecimento (m<sup>3</sup>/mês):

$$\sum_{j=1}^9 x_{ij}^t \leq S_i \quad 4.2$$

Restrição de distribuição mínima de água por sistemas integrados para cada município da RMR (m<sup>3</sup>/mês):

$$x_{ij}^t \geq D_j^t \quad 4.3$$

Restrição de volume máximo de água que o sistema i é capaz de distribuir para o município j (m<sup>3</sup>/mês) em virtude da rede adutora instalada:

$$x_{ij}^t \leq v_{ij} \quad 4.4$$

Restrição de possibilidade de atendimento dos municípios por sistemas integrados, resultante da infraestrutura construída atual, apresentada na Tabela 3:

**Tabela 3 - Possibilidade de distribuição dos sistemas integrados produtores da RMR**

N.	SISTEMA INTEGRADO (i)	MUNICÍPIO ATENDIDO (j)
1	ALTO DO CÉU	Olinda Recife
2	BOTAFOGO	Abreu e Lima Igarassu Olinda Paulista
3	CAIXA D'ÁGUA	Recife Olinda
4	GURJAÚ/MATAPAGIPE	Cabo de Santo Agostinho Jaboatão dos Guararapes

N.	SISTEMA INTEGRADO (i)	MUNICÍPIO ATENDIDO (j)
5	MARCOS FREIRE	Recife Jaboatão dos Guararapes
6	PIRAPAMA	Recife Cabo de Santo Agostinho Jaboatão dos Guararapes
7	SUAPE	Cabo de Santo Agostinho Ipojuca
8	TAPACURÁ	Camaragibe Jaboatão dos Guararapes Recife São Lourenço da Mata
9	VÁRZEA DO UNA	São Lourenço da Mata Camaragibe

Fonte: Relatórios de Produção da COMPESA (Jan. a Dez. 2013).

Onde:

- *Variável de decisão (endógena):*

$x_{ij}^t$  - determina o volume de água distribuído do sistema integrado  $i$  para o município  $j$  no mês  $t$  ( $m^3$ );

- *Parâmetros (variáveis de exógenas):*

$i = 1, 2, \dots, 9$  - sistemas integrados que abastecem a RMR (apresentados na Tabela 3);

$j = 1, 2, \dots, 10$  - municípios da RMR atendidos por sistemas integrados de abastecimento de água (conforme Tabela 3);

$t = 1, 2, \dots, 12$  ó meses do ano;

$pe_i^t$  ó preço da energia elétrica por unidade de água produzida no sistema integrado  $i$  no mês  $t$  ( $R\$/m^3$ );

$pt_i^t$  ó preço do tratamento por unidade de água produzida no sistema integrado  $i$  no mês  $t$  ( $R\$/m^3$ );

$S_i$  - volume máximo da produção do sistema integrado  $i$  por mês ( $m^3/mês$ );

$D_{jt}^{\square}$  - volume mínimo de água que deve ser distribuída para o município  $j$  no mês  $t$  ( $m^3/mês$ );

$v_{ij}$  - volume máximo de água que o sistema integrado  $i$  é capaz de distribuir para o município  $j$  por mês ( $m^3$ ) em virtude da rede adutora instalada (tubulação).

Para solução do problema foi utilizado o GAMS (*General Algebraic Modelling System*), um *software*, desenvolvido na década de 80, para a solução de problemas de programação matemática. O *software* facilita a análise e a entrada de dados, e se constitui numa linguagem de programação de alto nível pela qual é possível a resolução de problemas de larga e reduzidas escalas. Permite que alterações no modelo sejam feitas de maneira simples e segura, impede que sejam estabelecidas relações algébricas ambíguas além de possibilitar que a descrição do modelo seja independente do algoritmo de resolução (Brooke *et al.*, 1998).

#### **4.1.1 Parâmetros do caso da região metropolitana do Recife**

Os parâmetros utilizados no problema de otimização para o caso da região metropolitana do Recife foram obtidos ou estimados a partir de dados fornecidos pela Companhia Pernambucana de Saneamento ó COMPESA<sup>13</sup> referentes ao ano 2013. Os primeiros parâmetros apresentados a seguir são os coeficientes da função objetivo, preço da energia elétrica e preço do tratamento, que em situações reais não são constantes e variam em faixas, mas que foram assumidos assim para permitir a linearidade da função, de forma a possibilitar o uso da programação linear.

##### ***4.1.1.1 Preço da energia elétrica***

Para o cálculo do preço da energia elétrica por unidade de água produzida no sistema integrado  $i$  no mês  $t$ ,  $pe_i^{\square}$  ( $R\$/m^3$ ), foram utilizados dados fornecidos pela Coordenação de Eficiência Energética da COMPESA sobre valor mensal das faturas de energia de cada unidade consumidora (estação elevatória de água tratada, estação elevatória de água bruta, estação de tratamento, reservatórios de água tratada e *booster*) que compõe os sistemas integrados que

---

<sup>13</sup> Dados cedidos gentilmente pelas seguintes unidades da COMPESA: Superintendência de Manutenção e Produção, Gerência de Controle Operacional, suas coordenações de Eficiência Energética e de Controle Operacional, além da Gerência de Informações Operacionais e Coordenação de Tratamento.

abastecem a RMR. Agregadas as faturas mensais das unidades consumidoras<sup>14</sup> que compõem cada sistema, o valor dessa soma foi dividido pelo volume produzido no mês de referência, obtido no Quadro de Acompanhamento de Volume Produzido/Distribuído pelas Localidades - Gerências Metropolitana que integra os Relatórios de Produção da COMPESA mensais, elaborados pela Gerência de Informações Operacionais da COMPESA. Na Tabela 4 é apresentado o preço da energia elétrica mensal por m<sup>3</sup> de cada sistema integrado estimado dessa forma.

**Tabela 4 - Preço médio da energia elétrica por sistema integrado (R\$/m<sup>3</sup>)**

Mês/ Sistema	Alto do Céu	Botafogo	Caixa D'Água	Gurjaú	Marcos Freire	Pirapama	Suape	Tapacurá	Várzea do Una
<b>Jan-13</b>	0,17	0,20	0,25	0,08	0,12	0,07	0,32	0,08	0,07
<b>Fev-13</b>	0,13	0,17	0,22	0,20	0,16	0,05	0,26	0,08	0,07
<b>Mar-13</b>	0,10	0,15	0,20	0,09	0,11	0,05	0,20	0,07	0,07
<b>Abr-13</b>	0,11	0,18	0,22	0,08	0,12	0,05	0,18	0,08	0,08
<b>Mai-13</b>	0,12	0,17	0,22	0,09	0,10	0,05	0,17	0,08	0,08
<b>Jun-13</b>	0,14	0,16	0,18	0,06	0,13	0,07	0,07	0,08	0,08
<b>Jul-13</b>	0,17	0,16	0,18	0,04	0,15	0,06	0,05	0,08	0,06
<b>Ago-13</b>	0,12	0,17	0,21	0,04	0,14	0,06	0,05	0,08	0,06
<b>Set-13</b>	0,13	0,17	0,20	0,05	0,14	0,05	0,05	0,08	0,06
<b>Out-13</b>	0,12	0,17	0,19	0,05	0,09	0,05	0,06	0,09	0,06
<b>Nov-13</b>	0,14	0,17	0,16	0,05	0,10	0,06	0,09	0,09	0,06
<b>Dez-13</b>	0,13	0,16	0,17	0,04	0,10	0,06	0,13	0,09	0,06
<b>MÉDIA</b>	<b>0,13</b>	<b>0,17</b>	<b>0,20</b>	<b>0,07</b>	<b>0,12</b>	<b>0,06</b>	<b>0,13</b>	<b>0,08</b>	<b>0,07</b>

Fonte: Estimado pelo autor a partir de dados fornecidos pela Gerência de Controle Operacional da COMPESA e dos Relatórios de Produção da COMPESA (Jan. a Dez. 2013).

A partir da tabela acima nota-se grande variação entre os meses de 2013 no custo de Suape, com altos valores especialmente nos primeiros cinco meses do ano. Além disso, temos que, em termos de custo de energia elétrica, os sistemas Caixa D'Água e Botafogo são, em média, os mais caros, enquanto Pirapama e Várzea do Una os mais baratos nesse sentido. De acordo com a Coordenação de Eficiência Energética da COMPESA, em uma apresentação realizada em novembro de 2013, o baixo custo de energia elétrica de Pirapama pode ser

<sup>14</sup> Algumas unidades consumidoras, principalmente estações elevatórias e estações de tratamento, são compartilhadas por mais de um sistema integrado e por isso as faturas correspondentes foram divididas proporcionalmente de acordo com o volume de água que recebe de cada sistema, de acordo com informações obtidas junto à Coordenação de Controle Operacional da COMPESA.

explicado pelos seguintes fatores: opera com motores de alto rendimento, em virtude do desnível da barragem, permitindo que a energia potencial da barragem seja aproveitada diretamente no sistema de bombeamento e garante o aproveitamento do desnível geométrico com a ausência do poço de sucção, além disso, ela possui um inversor de frequência, que provoca uma economia no consumo de energia de aproximadamente 25%.

Cabe aqui destacar que um dos fatores que explica a variação no preço da energia elétrica de cada sistema e em cada mês é o tipo de tarifa de energia elétrica aplicada em cada unidade de consumo que varia dependendo do tipo de consumo, conforme os dados disponibilizados pela COMPESA sobre consumo e faturas de energia elétrica. O que também está relacionado, principalmente, com o tipo e capacidade das bombas instaladas nas estações elevatórias e estações de tratamento.

Para se definir a tarifa da unidade consumidora é preciso que ela se enquadre em uma estrutura tarifária e em uma modalidade tarifária. Segundo o manual *Noções Básicas de Tarificação de Energia Elétrica* (COMPESA, 2008), a estrutura tarifária é o conjunto de tarifas aplicáveis às componentes de consumo e/ou demanda de energia elétrica. Esta estrutura é composta por dois cenários. No primeiro cenário, a tarifa é conhecida como monômnia. Nesta tarifa, cobra-se, apenas, pelo consumo de energia elétrica (kWh). No segundo cenário, encontra-se a tarifa binômnia. Na tarifa binômnia, a cobrança incide no consumo (kWh) e na demanda de energia elétrica (kW). Já a modalidade tarifária para as unidades consumidoras classificadas no grupo B, unidades de pequeno porte, há apenas uma opção tarifária: a Tarifa Baixa Tensão Convencional - BTC. Enquanto isso, para as unidades consumidoras do grupo A, clientes de médio e grande porte, a depender de condições técnicas, conforme prescreve a Resolução ANEEL nº 456/2000, poderão ser enquadrados na Tarificação Convencional: Alta Tensão Convencional - ATC ou na Tarificação Horo-Sazonal, a qual é subdividida nas tarifas Horo-Sazonal Azul - THA e Horo-Sazonal Verde - THV.

Na tarifa BTC, o valor a ser faturado no mês é o produto do total do consumo medido, em kWh, pela tarifa de consumo aplicável, em R\$ / kWh. Na tarifa ATC, exige-se um contrato específico, o Contrato de Fornecimento de Energia ou CFE, com a concessionária no qual se pactua um valor de demanda. Nesta modalidade, as tarifas de demanda e de consumo

independem da hora do dia (horário de ponta ou fora de ponta) ou do período do ano (período seco ou úmido). Na tarifa ATC, o valor a ser faturado no mês é composto por duas parcelas: uma contribuição do consumo e outra contribuição devido à demanda (COMPESA, 2008).

Na modalidade THV, exige-se também o CFE (Contrato de Fornecimento de Energia) com a concessionária no qual se pactua um valor de demanda. A tarifa de demanda independe da hora do dia ou do período do ano. Porém, no tocante ao consumo, as tarifas dependem tanto da hora de utilização no dia como do período do ano. É importante frisar que a tarifa de consumo no horário de ponta é da ordem de sete vezes maior do que a tarifa de consumo no horário fora de ponta. Quanto à sazonalidade, as tarifas de consumo são mais caras no período seco do que no período úmido. A cobrança na tarifa THV também é composta por duas parcelas: uma devido à contribuição do consumo (horário de ponta e horário fora de ponta) e outra por conta da demanda (COMPESA, 2008).

Na modalidade THA, exige-se o CFE (Contrato de Fornecimento de Energia) com a concessionária no qual se pactuam dois valores de demanda. Contrata-se uma demanda para o horário de ponta e outra para o horário fora de ponta. Ou seja, há uma diferenciação, no valor de demanda, conforme horário de utilização no dia. No tocante ao consumo, há uma diferenciação na cobrança que leva em consideração tanto o horário de utilização no dia como o período do ano. É importante salientar que a tarifa de consumo no horário de ponta é um pouco maior do que a tarifa de consumo no horário fora de ponta. Quanto à sazonalidade, as tarifas de consumo também são mais caras no período seco do que no período úmido. O valor a ser faturado no mês, na modalidade THA, é composto por duas parcelas: uma contribuição do consumo (horário de ponta e fora de ponta) e outra contribuição da demanda (horário de ponta e fora de ponta) (COMPESA, 2008).

#### ***4.1.1.2 Preço do tratamento***

O preço de tratamento por unidade de água produzida no sistema integrado  $i$  no mês  $t$ ,  $pt_i^t$  (R\$/m<sup>3</sup>), corresponde ao Índice de Consumo de Produto Químico ó ICPQ (R\$/m<sup>3</sup>) utilizado na COMPESA para acompanhamento dessa despesa por cada estação de tratamento e disponibilizado através da Coordenação de Tratamento da Companhia, que varia de acordo com a qualidade da água captada que será tratada. Calculado pela empresa através da divisão da soma

das despesas com produtos químicos consumidos por cada sistema, dividida pelo volume produzido por ele no mês. Os principais produtos químicos utilizados pela empresa para o tratamento da água são o sulfato e o cloro, que são destacados no relatório Sistema de Informações Operacionais - SIP, divulgados mensalmente internamente na COMPESA.

Na Tabela 5 é apresentado o ICPQ ou o preço de tratamento dos sistemas integrados da RMR utilizado na otimização, onde é possível observar que, na média do ano, os sistemas Várzea do Una, Tapacurá, Marcos Freire, Suape e Gurjaú são os que têm o m<sup>3</sup> mais caro em termos de tratamento. Enquanto isso, Pirapama pertence ao grupo de menor custo, ficando atrás apenas de Alto do Céu, que é um sistema bem diferente dele, já que é de menor porte (produz em média 25% do que Pirapama por mês) e seus mananciais são apenas rios, enquanto Pirapama capta apenas em sua barragem de mesmo nome.

**Tabela 5 - Preço de tratamento (R\$/m<sup>3</sup>)**

Mês/ Sistema	Alto do Céu	Botafogo	Caixa D'água	Gurjaú	Marcos Freire*	Pirapama	Suape	Tapacurá	Várzea do Una
Jan-13	0,03	0,04	0,04	0,08	0,10	0,04	0,11	0,06	0,09
Fev-13	0,02	0,04	0,04	0,15	0,10	0,06	0,14	0,06	0,11
Mar-13	0,02	0,03	0,04	0,07	0,10	0,04	0,06	0,07	0,17
Abr-13	0,03	0,03	0,05	0,07	0,10	0,06	0,06	0,08	0,17
Mai-13	0,03	0,04	0,05	0,13	0,10	0,07	0,10	0,09	0,14
Jun-13	0,05	0,06	0,06	0,10	0,10	0,08	0,07	0,14	0,16
Jul-13	0,05	0,05	0,05	0,06	0,10	0,06	0,07	0,12	0,13
Ago-13	0,04	0,04	0,04	0,07	0,10	0,05	0,10	0,13	0,12
Set-13	0,04	0,06	0,07	0,07	0,10	0,04	0,08	0,13	0,14
Out-13	0,03	0,07	0,06	0,08	0,10	0,04	0,09	0,12	0,12
Nov-13	0,04	0,07	0,04	0,08	0,10	0,05	0,07	0,12	0,11
Dez-13	0,04	0,05	0,05	0,06	0,10	0,06	0,09	0,11	0,11
<b>MÉDIA</b>	<b>0,03</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,09</b>	<b>0,10</b>	<b>0,05</b>	<b>0,09</b>	<b>0,10</b>	<b>0,13</b>

Fonte: ICPQ - Coordenação de Tratamento/COMPESA.

Nota: \*O ICPQ do sistema Marcos Freire foi informado por e-mail em 04 de fevereiro de 2014 pelo Coordenador de Tratamento da COMPESA como sendo o valor médio de 2013, tendo em vista que a empresa não acompanha regularmente esse sistema, por isso o valor constante.

Sobre a qualidade da água captada por esses sistemas, o que está diretamente relacionado com o ICPQ, vamos destacar a do sistema Tapacurá, que tem como principal manancial a barragem de mesmo nome, que pelo menos desde 2012 é classificada como hipereutrófica em

relação ao seu índice de estado trófico (IET<sup>15</sup>), segundo a APAC (2014), a pior classificação nesse índice, o que significa que o corpo d'água está afetado significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios de florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas (Lamparelli, 2004).

De acordo com Braga et al (2010), a barragem Tapacurá tem sofrido com as frequentes florações de cianobactérias, que pela sua toxicidade ao morrer, acarretam dificuldades ao sistema de tratamento e distribuição da água para consumo, operado pela Companhia Pernambucana de Saneamento ó COMPESA. As principais atividades potencialmente poluidoras da bacia do rio Tapacurá são os esgotos domésticos, os matadouros, as casas de farinha, os agrotóxicos e os resíduos sólidos, situadas à montante do seu reservatório, ou seja, em Pombos e Vitória de Santo Antão, e que acabam contribuindo para o processo de eutrofização da barragem do Tapacurá.

As demais barragens que abastecem os sistemas integrados da RMR foram classificadas em 2013 pela APAC como mesotróficos (APAC, 2014), o que significa que são corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos (Lamparelli, 2004).

#### ***4.1.1.3 Parâmetros das restrições de desigualdade***

As restrições de desigualdade incorporam ao modelo questões de disponibilidade hídrica e características da infraestrutura física instalada dos sistemas integrados de abastecimento da RMR, bem como sobre os municípios atendidos.

Na primeira equação das restrições (4.2) foi integrada ao modelo informação sobre a capacidade máxima de produção mensal dos sistemas integrados de abastecimento (m<sup>3</sup>/mês), considerada como o volume máximo mensal produzido no ano 2013, apresentado na Tabela 6, assumida a hipótese de que em todos os meses do ano seria possível obter esse volume. Com

---

<sup>15</sup> O Índice do Estado Trófico (IET) tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas. Os resultados do índice são calculados a partir dos valores de fósforo e devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo (Lamparelli, 2004).

essa hipótese o modelo trabalha com a possibilidade dos sistemas integrados chegarem a produzir mensalmente 28.928.199 m<sup>3</sup> de água tratada, acima da demanda atendida pela COMPESA em 2013 e que é considerada no modelo através da equação 4.3, conforme pode ser visualizado na Tabela 7.

**Tabela 6 - Capacidade máxima de produção mensal (S<sub>i</sub>)**

N.	Sistema integrado	Volume máximo (m <sup>3</sup> )
1	ALTO DO CÉU	2.334.853
2	BOTAFOGO	3.659.800
3	CAIXA D'ÁGUA	435.855
4	GURJAÚ/MATAPAGIPE	2.440.552
5	MARCOS FREIRE	250.926
6	PIRAPAMA	9.584.649
7	SUAPE	1.252.272
8	TAPACURÁ	8.128.299
9	VÁRZEA DO UNA	840.993

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos Relatórios de Produção da COMPESA (Jan/2013 a Dez/2013).

A partir da Tabela 6 temos que os sistemas Pirapama e Tapacurá, os dois maiores da RMR, juntos são responsáveis por 61% da capacidade de produção de água para a RMR. Já os sistemas Caixa D'água e Marcos Freire são os de menor porte.

O volume de água mínimo a ser distribuído mensalmente por sistemas integrados a cada município da RMR foi inserido no modelo através da restrição da equação 4.3, onde foi utilizado como referência o volume de água distribuído para cada município em cada mês do ano 2013 em que a origem era de sistemas integrados, plotados na Figura 5. Dessa forma, manteve-se implícito no modelo o abastecimento de água de cada município por sistemas isolados, necessário para se chegar ao volume total destinado aos municípios da RMR ao longo de 2013. Destaca-se que esse volume distribuído não é a demanda, uma vez que os municípios da RMR sofreram com racionamento de água em 2013, conforme Relatórios de População Abastecida sem Rodízio e Quadros da Situação Atual de Abastecimento desse ano. Assim, esse volume distribuído poderia ser entendido apenas como a parcela da demanda que é atendida.

Com essa restrição a solução ótima precisa pelo menos garantir o mesmo abastecimento realizado pela COMPESA em 2013, que tem o volume total mensal distribuído para a RMR

disponibilizado na Tabela 7 e, como o modelo busca minimizar o custo, os resultados na solução ótima não se desviaram desses valores, como era de se esperar, demonstrando que a capacidade mensal máxima de abastecimento por sistemas integrados da RMR, apresentada acima de acordo com as hipóteses assumidas no modelo sobre o parâmetro  $S_i$ , não seria atingida em nenhum período do ano, como não foi nos resultados da otimização apresentados no capítulo 4 adiante. Destaca-se que o volume indicado no parâmetro ( $Q_{\frac{Q}{Q}}$ ), apresentado na Tabela 7, abrange o consumo medido e as perdas<sup>16</sup> de água do sistema.

**Tabela 7 - Volume mínimo distribuído mensalmente por sistemas integrados**

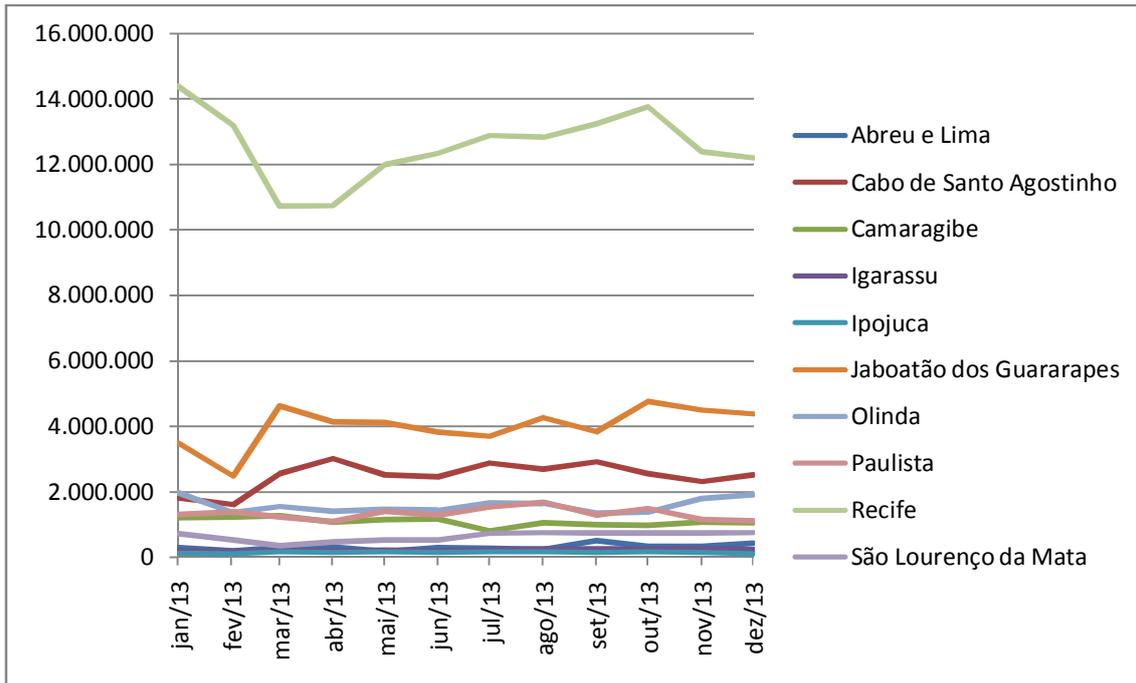
<b>Mês</b>	<b>Volume (m3)</b>
<b>Jan-13</b>	25.556.058
<b>Fev-13</b>	22.270.572
<b>Mar-13</b>	22.961.357
<b>Abr-13</b>	22.585.648
<b>Mai-13</b>	23.729.762
<b>Jun-13</b>	23.710.287
<b>Jul-13</b>	24.875.748
<b>Ago-13</b>	25.594.239
<b>Set-13</b>	25.303.079
<b>Out-13</b>	26.453.996
<b>Nov-13</b>	24.764.543
<b>Dez-13</b>	24.699.736

Fonte: Relatórios de Produção da COMPESA (Jan. a Dez. 2013).

Observa-se, a partir da Figura 5, que Recife e Jaboatão dos Guararapes apresentaram maior volume de água tratada recebido desses sistemas, seguidos pelo Cabo de Santo Agostinho, que apesar de ter uma população menor do que Olinda e Paulista demanda grande volume de água tratada em virtude das indústrias instaladas no Complexo Industrial de Suape, que tem parte abrangido por esse município. Além disso, os meses de máximo e mínimo de distribuição por município varia de um para outro.

---

<sup>16</sup> A média do Índice de Perdas de Água da Região Metropolitana do Recife no ano 2013 foi de aproximadamente 60% (COMPESA 2013).



**Figura 5 - Volume mensal de água distribuída por sistemas integrados para os municípios da RMR (D)**

A última restrição de desigualdade (equação 4.4) se refere ao limite da variável de decisão em relação à infraestrutura instalada, indicando o volume máximo de água que a rede adutora atual, que liga os sistemas integrados aos pontos de distribuição nos municípios da RMR, é capaz de suportar por mês. Os limites de cada sistema para cada município utilizados no modelo são apresentados na Tabela 8 a seguir e foram estimados a partir da análise das alocações ao longo do ano 2013, sendo considerado como máximo suportado pela rede adutora o máximo realizado/distribuído no referido ano, pois para obter essa informação a COMPESA teria que consultar todos os projetos de toda a rede adutora da RMR e, além disso, os técnicos da empresa também informaram que esse parâmetro nunca foi um fator limitante diante da disponibilidade hídrica dos mananciais.

**Tabela 8 - Volume máximo mensal distribuído pelos sistemas integrados para cada município em virtude da rede adutora instalada ( $v_{ij}$ )**

N.	Sistema integrado	Município	Volume máximo (m <sup>3</sup> )
1	ALTO DO CÉU	Olinda	129.326
		Recife	2.242.729
2	BOTAFOGO	Abreu e Lima	505.034
		Igarassu	284.255
		Olinda	1.860.559
		Paulista	1.685.912
3	CAIXA D'ÁGUA	Recife	404.120
		Olinda	269.935
4	GURJAÚ	Cabo de Santo Agostinho	500.903
		Jaboatão dos Guararapes	2.034.769
5	MARCOS FREIRE	Recife	219.055
		Jaboatão dos Guararapes	111.392
6	PIRAPAMA	Recife	6.063.112
		Cabo de Santo Agostinho	1.574.204
		Jaboatão dos Guararapes	3.630.483
7	SUAPE	Cabo de Santo Agostinho	1.086.474
		Ipojuca	173.277
8	TAPACURÁ	Camaragibe	1.170.186
		Jaboatão dos Guararapes	753.953
		Recife	6.402.963
		São Lourenço da Mata	32.068
9	VÁRZEA DO UNA	São Lourenço da Mata	751.880
		Camaragibe	173.679

Fonte: Elaborado pelo próprio autor a partir de dados dos Relatórios de Produção da COMPESA (Jan. a Dez. 2013).

A partir dessa tabela observa-se que as tubulações de maior capacidade são as do sistema Pirapama, o maior sistema produtor do estado de Pernambuco e o mais novo também, que teve suas obras concluídas em 2011.

#### **4.1.2 Análise de sensibilidade ó custo reduzido, custo de oportunidade e preço-sombra**

Um método para lidar com as incertezas envolvidas nos parâmetros de um problema de programação linear (PPL) é a Análise de Sensibilidade ou de Pós-Otimização. O termo

sensibilidade reflete o efeito sobre a solução ótima, decorrente de pequenas variações nos parâmetros da função-objetivo e das restrições. O termo Pós-Otimização indica que, após obter a solução ótima do PPL, desejamos avaliar o impacto da alteração em algum parâmetro sobre esta solução (Lins e Calôba, 2006).

Conforme Colin (2007), ela é fundamental quando o tomador de decisão está interessado em avaliar como mudanças no modelo (e no mundo real que ele representa) podem afetar a solução. Destacam ainda, Lins e Calôba (2006), que a utilidade prática deste tipo de análise pode se dar devido às seguintes situações:

- No planejamento a longo prazo, por exemplo, pode ser interessante verificar o quanto determinados parâmetros podem variar sem alterar a solução ótima encontrada;
- Novos requisitos, visando a melhor formulação do PPL, podem implicar em acréscimo de uma nova restrição e/ou variável, assim como alterações em parâmetros.

No presente estudo as seguintes alternativas de análise de sensibilidade serão abordadas, considerando a linearidade no longo prazo: alterações nos coeficientes da função-objetivo, que permitem a verificação do custo de oportunidade de variáveis, e alterações no lado direito de restrições, que possibilitam a obtenção do preço-sombra (*shadow price*) de restrições.

O preço-sombra e o custo de oportunidade são dois resultados com importante interpretação econômica em pós-otimização.

O preço-sombra é o benefício encontrado na função-objetivo quando se acrescenta uma unidade ao recurso escasso (Lins e Calôba, 2006), ele representa a alteração resultante no valor da função-objetivo devido ao incremento de uma unidade na constante de uma restrição, assumindo que todos os outros coeficientes e constantes permaneçam inalterados (Lachtermacher, 2007).

Contudo, quando a restrição é inativa, ou seja, há folga entre o valor ótimo da restrição em relação ao limite apresentado, o preço-sombra é zero, ou seja, o aumento de uma unidade de recurso não agrega nenhum benefício à solução. Sendo assim, o preço-sombra indica a alteração

da função objetivo decorrente da variação em uma unidade no parâmetro do lado direito da restrição que se apresenta como ativa<sup>17</sup>, ou limitante, na solução ótima.

No relatório de saída do GAMS o preço sombra pode ser identificado como o valor marginal da equação de restrição e seu sinal indica se o efeito sobre a função-objetivo é positivo ou negativo. Foram analisados os preços-sombra da restrição de distribuição mínima de água por sistemas integrados para cada município da RMR (equação 4.3), que apresentam o aumento no custo anual da COMPESA caso seja necessário o aumento de 1 m<sup>3</sup> no volume de água a ser distribuído para um determinado município, e da restrição de capacidade máxima de produção mensal dos sistemas integrados de abastecimento (equação 4.2), que indica em quanto é diminuído o valor da função-objetivo diante do aumento em uma unidade (1 m<sup>3</sup>) na capacidade de produção mensal de um sistema integrado.

A partir da análise do relatório de saída do GAMS também é possível identificar o valor do custo reduzido e, conseqüentemente, o custo de oportunidade. Conforme definido por Colin (2007), para uma variável não-básica (cujo valor é zero), o custo reduzido é a quantidade pela qual o valor do coeficiente da função-objetivo precisa ser melhorado para que a variável passe a ser básica (tenha um valor diferente de zero) na solução ótima<sup>18</sup>. O custo reduzido também pode ser interpretado como a diferença entre o custo real e o custo de oportunidade (Lins e Calôba, 2006), a partir do qual, no presente estudo, o sistema integrado passa a distribuir água para determinado município na solução ótima. Os autores destacam que o custo de oportunidade representa o maior custo admissível, que ainda compensa operar um dado processo na solução ótima, ou o menor lucro que ainda justifica a produção de determinado produto. É, portanto, uma referência para a análise dos coeficientes da função-objetivo.

No GAMS é possível observar o custo reduzido, dos sistemas que na solução ótima não alocam água para determinados municípios em alguns meses, na coluna do valor marginal da seção do seu relatório de saída que apresenta o valor ótimo das variáveis de decisão. Tem-se assim um importante resultado do modelo desenvolvido: quanto deve reduzir o custo mensal

---

<sup>17</sup> Uma restrição  $g(x)$  é ativa em um candidato a solução  $x^*$  se  $g(x^*) = b$ . Se  $g(x^*) < b$ , dizemos que a restrição é inativa em  $x^*$  (Simon e Blume, 2004).

<sup>18</sup> A definição considera que não haja nenhuma outra alteração nas variáveis e parâmetros da solução ótima (Colin, 2007).

(R\$/m<sup>3</sup>) dos sistemas que na solução ótima não alocam água para alguns municípios em certos períodos para que a alocação passe a ser não nula na solução ótima. Assim, subtraindo o custo reduzido do custo real é possível obtermos o custo de oportunidade do sistema integrado.

#### **4.1.3 Estimando o valor da qualidade da água**

De acordo com Motta (2006), o valor econômico ou o custo de oportunidade dos recursos ambientais, como a qualidade da água, normalmente não é observado no mercado por intermédio do sistema de preços, mas, no entanto, como os demais bens e serviços presentes no mercado, seu valor econômico deriva de seus atributos, com a peculiaridade de que estes atributos podem ou não estar associados a um uso. Assim, o valor econômico dos recursos ambientais pode ser desagregado em valor de uso e valor de não-uso, este último também aparece na literatura como valor de existência.

Segundo o autor, os valores de uso, por sua vez, podem ser decompostos em valor de uso direto (valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental pelo fato de que dele se utilizam diretamente, por exemplo, na forma de extração, de visitação, ou outra atividade de produção ou consumo direto), valor de uso indireto (valor que os indivíduos atribuem a um recurso ambiental quando o benefício do seu uso deriva de funções ecossistêmicas, como, por exemplo, a contenção de erosão e reprodução de espécies marinhas pela conservação de florestas de mangue) e valor de opção (valor que o indivíduo atribui em preservar recursos que podem estar ameaçados, para usos direto e indireto no futuro próximo).

Já o valor de não-uso ou valor de existência é o valor que está dissociado do uso (embora represente consumo ambiental) e deriva de uma posição moral, cultural, ética ou altruística em relação aos direitos de existência de outras espécies que não a humana ou de outras riquezas naturais, mesmo que estas não representem uso atual ou futuro para ninguém (MOTTA, 2006).

Esses valores podem ser estimados pelos métodos de valoração econômica do meio ambiente, que são capazes de captar as distintas parcelas de valor econômico do recurso ambiental citadas acima.

A plataforma ora desenvolvida e apresentada acima propõe uma forma de estimar o valor de uso direto da qualidade da água dos principais sistemas integrados do estado, Pirapama e

Tapacurá, além de identificar a distribuição ótima de água dos sistemas integrados para os municípios da RMR. Para isso foi assumida a fundamentação teórica do método dos custos evitados, definido anteriormente, no capítulo 2, denominado por Boardman *et al* (2011) como método de despesas defensivas, que representam o montante gasto para mitigar ou mesmo eliminar o efeito de uma externalidade negativa.

Os autores citam o método como pertencente à ampla classe dos métodos da função de produção, uma vez que nesses métodos o nível de um bem público ou externalidade (por exemplo, poluição) e outros bens são insumos para algum processo produtivo. Se o nível do bem público ou da externalidade varia, então o nível de outros insumos pode ser modificado na direção oposta e ainda permite que a quantidade do bem produzido permaneça a mesma. Por exemplo, no caso da água tratada fornecida para abastecimento urbano, quando a externalidade negativa de poluição é reduzida, menos produto químico é requerido para produzir o mesmo volume de água tratada. A mudança nas despesas com os insumos substitutos (produtos químicos) é usada como medida do benefício da redução do bem público ou externalidade.

Primeiramente foi executada no *software* GAMS a otimização do problema sob as condições atuais de qualidade da água, colocadas no modelo através do custo de tratamento da água, assumido como o valor das despesas com produtos químicos por m<sup>3</sup> de água tratada, que varia de um sistema para o outro. Com isso um dos resultados foi o valor da função objetivo, ou seja, o custo (energia elétrica + tratamento) da COMPESA com sistemas integrados para abastecer a região metropolitana do Recife.

Para estimar o valor anual da qualidade da água captada pelo sistema Tapacurá para tratamento foi assumida a hipótese de que houve uma melhora na qualidade da água, incorporada ao modelo através da redução nos seus custos de tratamento, que passaram a ser os mesmos do sistema Pirapama, que tem o mesmo porte dele, capta água de barragem, mas que não enfrenta problemas com qualidade da água como o que tem ocorrido na barragem Tapacurá, essa última classificada como hipereutrófica, sendo a única barragem que atende à RMR com essa classificação de acordo com o Índice de Estado Trófico - IET<sup>19</sup>, e Pirapama foi classificada como

---

<sup>19</sup> O Índice do Estado Trófico (IET) tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento

mesotrófica<sup>20</sup>, segundo a APAC (2014).

Assim, foram modificados no modelo os parâmetros do preço do tratamento, onde assumimos que  $pt_{\text{Tapacurá}}^{\text{R}} = pt_{\text{Pirapama}}^{\text{R}}$ . Pode ser observado na Tabela 5 que em média o preço de tratamento por m<sup>3</sup> de Tapacurá é R\$ 0,05 maior que o de Pirapama. A partir daí, o valor da função objetivo obtido nessa simulação foi comparado ao da otimização anterior. A diferença é o custo que a COMPESA evitaria, em uma situação ótima, caso a qualidade da água dos mananciais do sistema Tapacurá fosse melhorada ao nível de Pirapama, entendido como o valor de uso da qualidade da água do sistema Tapacurá de acordo com o método dos custos evitados.

Da mesma forma foi feita a simulação para se encontrar o valor da qualidade da água do sistema Pirapama, contudo modificando os parâmetros de preço de tratamento do sistema Pirapama decorrente de uma piora na sua qualidade da água, assumindo os mesmos preços de tratamento do sistema Tapacurá ( $pt_{\text{Pirapama}}^{\text{R}} = pt_{\text{Tapacurá}}^{\text{R}}$ ).

A comparação do valor da função objetivo resultante das simulações foi feita com o ótimo da situação atual e não com o realizado pela COMPESA, de forma a isolar a variação nos custos decorrentes da variação na qualidade da água do efeito da otimização.

---

excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas. Os resultados do índice são calculados a partir dos valores de fósforo e devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo (Lamparelli, 2004).

<sup>20</sup> Mesotrófico significa que são corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos (Lamparelli, 2004).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo serão apresentados e discutidos todos os resultados obtidos a partir da plataforma de otimização desenvolvida para simular o abastecimento de água da região metropolitana do Recife, a partir de sistemas integrados de abastecimento de água, visando minimizar os custos de energia elétrica e produtos químicos (utilizados para tratamento da água) para diferentes cenários.

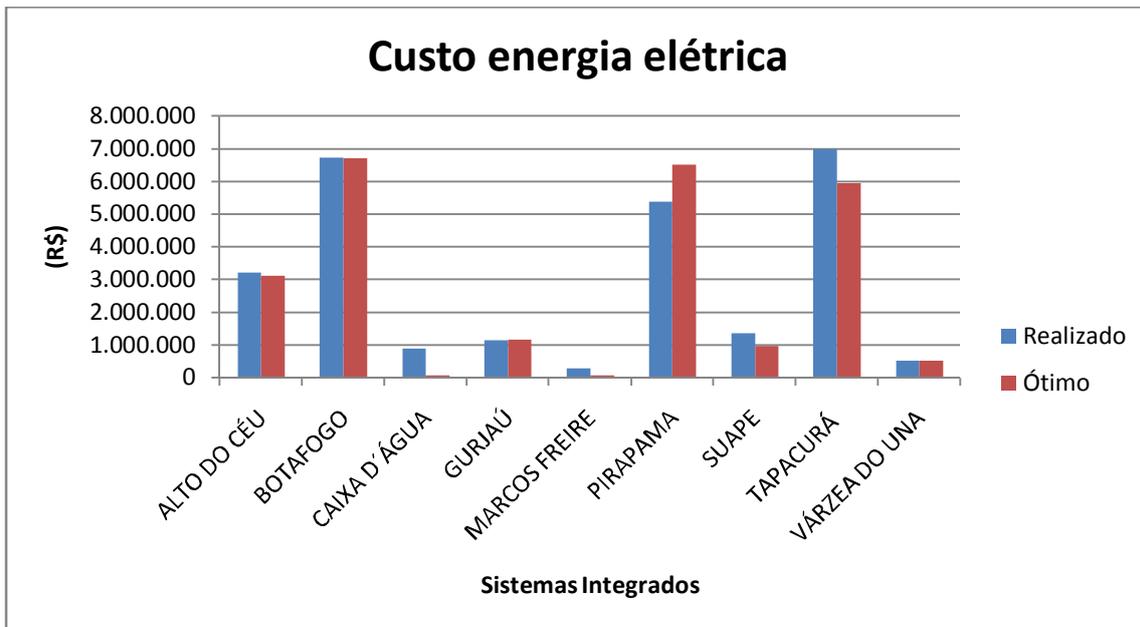
O primeiro cenário considera as condições de disponibilidade e qualidade da água do ano 2013, definido como ano típico de pouca disponibilidade hídrica na região de estudo. O segundo simula uma melhora na qualidade da água captada pelo Sistema Tapacurá, enquanto no terceiro cenário é assumida uma piora na qualidade da água bruta do Sistema Pirapama e, para finalizar, o cenário 4, que considera o custo de oportunidade do Sistema Tapacurá. Esses resultados determinam o volume ótimo de água a ser distribuído pelos sistemas integrados para os municípios da RMR, abrangendo o consumo medido (ou volume consumido) e as perdas de água do sistema.

### **5.1 Cenário 1 - atual**

O modelo de otimização apresentado no Capítulo 4 foi executado supondo as condições de disponibilidade hídrica e de qualidade da água captada pelos sistemas integrados de abastecimento da região metropolitana do Recife com dados do ano 2013. Sob essas condições, a otimização levaria a uma redução na ordem de 4,82% (R\$ 2.276.811,34) no valor da função objetivo (custo de energia elétrica + custo de tratamento), que passou de R\$ 47.213.697,77 para R\$ 44.936.886,43 no ano, na solução ótima. Decompondo esse resultado, através da análise separada das despesas com energia elétrica e com produtos químicos (custo de tratamento), temos que a redução foi de 5,39% e 4,09% nesses custos, respectivamente.

A partir desse resultado é possível concluir que a empresa não opera no ponto ótimo e que tem um potencial de redução de seus custos de energia elétrica e de tratamento da água, diante das condições atuais modeladas. Além disso, a redução foi relativamente maior nas despesas com energia elétrica, o que pode ser explicado em virtude de em seis dos nove sistemas considerados no modelo o custo da energia por metro cúbico produzido é maior do que o de tratamento.

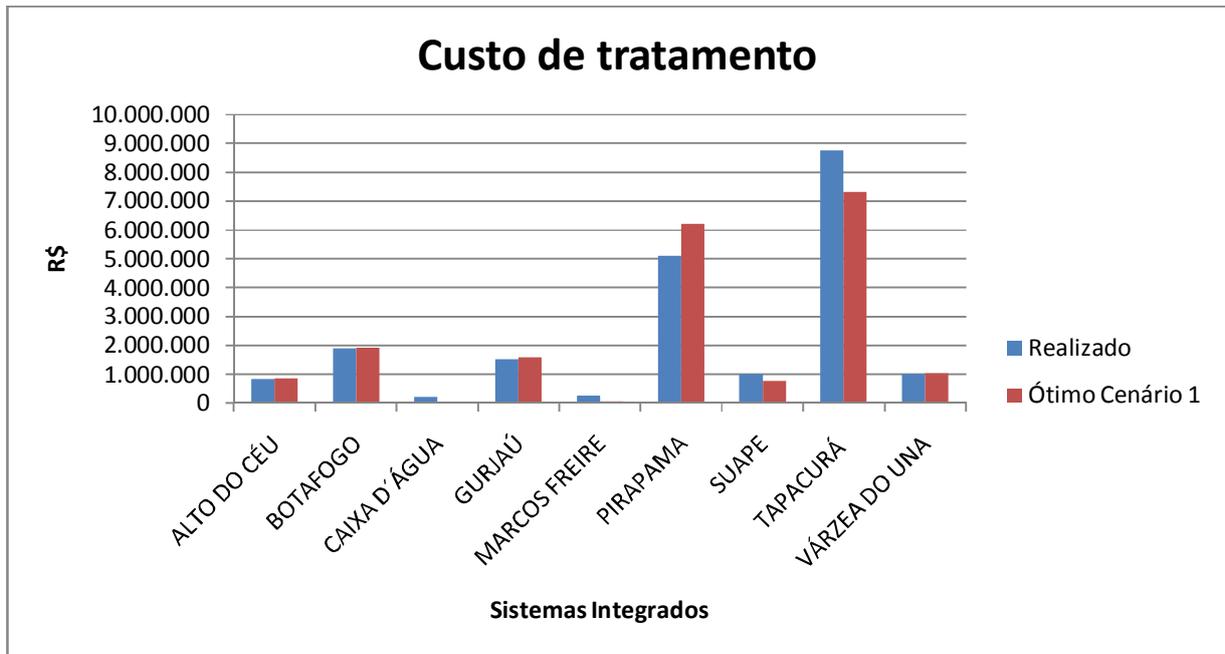
Para visualização do comportamento das despesas com energia elétrica por sistema integrado nesse cenário é apresentada a Figura 6, a partir da qual nota-se o aumento dessas despesas no sistema Pirapama, na ordem de 20,93%, e redução nos demais, exceto Gurjaú, que teve um aumento de apenas 1,06%. Contudo, as maiores reduções apresentadas pela otimização foram nos sistemas Caixa D'Água (90,95%) e Marcos Freire (77,58%), seguidos por Suape (28,03%) e Tapacurá (14,68%). Como poderá ser visto mais adiante, na solução ótima o sistema Caixa D'Água não opera por dez meses e Marcos Freire por nove, o que é explicado pelo fato desses sistemas apresentarem os maiores custos anuais por unidade produzida, sendo R\$ 2,99/m<sup>3</sup>/ano no primeiro e R\$ 2,67/m<sup>3</sup>/ano no segundo. Além disso, ambos abastecem pelo menos um município atendido por Pirapama, que teve o maior aumento de produção em relação ao realizado pela COMPESA e é o mais barato, R\$ 1,33/m<sup>3</sup>/ano.



**Figura 6 - Custo de energia elétrica anual por sistema**

Em seguida a Figura 7 com o comparativo dos custos de tratamento da água entre os sistemas integrados de abastecimento, com destaque novamente para o aumento de 21,96% nas despesas com produtos químicos do sistema Pirapama, como esperado, uma vez que um dos principais resultados desse cenário foi o aumento na produção do sistema Pirapama e, assim, um aumento no volume de água produzida implica no aumento das despesas com tratamento.

Observando-se também nos demais sistemas que tiveram aumento este não ultrapassou os 3,5%. Além disso, em consonância com a queda significativa na produção dos sistemas Caixa D'Água e Marcos Freire, a redução nesse tipo de despesa foi de 91,07% e 71,98%, respectivamente. Sendo importante ressaltar a redução de 16,57% nos custos de tratamento de Tapacurá no ano.



**Figura 7 - Custo de tratamento anual por sistema**

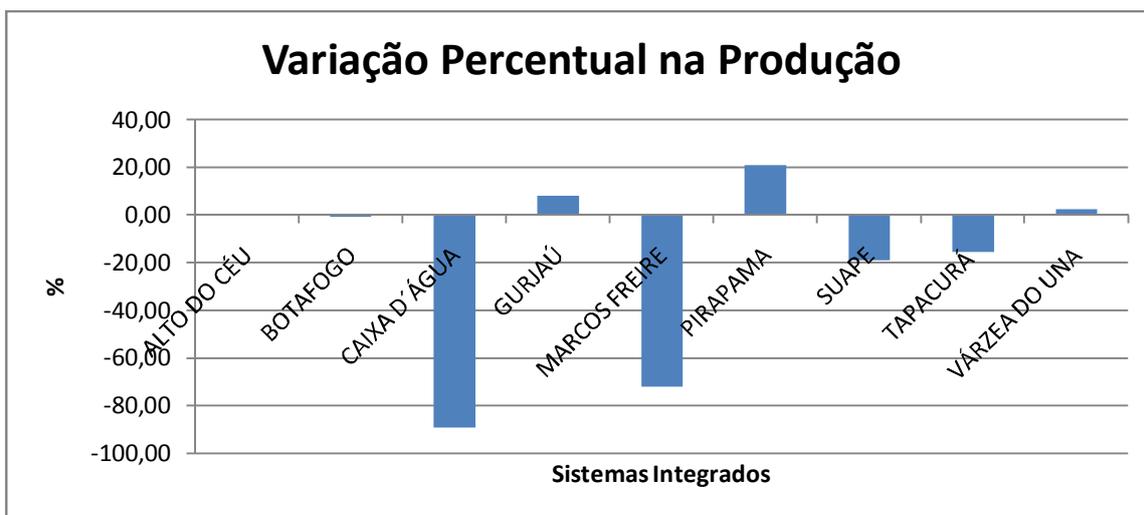
Para uma melhor compreensão desses resultados, na Tabela 9 é apresentado o custo por sistema integrado de abastecimento, considerando os custos de energia elétrica e de tratamento, comparando o ótimo com o realizado pela COMPESA no ano 2013. Destaca-se que para minimizar a função objetivo a otimização aumentou os custos do sistema Pirapama e, em proporção relativamente pequena, dos sistemas Gurjaú e Várzea do Una. Esse resultado pode ser explicado pelo fato do custo unitário (R\$/m<sup>3</sup>), média mensal e o total no ano considerado, dos sistemas Pirapama e Gurjaú serem os menores dentre todos os sistemas integrados que abastecem a região metropolitana do Recife, como pode ser verificado a partir dos dados apresentados no capítulo anterior, fornecidos pela COMPESA, e por isso, como resultado da otimização, tiveram maior aumento no volume produzido, conforme resultados de produção apresentados na Figura 8.

**Tabela 9 - Custo no ano por sistema integrado**

<b>Sistema integrado</b>	<b>Realizado* (R\$)</b>	<b>Otimizado (R\$)</b>	<b>Varição (%)</b>
<b>ALTO DO CÉU</b>	4.058.094,67	3.981.760,00	-1,88
<b>BOTAFOGO</b>	8.634.870,50	8.630.900,00	-0,05
<b>CAIXA D'ÁGUA</b>	1.106.474,95	99.886,50	-90,97
<b>GURJAÚ</b>	2.698.603,81	2.762.205,95	2,36
<b>MARCOS FREIRE</b>	567.590,19	141.672,14	-75,04
<b>PIRAPAMA</b>	10.479.609,87	12.725.760,00	21,43
<b>SUAPE</b>	2.374.159,75	1.757.582,46	-25,97
<b>TAPACURÁ</b>	15.746.273,07	13.269.400,00	-15,73
<b>VÁRZEA DO UNA</b>	1.548.020,97	1.567.926,84	1,29

Fonte: \*Elaborado pelo próprio autor a partir de dados fornecidos pela COMPESA (Gerência de Controle Operacional, Gerência de Informação Operacional e Coordenação de Tratamento).

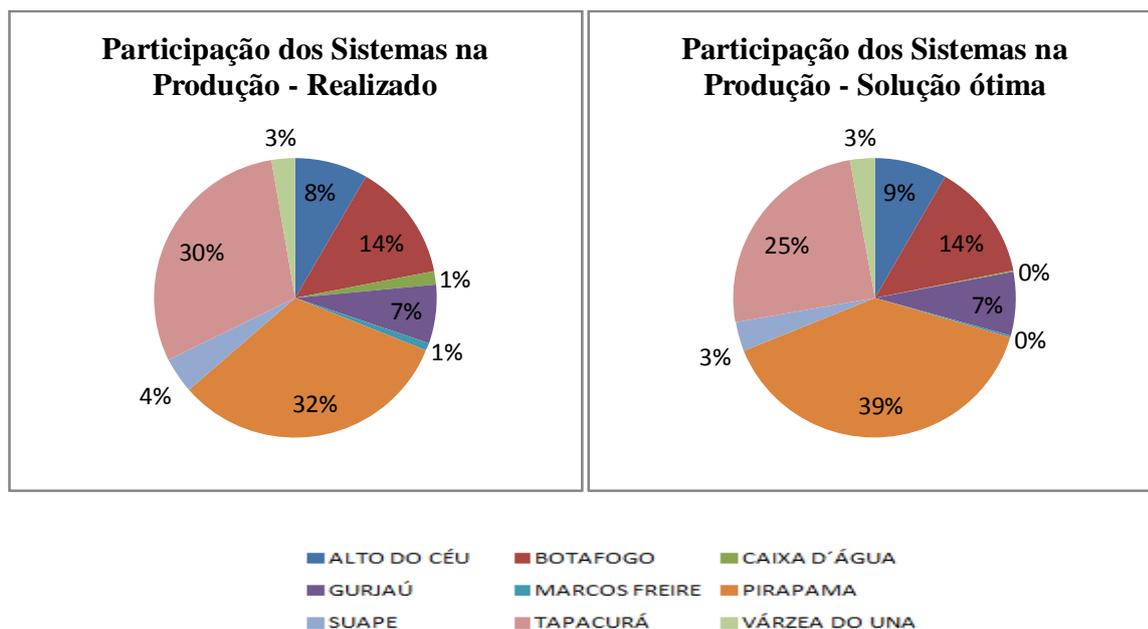
Corroborando com os resultados apresentados acima, relacionados diretamente com as alterações sugeridas pelo processo de otimização na produção de cada sistema, apresentamos na Figura 8 a variação percentual na produção de cada um em relação ao realizado, com maior aumento no volume produzido pelo sistema Pirapama (20,73%). Destacando-se, ainda, a queda abrupta na produção de Caixa D'Água (89,18%) e Marcos Freire (71,98%), além das reduções nos sistemas Suape (18,97%) e Tapacurá (15,38%).



**Figura 8 - Variação percentual no volume (m<sup>3</sup>) produzido no ano por sistema em comparação com o realizado**

Na Figura 9 fica evidente a mudança na participação dos sistemas integrados na produção total do período estudado, salientando a redução de 5% de Tapacurá e o aumento de 7% do sistema Pirapama, que cobriu boa parte da redução do primeiro, uma vez que ambos fornecem água para os municípios com maior demanda atendida de água da RMR, Recife e Jaboatão dos Guararapes (ver Figura 5). Importante destacar que esses dois são os sistemas de abastecimento da COMPESA que produzem os maiores volumes de água de todo o estado, de acordo com os Relatórios de Produção da COMPESA (2013), sendo Pirapama o maior do estado e um dos maiores do Brasil<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> Segundo informação da COMPESA, disponível em <http://www.compesa.com.br/saneamento/abastecimentodeagua>, acesso em 22 jan. 2014.



**Figura 9 - Participação dos sistemas integrados na produção anual**

Em relação a distribuição dessa produção entre os municípios da RMR, nas Tabelas 10 e 11 são apresentados os valores ótimos da variável de decisão, volume ( $m^3$ ) de água alocada por mês por cada sistema integrado de abastecimento a cada município. A partir desses resultados nota-se que, para garantir a minimização da função objetivo, durante alguns meses do ano não deve haver distribuição de água dos sistemas Caixa D'água e Marcos Freire para Recife; Gurjaú, Marcos Freire e Tapacurá para Jaboatão dos Guararapes; Suape para o Cabo de Santo Agostinho; Várzea do Una para Camaragibe; Tapacurá para São Lourenço da Mata; e Caixa D'Água para Olinda, substituídos por outros de menor custo para manter o atendimento da demanda. Isso se justifica pelo fato do custo (CE+CT) por metro cúbico desses sistemas em determinados períodos ser muito superior ao de outros sistemas que atendem a esses municípios em períodos em que podem ser substituídos, sem prejudicar o atendimento.

Um exemplo é o caso do sistema Suape, que em janeiro e fevereiro apresentou o maior custo por metro cúbico (CE+CT), sendo R\$ 0,43/ $m^3$  e R\$ 0,41/ $m^3$  respectivamente. Nesses meses a otimização indica que ele não deve fornecer água para o Cabo de Santo Agostinho, que tem garantido o atendimento de sua demanda pelos sistemas Gurjaú e Pirapama, com custos inferiores nesse período, R\$ 0,16/ $m^3$  e R\$ 0,11/ $m^3$  respectivamente em janeiro, e R\$ 0,35/ $m^3$  e

R\$ 0,12/m<sup>3</sup> em fevereiro. Apesar de seu alto custo nesse período, o sistema Suape não paralisa sua produção totalmente, pois precisa distribuir água para Ipojuca, pois é o único sistema integrado a atendê-lo. O mesmo acontece com Tapacurá, que durante 6 meses não deve distribuir água para Jaboatão dos Guararapes, que por alguns períodos também não deve ser atendido por Gurjaú e Marcos Freire, todos com maiores custos unitários que Pirapama, o outro sistema integrado a atender essa cidade e que ao longo do ano distribuiu o maior volume de água para ela.

**Tabela 10 - Alocação ótima de água (m<sup>3</sup>) ó Janeiro a Junho**

SISTEMA INTEGRADO	MUNICÍPIO ATENDIDO	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
ALTO DO CÉU	Olinda	129.330	129.330	129.330	129.330	129.330	92.124
	Recife	1.923.900	743.540	2.205.500	2.205.500	2.205.500	2.242.700
BOTAFOGO	Abreu e Lima	298.930	198.700	291.800	318.990	185.540	297.130
	Igarassu	200.350	180.260	199.170	197.280	214.380	211.240
	Olinda	1.848.800	1.233.200	1.419.300	1.277.900	1.328.000	1.344.900
	Paulista	1.300.000	1.374.700	1.235.000	1.094.500	1.392.500	1.281.400
CAIXA D'ÁGUA	Recife	0	0	0	0	0	0
	Olinda	0	0	0	0	0	0
GURJAÚ	Cabo de Santo Agostinho	255.520	41.817	500.900	500.900	500.900	500.900
	Jaboatão dos Guararapes	1.020.500	0	244.960	1.939.600	0	1.186.800
MARCOS FREIRE	Recife	0	0	0	0	0	0
	Jaboatão dos Guararapes	0	0	0	0	0	0
PIRAPAMA	Recife	6.063.100	6.041.400	4.380.000	6.063.100	4.380.000	6.063.100
	Cabo de Santo Agostinho	1.574.200	1.574.200	1.574.200	1.574.200	1.574.200	875.300
	Jaboatão dos Guararapes	1.947.300	1.969.000	3.630.500	1.947.300	3.630.500	2.646.200
SUAPE	Cabo de Santo Agostinho	0	0	480.600	931.850	449.650	1.086.500
	Ipojuca	125.280	107.550	167.810	160.180	173.280	160.450
TAPACURÁ	Camaragibe	1.170.200	1.170.200	1.170.200	1.084.300	1.163.600	1.170.200
	Jaboatão dos Guararapes	523.080	523.080	753.950	243.730	475.920	0
	Recife	6.403.000	6.403.000	4.129.200	2.459.100	5.400.700	4.023.600
	São Lourenço da Mata	32.068	32.068	32.068	32.068	32.068	32.068
VÁRZEA DO UNA	São Lourenço da Mata	687.780	484.840	317.390	425.630	493.700	495.660
	Camaragibe	52.721	63.698	99.442	0	0	0
<b>TOTAL</b>		<b>25.556.059</b>	<b>22.270.583</b>	<b>22.961.320</b>	<b>22.585.458</b>	<b>23.729.768</b>	<b>23.710.272</b>

**Tabela 11 - Alocação ótima de água (m<sup>3</sup>) ó Julho a Dezembro**

SISTEMA INTEGRADO	MUNICÍPIO ATENDIDO	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ALTO DO CÉU	Olinda	44.223	129.330	129.330	129.330	129.330	129.330
	Recife	416.390	2.205.500	2.205.500	2.205.500	2.205.500	2.205.500
BOTAFOGO	Abreu e Lima	276.140	235.550	505.030	342.190	339.260	425.330
	Igarassu	235.390	265.370	264.280	268.630	284.260	235.330
	Olinda	1.617.900	1.473.000	1.212.700	1.255.800	1.412.800	1.796.600
	Paulista	1.530.300	1.685.900	1.289.400	1.499.000	1.148.600	1.108.400
CAIXA D'ÁGUA	Recife	0	0	0	0	165.920	0
	Olinda	0	50.862	0	0	269.940	0
GURJAÚ	Cabo de Santo Agostinho	500.900	405.780	500.900	405.780	405.780	500.900
	Jaboatão dos Guararapes	1.939.600	2.034.800	1.887.600	2.034.800	2.034.800	1.939.600
MARCOS FREIRE	Recife	0	0	0	219.060	219.060	219.060
	Jaboatão dos Guararapes	0	0	0	31.871	0	31.871
PIRAPAMA	Recife	6.063.100	6.063.100	6.063.100	6.063.100	6.063.100	5.609.600
	Cabo de Santo Agostinho	1.574.200	1.294.100	1.574.200	1.054.200	1.066.600	1.574.200
	Jaboatão dos Guararapes	1.765.100	2.227.400	1.947.300	2.467.300	2.455.000	2.400.800
SUAPE	Cabo de Santo Agostinho	791.770	987.570	829.800	1.086.500	846.230	438.310
	Ipojuca	165.800	165.800	160.450	165.800	160.450	114.890
TAPACURÁ	Camaragibe	710.830	976.110	907.180	889.910	980.760	966.830
	Jaboatão dos Guararapes	0	0	0	223.220	0	0
	Recife	6.403.000	4.551.100	4.985.300	5.271.000	3.736.200	4.162.100
	São Lourenço da Mata	0	2.001	0	0	0	0
VÁRZEA DO UNA	São Lourenço da Mata	728.310	751.880	743.930	736.130	736.580	750.280
	Camaragibe	112.680	89.113	97.065	104.860	104.410	90.712
<b>TOTAL</b>		<b>24.875.633</b>	<b>25.594.266</b>	<b>25.303.065</b>	<b>26.453.981</b>	<b>24.764.580</b>	<b>24.699.643</b>

Destaca-se ainda que, em decorrência de seus altos custos, os sistemas Caixa D'Água e Marcos Freire devem paralisar suas atividades por dez e nove meses do ano, respectivamente.

Comparando essas alocações com o realizado pela COMPESA em 2013 temos que coincide a não alocação nas relações sistema x município com a solução ótima. Por exemplo, Caixa D'Água não distribuiu água para Olinda por 6 (seis) meses em 2013 (janeiro a junho), já na solução ótima isso ocorre durante 10 (dez) meses, inclusive compreendendo os meses do realizado, conforme exposto na Tabela 11. Já o sistema Tapacurá não distribuiu água para São

Lourenço da Mata por 7 (sete) meses, de acordo com os Relatórios de Produção da COMPESA, e no ótimo isso deveria acontecer apenas por 5 (cinco) meses do ano, havendo a coincidência apenas no mês de julho. Enquanto Tapacurá não alocou água para Jaboatão dos Guararapes em dezembro/2013, o modelo indica que isso deveria ter ocorrido por 6 (seis) meses, inclusive no mês em que ocorreu. Por outro lado, o sistema Várzea do Una não forneceu água para Camaragibe por 7 (sete) meses, mas no ótimo isso deveria ter ocorrido apenas por 3 (três) meses.

Através da análise de sensibilidade do relatório do *software* GAMS com os resultados da variável de decisão foi possível identificar o custo reduzido<sup>22</sup> dos sistemas que na solução ótima não alocam água para determinados municípios em alguns meses. Assim, a partir desse resultado calculamos o custo de oportunidade dos sistemas, ou seja, o maior custo admissível, que ainda compensa distribuir água do sistema integrado para determinado município na solução ótima. Uma vez que o custo de oportunidade é dado pela diferença entre o custo real e o custo reduzido, conforme apresentado no capítulo 4.

Na Tabela 12 são apresentados os custos reduzidos e os custos de oportunidade da solução ótima, onde na coluna do custo reduzido estão destacados os valores acima de R\$ 0,10, em que o maior desses valores é do sistema Suape no mês de janeiro, que precisa ter uma redução de R\$ 0,27 no seu custo total por m<sup>3</sup> para alocar água para o Cabo de Santo Agostinho. Os sistemas Tapacurá e Várzea do Una apresentam necessidade de redução em seus custos de R\$ 0,09/m<sup>3</sup> para baixo. Sobre o custo de oportunidade observa-se que o menor deles é de R\$ 0,12/m<sup>3</sup> de água dos sistemas Marcos Freire e Tapacurá no mês de setembro para que passem a distribuir água para Jaboatão dos Guararapes, enquanto o maior é R\$ 0,24/m<sup>3</sup>, do sistema Caixa D'Água para Olinda nos meses de janeiro e outubro.

---

<sup>22</sup> Para uma variável não-básica (cujo valor é zero), o custo reduzido é a quantidade pela qual o valor do coeficiente da função-objetivo precisa ser melhorado para que a variável passe a ser básica (tem um valor diferente de zero) na solução ótima. (COLIN, 2007).

**Tabela 12 - Custo Reduzido e Custo de Oportunidade (R\$)**

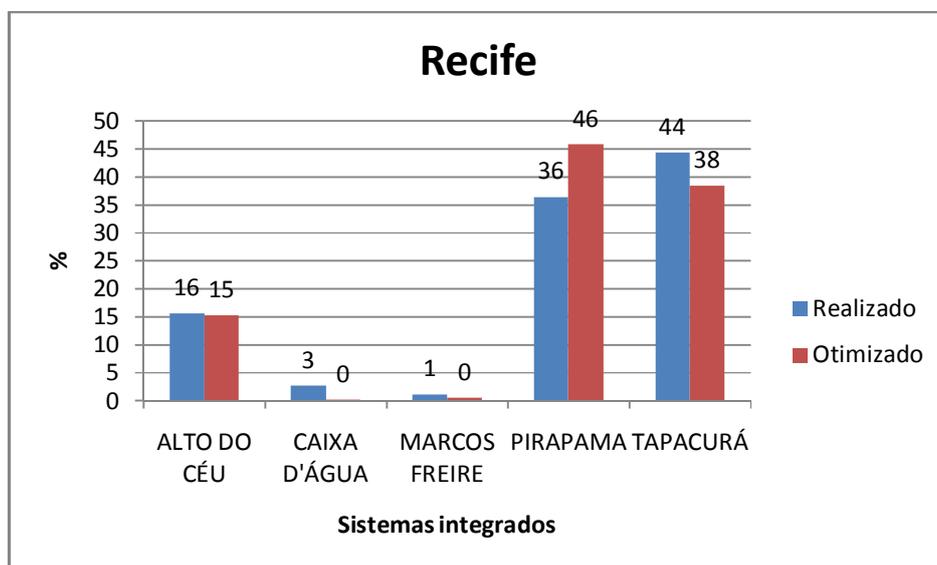
<b>Sistema Integrado</b>	<b>Município</b>	<b>Mês</b>	<b>Custo Real (CE+CT) (R\$)</b>	<b>Custo Reduzido (R\$)</b>	<b>Custo de Oportunidade (R\$)</b>
Caixa D'Água	Olinda	jan	0,29	0,05	0,24
		fev	0,26	0,05	0,21
		mar	0,24	0,06	0,18
		abr	0,27	0,06	0,21
		mai	0,27	0,06	0,21
		jun	0,23	0,02	0,21
		jul	0,23	0,01	0,22
		set	0,27	0,04	0,23
		out	0,25	0,01	0,24
		dez	0,22	0,01	0,21
	Recife	jan	0,29	0,09	0,20
		fev	0,26	0,11	0,15
		mar	0,24	0,10	0,14
		abr	0,27	0,11	0,16
		mai	0,27	0,10	0,17
		jun	0,23	0,02	0,21
		jul	0,23	0,01	0,22
		ago	0,25	0,04	0,21
		set	0,27	0,06	0,21
		out	0,25	0,04	0,21
		dez	0,22	0,02	0,20
		Gurjaú	Jaboatão dos Guararapes	fev	0,35
mai	0,22			0,05	0,17

Continua

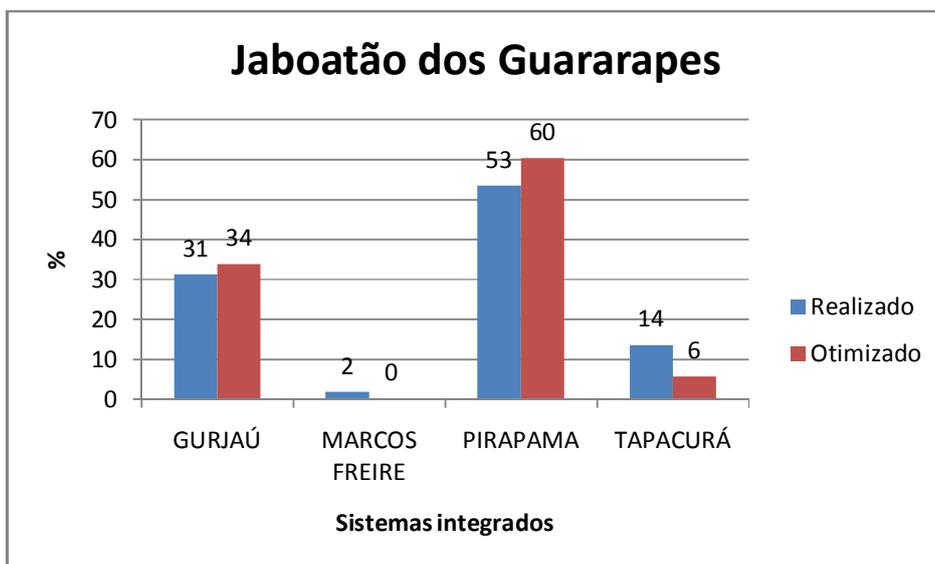
Sistema Integrado	Município	Mês	Custo Real (CE+CT) (R\$)	Custo Reduzido (R\$)	Custo de Oportunidade (R\$)
Marcos Freire	Jaboatão dos Guararapes	jan	0,22	0,06	0,16
		fev	0,26	0,11	0,15
		mar	0,21	0,05	0,16
		abr	0,22	0,06	0,16
		mai	0,20	0,03	0,17
		jun	0,23	0,07	0,16
		jul	0,25	0,13	0,12
		ago	0,24	0,09	0,15
		set	0,24	0,12	0,12
	nov	0,20	0,04	0,16	
	Recife	jan	0,22	0,02	0,20
		fev	0,26	0,11	0,15
		mar	0,21	0,07	0,14
		abr	0,22	0,06	0,16
		mai	0,20	0,03	0,17
		jun	0,23	0,01	0,22
		jul	0,25	0,03	0,22
		ago	0,24	0,03	0,21
set		0,24	0,03	0,21	
Suape	Cabo de Santo Agostinho	jan	0,43	0,27	0,16
		fev	0,41	0,05	0,36
Tapacurá	Jaboatão dos Guararapes	jun	0,22	0,06	0,16
		jul	0,20	0,08	0,12
		ago	0,22	0,06	0,16
		set	0,21	0,09	0,12
		nov	0,21	0,05	0,16
		dez	0,19	EPS*	0,18
	São Lourenço da Mata	jul	0,20	EPS*	0,19
		set	0,21	EPS*	0,20
		out	0,21	EPS*	0,20
		nov	0,21	EPS*	0,20
dez	0,19	EPS*	0,18		
Várzea do Una	Camaragibe	abr	0,25	0,09	0,16
		mai	0,23	0,05	0,18
		jun	0,24	0,02	0,22

Nota: \* EPS significa muito pequeno, mas não zero (ROSENTHAL, 2006).

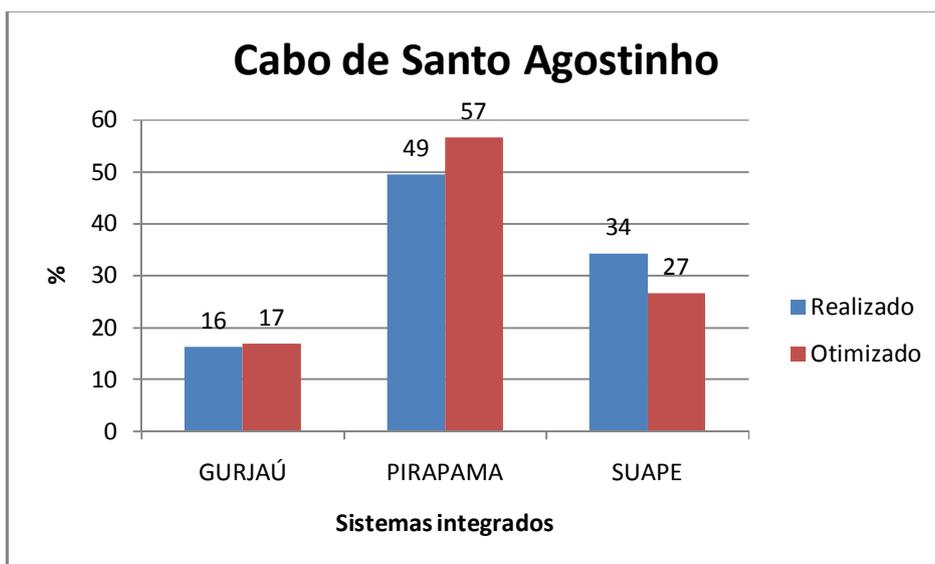
Analisando os resultados da alocação total do ano por município observa-se uma variação acima de 6% na participação de alguns dos sistemas que abastecem os municípios Recife, Jaboatão dos Guararapes e Cabo de Santo Agostinho, indicando maior mudança na composição da distribuição de água dos municípios que têm maior volume de água a ser atendido, como pode ser melhor visualizado nas Figuras 10, 11 e 12. Além disso, destaca-se o aumento na participação do sistema Pirapama nessas três cidades, sendo o maior deles em Recife, onde ocorreu uma inversão, tendo em vista que era Tapacurá o sistema com maior participação na água distribuída para a capital pernambucana.



**Figura 10 - Participação dos sistemas integrados na distribuição anual para o município de Recife.**



**Figura 11 - Participação dos sistemas integrados na distribuição anual para o município de Jaboatão dos Guararapes.**



**Figura 12 - Participação dos sistemas integrados na distribuição anual para o município de Cabo de Santo Agostinho.**

A partir do Relatório de Saída gerado pelo GAMS é possível, ainda, realizarmos a análise de sensibilidade, conforme descrito no capítulo anterior (seção 4.1.2), onde destaca-se que a alteração resultante no valor da função-objetivo devida ao incremento de uma unidade na constante de uma restrição é denominada preço-sombra (Lachtermacher, 2007). Assim, analisando os resultados da otimização desse cenário, primeiramente no que se refere à restrição

de volume mínimo de água a ser distribuído mensalmente para cada município da RMR (equação 4.3), foi obtido o preço-sombra de 1 m<sup>3</sup> de água a mais a ser distribuído por sistemas integrados por município em cada mês, o que poderia ocorrer a partir do aumento na demanda ou problemas na distribuição por sistemas isolados, por exemplo. Sendo assim, na Tabela 13 é apresentado, em ordem decrescente, o preço-sombra médio mensal de 1 m<sup>3</sup> de água a ser distribuído a mais por município, ou seja, quanto aumenta o custo total anual da COMPESA caso precise aumentar em uma unidade o volume a ser distribuído para um determinado município, assumindo que todos os parâmetros restantes permanecem constantes.

**Tabela 13 - Preço-sombra médio de aumento no volume distribuído (R\$/m<sup>3</sup>)**

<b>Município</b>	<b>Preço-sombra (R\$/m<sup>3</sup>)</b>
Ipojuca	0,23
Abreu e Lima	0,22
Igarassu	0,22
Olinda	0,22
Paulista	0,22
São Lourenço da Mata	0,21
Cabo de Santo Agostinho	0,20
Camaragibe	0,20
Recife	0,19
Jaboatão dos Guararapes	0,16

Nota-se que o preço-sombra mais caro é dos municípios que são atendidos por apenas um sistema integrado, como é o caso de Ipojuca, Abreu e Lima, Igarassu e Paulista. Portanto, o custo de distribuir 1 m<sup>3</sup> de água a mais para esses municípios é maior do que para Recife e Jaboatão dos Guararapes, que apresentaram o menor preço-sombra, ou seja, o menor aumento na função-objetivo decorrente de um aumento na distribuição de água para eles. Essas duas cidades são abastecidas por pelo menos 4 sistemas integrados, dentre eles o sistema Pirapama, de menor custo de acordo com os dados apresentados no capítulo 4, o que explica apresentarem o menor preço-sombra.

Outra restrição do modelo é a de capacidade máxima de produção mensal dos sistemas integrados de abastecimento (m<sup>3</sup>/mês), representada pela equação 4.2. Observa-se que na solução ótima ela é ativa para o sistema Pirapama durante quase todos os meses do ano, exceto em julho,

indicando que tal sistema deve ser explorado ao máximo para que se minimize o custo da firma. Nesse caso, o preço-sombra aparece negativo no relatório e indica quanto reduziria o valor da função-objetivo (custo anual) caso houvesse o aumento da capacidade de produção mensal do sistema Pirapama em 1 m<sup>3</sup>, conforme Tabela 14. Observa-se que o maior valor absoluto do preço-sombra do sistema ocorre em outubro, que é o mês de maior volume de água a ser distribuído para a RMR a partir de sistemas integrados.

**Tabela 14 - Valor absoluto do preço-sombra do aumento na capacidade de produção do sistema Pirapama (R\$/m<sup>3</sup>)**

Mês	Preço-sombra (R\$/m <sup>3</sup> )
Jan	0,05
Fev	0,04
Mar	0,05
Abr	0,05
Mai	0,05
Jun	0,01
Jul	-
Ago	0,04
Set	0,03
Out	0,12
Nov	0,05
Dez	0,08

A partir desse preço-sombra foi possível contabilizar a redução no custo anual da empresa supondo um aumento da vazão máxima de produção do sistema Pirapama para 4.500 L/s (ou seja, de 3,578 m<sup>3</sup>/s para 4,5 m<sup>3</sup>/s), o que é viável do ponto de vista da capacidade instalada segundo a COMPESA, mas que não foi considerado no modelo por não ter sido alcançado esse nível de produção em virtude da disponibilidade hídrica do ano 2013. Esse aumento na vazão corresponde a um acréscimo de 2.079.351 m<sup>3</sup>/mês na capacidade máxima de produção do sistema, em que o parâmetro  $S_{\text{Pirapama}}$  da equação 4.2 passaria de 9.584.649 m<sup>3</sup>/mês para 11.664.000 m<sup>3</sup>/mês, o que resultou em uma diminuição de R\$ 1.185.230,07 na função-objetivo, isto é, no custo anual da COMPESA, o que representa um decréscimo de 2,64% em relação ao ótimo do cenário 1 e de 2,51% do realizado pela firma em 2013.

Nesse cenário destacaram-se a possibilidade de redução no custo da empresa a partir de mudanças na produção e distribuição de água dos sistemas integrados que abastecem a RMR, com alterações mais significativas nos dois maiores sistemas da COMPESA, Pirapama e Tapacurá. Especialmente com o aumento de 20,73% na exploração do sistema Pirapama, que em 2013 produziu uma vazão média de 3.000 L/s, chegando ao máximo de 3.578 L/s em outubro, valor este considerado como a máxima capacidade do sistema no modelo, que pode chegar a até 5.130<sup>23</sup> L/s, supondo disponibilidade hídrica regular na barragem Pirapama, o que pelos resultados apresentados reduziria ainda mais os custos da empresa. Por outro lado, houve uma redução de 15,38% na produção do sistema Tapacurá, que sofre com problema de qualidade da água do seu principal manancial, a barragem Tapacurá, que de acordo com a APAC (2013) está hipereutrófica, o que aumenta seus custos de tratamento, evidenciado pelo fato de seu custo unitário de tratamento (R\$/m<sup>3</sup>) ser maior do que seus custos de energia elétrica, o que só acontece em outros dois sistemas, Gurjaú e Várzea do Una, ambos de menor porte.

Outro resultado importante foi a queda abrupta no volume de água produzido e distribuído pelos dois sistemas mais caros do ponto de vista dos custos de energia elétrica e de tratamento, Caixa D'Água (89,18%) e Marcos Freire (71,98%), indicando que é possível atender à demanda que atualmente é satisfeita pela COMPESA com sistemas mais eficientes. Ainda, na Tabela 12 foi indicado em quanto seus custos precisam ser reduzidos para que aumentem sua produção na solução ótima.

## **5.2 Cenário 2 - simulação da melhoria da qualidade da água bruta do sistema Tapacurá**

Neste cenário é assumida uma melhoria na qualidade da água captada e tratada pelo sistema Tapacurá, incorporada no modelo como uma redução nas suas despesas com produtos químicos de forma que tal sistema passou a ter os mesmos custos de tratamento que o sistema Pirapama no modelo, o que representa uma redução de 39,41% no custo total unitário (R\$/m<sup>3</sup>/ano) do sistema Tapacurá, e de 46,82% no seu custo de tratamento (R\$/m<sup>3</sup>/ano).

Essa hipótese foi assumida considerando que os dois são os sistemas de maior porte de Pernambuco, possuem características semelhantes no que se refere a captação, uma vez que seus

---

<sup>23</sup> Segundo informação da COMPESA, disponível em <http://www.compesa.com.br/saneamento/abastecimentodeagua>, acesso em 22 jan. 2014.

principais mananciais são barragens que se situam na região metropolitana do Recife, Tapacurá e Pirapama, mas que possuem atualmente água com qualidade diferente, uma vez que o estado trófico da barragem Tapacurá é hipereutrófico, sendo a única barragem que atende à RMR com essa classificação de acordo com o Índice de Estado Trófico - IET<sup>24</sup>, e Pirapama foi classificada como mesotrófico, segundo a APAC (2014). Contudo é importante informar que o sistema Tapacurá ainda recebe água da barragem Duas Unas e do rio Capibaribe, tendo a primeira o mesmo IET de Pirapama.

Na Tabela 15 são apresentados novamente os custos unitários mensais de tratamento dos sistemas Tapacurá e Pirapama, destacando que os desse último serão considerados para Tapacurá no presente cenário (2).

**Tabela 15 - Custos unitários mensais de tratamento dos sistemas Tapacurá e Pirapama (R\$/m<sup>3</sup>)**

Mês	Sistema Pirapama	Sistema Tapacurá
<b>Jan-13</b>	0.04	0.06
<b>Fev-13</b>	0.06	0.06
<b>Mar-13</b>	0.04	0.07
<b>Abr-13</b>	0.06	0.08
<b>Mai-13</b>	0.07	0.09
<b>Jun-13</b>	0.08	0.14
<b>Jul-13</b>	0.06	0.12
<b>Ago-13</b>	0.05	0.13
<b>Set-13</b>	0.04	0.13
<b>Out-13</b>	0.04	0.12
<b>Nov-13</b>	0.05	0.12
<b>Dez-13</b>	0.06	0.11

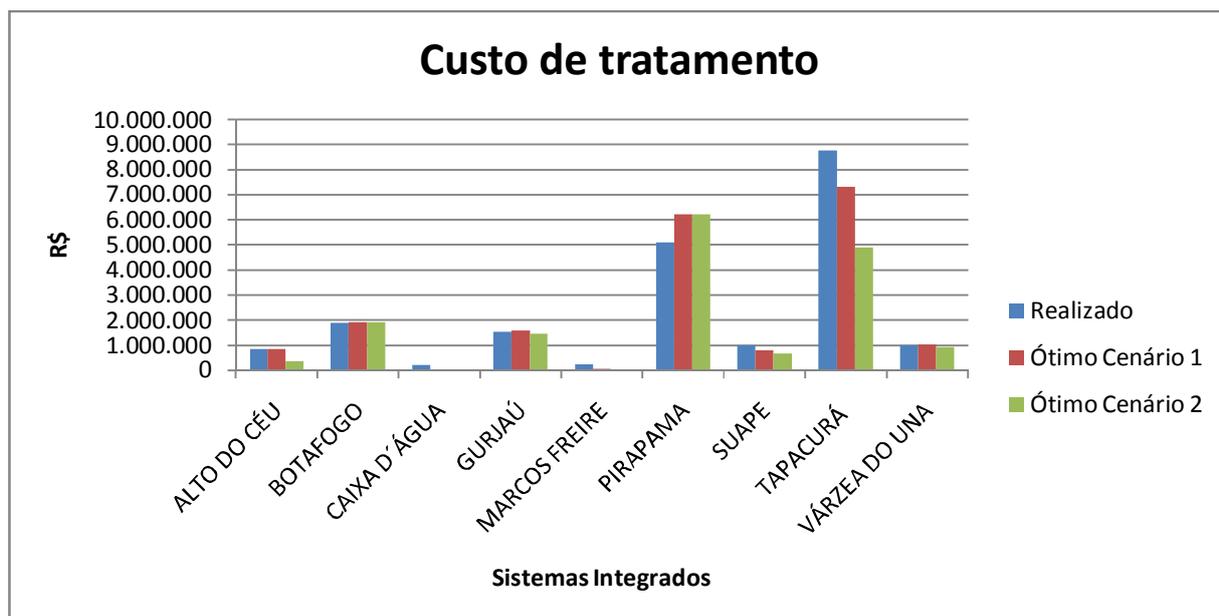
Fonte: ICPQ - Coordenação de Tratamento/COMPESA.

Como esperado, sob essa nova condição, o valor da função objetivo (CE+CT) caiu ainda mais, 13,03% (R\$ 6.151.473,52) em relação ao realizado pela COMPESA em 2013 e 8,62% (R\$ 3.874.662,18) em relação ao ótimo do cenário 1 (atual). Essa redução no custo total anual

<sup>24</sup> O Índice do Estado Trófico (IET) tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas. Nesse índice, os resultados do índice são calculados a partir dos valores de fósforo e devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo (Lamparelli, 2004).

(CE+CT) em relação ao valor ótimo da função objetivo no cenário anterior se deve exclusivamente à redução nas despesas com produtos químicos (R\$/m<sup>3</sup>), ou custo de tratamento, que podem ser decorrentes da melhoria na qualidade da água bruta de Tapacurá. Relacionando com o método de valoração ambiental dos custos evitados, esse custo anual de R\$ 3.874.662,18 que seria evitado pela empresa de abastecimento caso houvesse uma melhora na qualidade da água de Tapacurá pode ser interpretado como o valor de uso da qualidade da água de Tapacurá para a COMPESA, considerando que a redução no custo de tratamento se deve exclusivamente a mudança na qualidade da água, excluída a possibilidade de redução nas despesas com produtos químicos por avanços tecnológicos ou mudança nas exigências de controle de qualidade, por exemplo.

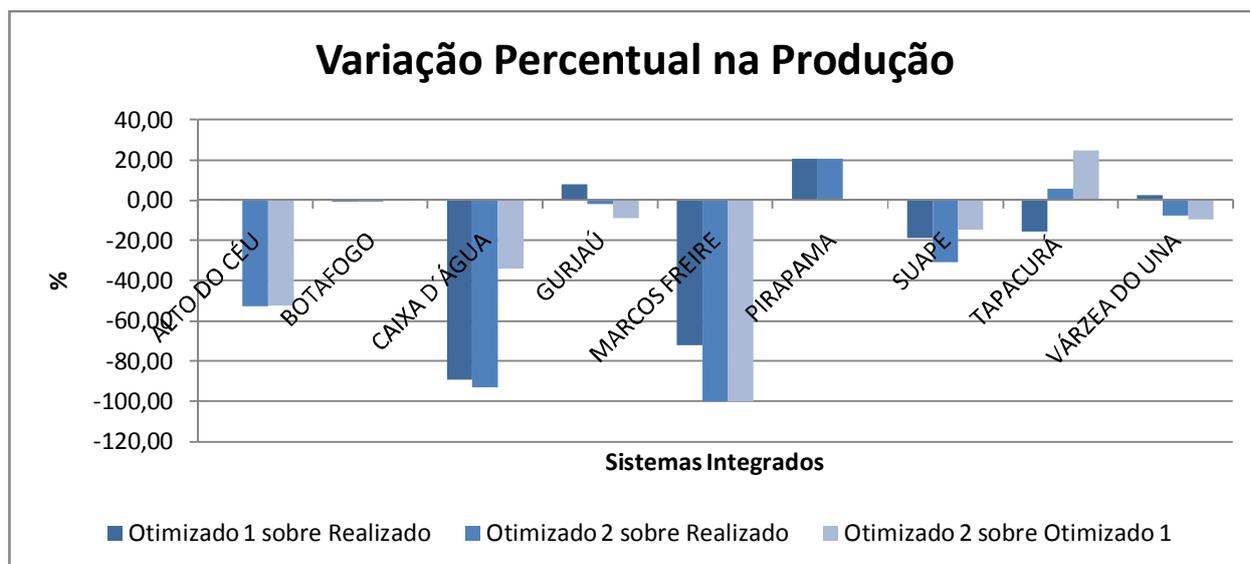
Decompondo essa redução no custo (CE+CT) observa-se, como esperado nesse novo cenário, que houve uma maior diminuição no custo de tratamento, sendo de 16,85% em relação ao ótimo do cenário 1 e 20,26% sobre o realizado em 2013. Na Figura 13 são comparados os valores absolutos do custo de tratamento dos sistemas integrados em cada situação, onde é possível observar que a redução nas despesas de tratamento do sistema Tapacurá implica em redução nos demais sistemas quando comparado com o ótimo do cenário 1, exceto no sistema Pirapama, que permanece com as mesmas despesas, uma vez que na otimização anterior já operava no limite. Já o custo de energia elétrica caiu apenas 2,14% em relação ao ótimo anterior e 7,42% sobre o realizado.



**Figura 13 - Custos de tratamento no ano por sistema ó comparação entre os resultados do realizado, cenário 1 e cenário 2.**

Para melhor compreensão de como se chegou a essa redução no custo devemos observar a Figura 14, que apresenta a variação na produção de cada sistema integrado agregando à Figura 8 a comparação da produção no cenário de melhoria da qualidade da água de Tapacurá (otimizado 2) com o realizado pela COMPESA e com o ótimo do cenário anterior (otimizado 1).

Satisfazendo a expectativa, houve um aumento na produção do sistema Tapacurá, com melhor aproveitamento da sua capacidade instalada, invertendo o resultado da otimização no cenário atual (1) em que se indicava redução das suas atividades. Em comparação com o realizado pela empresa o resultado sinaliza um aumento de 5,32% na produção desse sistema e de 24,47% se comparado ao ótimo no cenário atual, apresentado na Seção 5.1.



**Figura 14 - Variação percentual no volume (m<sup>3</sup>) produzido no período por sistema considerando melhoria na qualidade da água de Tapacurá**

Outros sistemas também apresentaram inversões na mudança do volume produzido em relação à solução ótima do cenário anterior, Gurjaú e Várzea do Una, que na solução ótima do cenário 1 indicava um aumento na sua produção em relação ao realizado pela COMPESA e no cenário de melhoria na qualidade da água de Tapacurá têm a produção anual reduzida nas duas comparações. Essas inversões que ocorreram nos sistemas mencionados podem ser explicadas pelo fato de alguns dos municípios para os quais eles distribuem água também serem atendidos por Tapacurá, que teve redução nos seus custos.

Comparando-se com a produção ótima do cenário atual (Seção 5.1), na Figura 14 denominado otimizado 1, observa-se que praticamente não foram modificadas as produções dos sistemas Botafogo (-0,09%) e Pirapama (0%). O que pode ser explicado por Botafogo ser o único sistema integrado a abastecer os municípios de Abreu e Lima, Igarassu e Paulista, e Pirapama já operar quase no seu limite, utilizando 99,8% de sua capacidade de produção no ótimo do cenário atual.

Além disso, o sistema Marcos Freire não operaria num ano com essa disponibilidade sob esse novo cenário de melhoria na qualidade de Tapacurá na solução ótima, bem como Caixa D'Água só operaria nos meses de agosto e novembro, tendo uma diminuição de 34% na sua produção em relação ao ótimo do cenário 1, e de 93% sobre o realizado pela empresa em 2013.

Para melhor entender essa solução dada pelo modelo apresentamos a Tabela 16, onde fica evidente a diferença de custos desses sistemas.

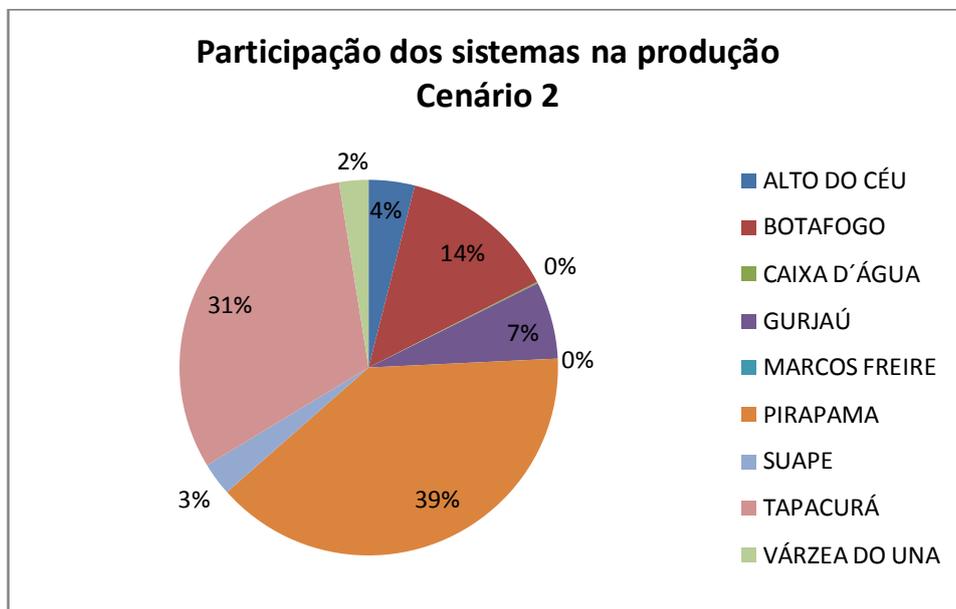
**Tabela 16 - Custo médio dos sistemas Caixa D'Água, Marcos Freire e Tapacurá no cenário de melhoria da qualidade da água de Tapacurá**

Sistema	Custo médio de energia (R\$/m <sup>3</sup> )	Custo médio de tratamento (R\$/m <sup>3</sup> )	Custo total médio (R\$/m <sup>3</sup> )
CAIXA D'ÁGUA	0,20	0,05	0,25
MARCOS FREIRE	0,12	0,10	0,22
TAPACURÁ	0,08	0,05*	0,13

Fonte: Dados fornecidos pela COMPESA (Gerência de Controle Operacional, Gerência de Informação Operacional e Coordenação de Tratamento).

Nota: \*Custo médio de tratamento do sistema Pirapama.

Nota-se, ainda, mudanças na participação dos sistemas integrados de abastecimento na produção anual, que passa a ter a configuração apresentada na Figura 15.



**Figura 15 - Participação dos sistemas integrados na produção anual no cenário de melhoria da qualidade da água de Tapacurá**

Em relação ao resultado otimizado no cenário 1 há uma redução na participação de Alto do Céu, de 9% para 4%, e Várzea do Una, de 3% para 2%, além do esperado aumento de Tapacurá, que passou de 25% para 31% sua representatividade na produção anual dos sistemas integrados que abastecem a RMR. No que se refere à comparação com o realizado pela empresa em 2013, houveram reduções nas participações de Alto do Céu (de 8% para 4%), Caixa D'Água (de 1% para 0,1%), Marcos Freire (de 1% para 0%) e Várzea do Una (de 3% para 2%). Os aumentos aconteceram na participação dos sistemas Tapacurá (de 30% para 31%) e Pirapama (de 32% para 39%).

Para visualizar o impacto da hipótese de redução nos custos de tratamento do sistema Tapacurá no custo anual por sistema apresentamos a Tabela 17, que reflete a variação na produção por sistema integrado, apresentada anteriormente na Figura 13. Sendo importante aqui destacar que apesar do aumento de 24,47% na produção de Tapacurá se comparado ao ótimo no cenário sob as condições atuais, com a redução nos custos de tratamento desse sistema houve uma redução de 6,99% no custo anual de Tapacurá, composto por uma redução de 33% nas despesas com produtos químicos e um aumento de 25% nas despesas com energia elétrica. Salientando que o aumento da energia elétrica resulta da ampliação no volume de água tratada distribuído pelo sistema.

**Tabela 17 - Custo no ano por sistema integrado nos cenários atual (1) e de simulação de redução nos custos de tratamento de Tapacurá (2)**

<b>Sistema Integrado</b>	<b>Realizado* (R\$)</b>	<b>Otimizado 1 (R\$)</b>	<b>Otimizado 2 (R\$)</b>
<b>ALTO DO CÉU</b>	4.058.094,67	3.981.760,00	1.871.373,60
<b>BOTAFOGO</b>	8.634.870,50	8.630.900,00	8.622.720,00
<b>CAIXA D'ÁGUA</b>	1.106.474,95	99.886,50	66.702,50
<b>GURJAÚ</b>	2.698.603,81	2.762.205,95	2.471.261,40
<b>MARCOS FREIRE</b>	567.590,19	141.672,14	0,00
<b>PIRAPAMA</b>	10.479.609,87	12.725.760,00	12.725.760,00
<b>SUAPE</b>	2.374.159,75	1.757.582,46	1.538.347,90
<b>TAPACURÁ</b>	15.746.273,07	13.269.400,00	12.341.770,00
<b>VÁRZEA DO UNA</b>	1.548.020,97	1.567.926,84	1.424.426,84

Fonte: \*Elaborado pelo próprio autor a partir de dados fornecidos pela COMPESA (Gerência de Controle Operacional, Gerência de Informação Operacional e Coordenação de Tratamento).

Os resultados da alocação mensal de água de cada sistema integrado para os municípios da RMR, variável de decisão, para o cenário em análise são apresentados no Anexo I, Tabela I.1, onde consta que na solução ótima sob as novas condições do modelo o sistema Alto do Céu passa a ser um dos sistemas que não distribuem água para algum de seus municípios atendidos em determinado período (Recife, nos meses de junho, novembro e dezembro). Outro resultado interessante sobre as alocações foi de que mesmo com a redução dos custos de tratamento de Tapacurá ele ainda continua não fornecendo água para Jaboatão dos Guararapes em junho, julho e setembro na solução ótima, apesar de passar a fornecer água para essa cidade em outros três meses que eram nulos anteriormente (agosto, novembro e dezembro) e para São Lourenço da Mata durante todo o ano. Além disso, o sistema Marcos Freire não opera ao longo do ano, conforme destacado anteriormente, e Caixa D'Água passa a não enviar água para Recife o ano todo.

Na Tabela 18 tem-se o custo reduzido dos dois cenários analisados, ou seja, quanto deve reduzir o custo total mensal (R\$/m<sup>3</sup>) dos sistemas que na solução ótima não alocam água para alguns municípios em certos períodos para que a alocação passe a ser não nula na solução ótima. Nas relações sistema ó município ó mês com a célula do custo reduzido em cinza tem-se que no cenário 1 (atual) a alocação era positiva e no cenário 2 (redução nos custos de tratamento de Tapacurá) passou a ser nula, o que em geral ocorreu com municípios que podem ser diretamente atendidos por Tapacurá (Recife e Jaboatão dos Guararapes). Por outro lado, as células em preto destacam as relações em que as alocações eram nulas no cenário 1 e passaram a ser positivas, relacionadas apenas a Tapacurá, como esperado, pois foram os custos desse sistema que modificamos no cenário 2. Ainda, os sistemas Caixa D'Água e Marcos Freire tiveram os maiores aumentos no seu custo reduzido para o município de Recife.

**Tabela 18 - Comparação custo reduzido (R\$)**

<b>Sistema Integrado</b>	<b>Município</b>	<b>Mês</b>	<b>Otimizado 1 - Custo reduzido (R\$) (A)</b>	<b>Otimizado 2 - Custo reduzido (R\$) (B)</b>	<b>Diferença (R\$) (B-A)</b>	<b>Variação %</b>
Alto do Céu	Recife	jun		0,03	0,03	
		nov		0,04	0,04	
		dez		0,02	0,02	
Caixa D'Água	Olinda	jan	0,05	0,05	0,00	0
		fev	0,05	0,05	0,00	0
		mar	0,06	0,06	0,00	0
		abr	0,06	0,06	0,00	0
		mai	0,06	0,06	0,00	0
		jun	0,02	0,02	0,00	0
		jul	0,01	0,01	0,00	0
		set	0,04	0,04	0,00	0
		out	0,01	0,01	0,00	0
		dez	0,01	0,01	0,00	0
		Caixa D'Água	Recife	jan	0,09	0,09
fev	0,11			0,11	0,00	0
mar	0,10			0,12	0,02	20
abr	0,11			0,13	0,02	18
mai	0,10			0,12	0,02	20
jun	0,02			0,08	0,06	300
jul	0,01			0,01	0,00	0
ago	0,04			0,09	0,05	125
set	0,06			0,10	0,04	67
out	0,04			0,10	0,06	150
nov				0,06	0,06	
dez	0,02			0,07	0,05	250
Gurjaú	Jaboatão dos Guararapes	fev	0,20	0,20	0,00	0
		abr		0,01	0,01	
		mai	0,05	0,07	0,02	40

<b>Sistema Integrado</b>	<b>Município</b>	<b>Mês</b>	<b>Otimizado 1 - Custo reduzido (R\$) (A)</b>	<b>Otimizado 2 - Custo reduzido (R\$) (B)</b>	<b>Diferença (R\$) (B-A)</b>	<b>Variação %</b>
Marcos Freire	Jaboatão dos Guararapes	jan	0,06	0,06	0,00	0
		fev	0,11	0,11	0,00	0
		mar	0,05	0,05	0,00	0
		abr	0,06	0,08	0,02	33
		mai	0,03	0,05	0,02	67
		jun	0,07	0,07	0,00	0
		jul	0,13	0,13	0,00	0
		ago	0,09	0,11	0,02	22
		set	0,12	0,12	0,00	0
		out		0,04	0,04	
		nov	0,04	0,06	0,02	50
		dez		0,05	0,05	
Marcos Freire	Recife	jan	0,02	0,02	0,00	0
		fev	0,11	0,11	0,00	0
		mar	0,07	0,09	0,02	29
		abr	0,06	0,08	0,02	33
		mai	0,03	0,05	0,02	67
		jun	0,01	0,07	0,06	600
		jul	0,03	0,03	0,00	0
		ago	0,03	0,08	0,05	167
		set	0,03	0,07	0,04	133
		out		0,04	0,04	
		nov		0,06	0,06	
		dez		0,05	0,05	
Suape	Cabo de Santo Agostinho	jan	0,27	0,27	0,00	0
		fev	0,05	0,05	0,00	0
Tapacurá	Jaboatão dos Guararapes	jun	0,06	EPS		
		jul	0,08	0,02	-0,06	-75
		ago	0,06		-0,06	-100
		set	0,09	EPS		
		nov	0,05		-0,05	-100
		dez	EPS			
Tapacurá	São Lourenço da Mata	jul	EPS			
		set	EPS			
		out	EPS			
		nov	EPS			
		dez	EPS			

Sistema Integrado	Município	Mês	Otimizado 1 - Custo reduzido (R\$) (A)	Otimizado 2 - Custo reduzido (R\$) (B)	Diferença (R\$) (B-A)	Variação %
Várzea do Una	Camaragibe	abr	0,09	0,11	0,02	22
		mai	0,05	0,07	0,02	40
		jun	0,02	0,08	0,06	300
		jul		0,05	0,05	
		ago		0,05	0,05	
		set		0,08	0,08	
		out		0,03	0,03	
		nov		0,03	0,03	
		dez		0,02	0,02	

Nota: \* EPS significa muito pequeno, mas não zero (ROSENTHAL, 2006).

Na análise da simulação de uma redução nos custos de tratamento do sistema Tapacurá, apresentada nesta seção, considerando que o mesmo passou a ter o mesmo custo unitário de tratamento (R\$/m<sup>3</sup>) que o sistema Pirapama tem-se uma forma alternativa de se encontrar o valor de uso da qualidade da água de corpos hídricos. Contudo, é importante destacar que o valor de R\$ 3.874.662,18 encontrado corresponde ao valor de uso para a COMPESA da qualidade da água captada e tratada pelo sistema Tapacurá, que abrange três mananciais - as barragens Tapacurá e Duas Unas e o rio Capibaribe ó das quais a primeira encontra-se com a qualidade comprometida no que se refere ao seu estado trófico, conforme informado anteriormente. Esse valor representa 8,21% das despesas atuais da COMPESA com energia elétrica e produtos químicos.

### 5.3 Cenário 3 - simulação da piora da qualidade da água bruta do sistema Pirapama

De acordo com Silva e Ribeiro (2006), a área a montante da barragem Pirapama é caracterizada por fontes poluidoras de origem doméstica ó municípios de Cabo Rural, Escada, Pombos e Vitória ó e agroindustrial ó as destilarias Sibéria (bebidas), JB e Inexport (álcool). As agroindústrias são responsáveis por uma produção anual de 171.000 ton de álcool, que gera uma carga de esgoto equivalente a gerada por uma população de 8.675.799 habitantes. O trecho a montante da barragem Pirapama tem sofrido, portanto, alterações em sua qualidade devido ao lançamento de efluentes agroindustriais e esgotos domésticos sem tratamento, alterando a sua condição de qualidade atual.

Considerando o exposto acima e que a barragem Pirapama é o corpo hídrico onde é captada a água tratada pelo principal sistema de abastecimento de água do estado de Pernambuco, que recebe o mesmo nome da barragem, onde foram investidos mais de R\$ 600 milhões de reais, com recursos do governo federal (Ministério da Integração Nacional e BNDES), estadual e da Compesa<sup>25</sup>, é de grande importância a questão da qualidade da água dessa barragem. Além disso, nos resultados da otimização apresentados no cenário 1 o sistema Pirapama é o que apresenta maior aumento no volume de água produzido no ano (20,73%), demonstrando ainda mais a sua importância para o abastecimento de água da RMR.

Diante disso, nesta seção é feita uma simulação considerando a hipótese de piora na qualidade da água da barragem Pirapama, incorporada ao modelo como um aumento nos custos de tratamento do sistema Pirapama de forma que o preço unitário do tratamento (R\$/m<sup>3</sup>) mensal passa a ser o mesmo do sistema Tapacurá (ver Tabela 12), que tem como principal manancial a barragem de mesmo nome e que já sofre com problemas na qualidade da sua água, classificada como hipereutrófica em seu estado trófico, diferentemente da água da barragem Pirapama, que atualmente é mesotrófica.

Neste novo contexto o valor da função objetivo (CE+CT), como o esperado, teve um aumento em relação ao realizado em 2013, que foi de 6,76% (R\$ 3.191.310,81). Se compararmos com o resultado da otimização no cenário 1 observa-se um maior aumento, de 12,17% (R\$ 5.468.122,15), isso ocorre porque no resultado da primeira otimização o sistema Pirapama era o que mais aumentava a sua produção para garantir a minimização do custo. É importante destacar que em ambas as comparações os custos de tratamento aumentaram mais de 20%, chegando a um acréscimo de 27,65% nas despesas anuais com produtos químicos se confrontado com o ótimo do cenário 1, que considera as condições atuais de qualidade da água. Ainda assim o modelo conseguiu reduzir despesas com energia, mesmo que pouco, chegando a uma diminuição de 5,4% se comparado ao realizado pela empresa em 2013, demonstrando assim que o aumento no valor da função objetivo deveu-se exclusivamente às despesas com tratamento da água. Os

---

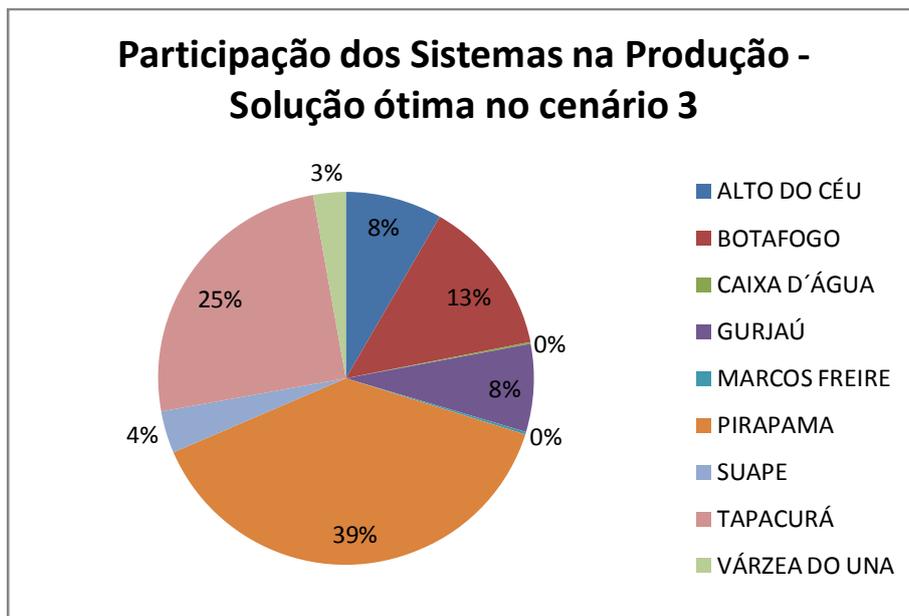
<sup>25</sup> Segundo informação da COMPESA, disponível em <http://www.compesa.com.br/saneamento/abastecimentodeagua>, acesso em 22 jan. 2014.

resultados da alocação mensal de água de cada sistema integrado para os municípios da RMR, variável de decisão, para o cenário 3 são apresentados no Anexo I, Tabela I.2.

Esse impacto no aumento do custo analisado (CE+CT) pode ser explicado pelo fato de Pirapama ser o maior sistema produtor do estado e, conseqüentemente, da RMR juntamente com Tapacurá, e ambos atendem aos municípios de maior demanda dessa região (Recife e Jaboatão dos Guararapes) e no contexto simulado estão com problema de qualidade da água.

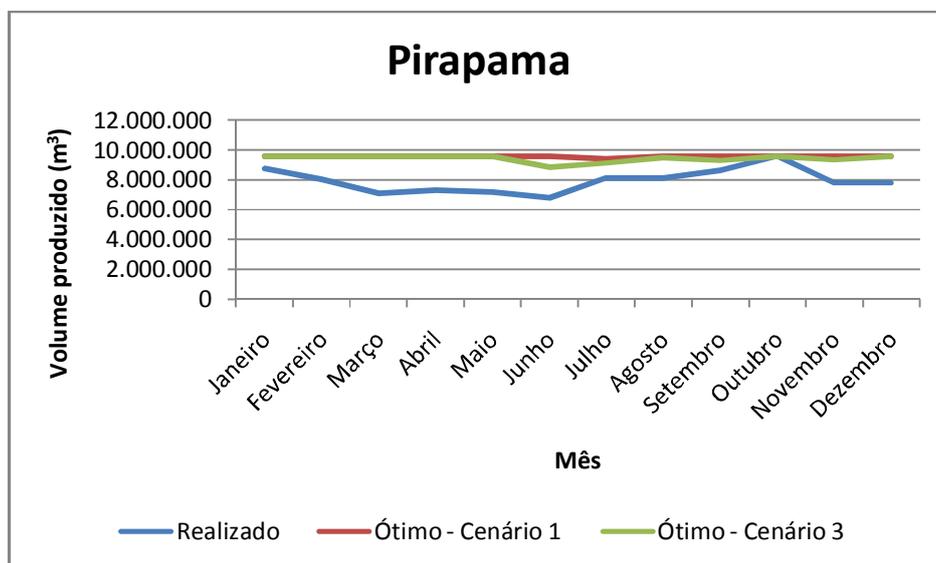
Na Figura 16 é possível visualizar como foi modificada a participação dos sistemas na produção anual neste novo contexto. Temos que, apesar dos problemas de qualidade da água, os sistemas Tapacurá e Pirapama continuam tendo a maior participação no volume anual produzido, o que já era de se esperar, considerando que são os dois maiores sistemas de abastecimento não só da RMR, mas do estado de Pernambuco, e não varia a proporção deles em relação ao ótimo do cenário atual (1). Além disso, ocorreram variações de apenas 1% em outros quatro sistemas, aumento em Gurjaú e Suape, bem como diminuição em Alto do Céu e Botafogo.

Já em comparação com as contribuições anuais de cada sistema com o realizado pela COMPESA em 2013 houve uma redução nas participações dos sistemas Tapacurá, Botafogo, Caixa D'Água e Marcos Freire, além de aumento dos sistemas Gurjaú (1%) e Pirapama, tendo esse último um aumento de 7%, reforçando assim a sinalização de que o sistema Pirapama deve ser mais explorados em busca da minimização da soma dos custos de energia elétrica e tratamento, como já indicado na otimização do cenário atual.



**Figura 16 - Participação dos sistemas integrados na produção anual no cenário de piora da qualidade da água de Pirapama**

Ainda sobre o comportamento da produção do sistema Pirapama, apresentamos a Figura 17, onde fica evidente a sua subutilização pela COMPESA atualmente, uma vez que o volume produzido não é muito diferente do ótimo sob as condições atuais (cenário 1), o que explica o aumento nos custos apresentados no início desta seção.



**Figura 17 - Comparação do volume produzido mensalmente pelo sistema Pirapama.**

Analisando as mudanças na variável de decisão em relação ao ótimo no cenário 1, isto é, na distribuição da água produzida pelos sistemas integrados para cada município por mês, temos que o aumento no custo de tratamento do sistema Pirapama impacta no abastecimento dos municípios Jaboatão dos Guararapes e Cabo de Santo Agostinho, não modificando a distribuição de sua água para Recife, como apresentado na Tabela 19. Isso acontece porque mesmo com o aumento nos seus custos de tratamento (R\$/m<sup>3</sup>) o sistema Pirapama ainda continua sendo o sistema de menor custo a atender Recife, consequência da sua eficiência energética, já explicada anteriormente. Por outro lado, em junho e setembro, o abastecimento de Jaboatão dos Guararapes que no cenário 1 era realizado por Pirapama foi substituído pelo sistema Gurjaú, que no ano é o sistema com o m<sup>3</sup> mais barato (R\$ 1,89 contra R\$ 1,91 de Pirapama). Já o município do Cabo de Santo Agostinho teve a substituição do sistema Pirapama pelo sistema Suape nos meses de julho a setembro e novembro.

**Tabela 19 - Variação no volume de água (m<sup>3</sup>) alocado por sistema para cada município na solução ótima do cenário 3 em relação ao ótimo do cenário 1**

<b>SISTEMA INTEGRADO</b>	<b>MUNICÍPIO ATENDIDO</b>	<b>Junho</b>	<b>Julho</b>	<b>Agosto</b>	<b>Setembro</b>	<b>Novembro</b>	<b>TOTAL</b>
<b>GURJAÚ</b>	<b>Cabo de Santo Agostinho</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>
	<b>Jaboatão dos Guararapes</b>	752.800	0	0	52.000	0	<b>804.800</b>
<b>PIRAPAMA</b>	<b>Recife</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>
	<b>Cabo de Santo Agostinho</b>	0	-294.700	-98.900	-256.700	-240.290	<b>-890.590</b>
	<b>Jaboatão dos Guararapes</b>	-752.800	0	0	-52.000	0	<b>-804.800</b>
<b>SUAPE</b>	<b>Cabo de Santo Agostinho</b>	0	294.730	98.930	256.700	240.270	<b>890.630</b>
	<b>Ipojuca</b>	0	0	0	0	0	<b>0</b>

Neste cenário de piora na qualidade da água da barragem Pirapama a solução ótima apontou para um aumento de 12,17% (R\$ 5.468.122,15) no custo da COMPESA se comparado ao ótimo do cenário 1, que apresenta as condições atuais de qualidade da água de todos os sistemas. A partir do método dos custos evitados podemos inferir que esse é o custo evitado pela COMPESA devido à qualidade da água da barragem Pirapama ser classificada como mesotrófica e não hipereutrófica, no que se refere ao seu estado trófico, podendo aquele ser considerado o valor de uso da qualidade da água da barragem Pirapama. Observa-se ser este valor maior do que o dado à qualidade da água captada pelo sistema Tapacurá (R\$ 3.874.662,18) apresentado na

seção 5.2, o que pode ser explicado pela maior participação do sistema Pirapama na produção de água que abastece a RMR em todos os cenários.

#### **5.4 Cenário 4 ó considerando o custo de oportunidade do sistema Tapacurá**

Neste cenário foi feita uma simulação de mudança nos custos de energia e de tratamento do sistema Tapacurá de forma que o mesmo passaria a distribuir água para os municípios que atende durante todos os meses do ano, de forma que não tenha alocação nula. Para que isso ocorra é preciso encontrar o custo de oportunidade, ou seja, o maior custo admissível, que ainda compensa operar o sistema Tapacurá para cada mês do ano na solução ótima, que é dado pela diferença entre o custo real e o custo reduzido (Lins e Calôba, 2006), esse último encontrado no resultado da solução ótima do cenário 1, apresentado no relatório de saída do GAMS como o valor marginal da variável de decisão quando ela é nula, ou seja, quando o sistema não distribui água para determinado município em algum período do ano.

Tendo em vista que, em média, 45% do custo mensal por m<sup>3</sup> do sistema Tapacurá se deve às despesas com energia e 55% com tratamento (produtos químicos), o custo reduzido foi abatido do custo mensal (com tratamento e energia elétrica) desse sistema nessa mesma proporção. Uma vez que na solução ótima do cenário 1 o sistema Tapacurá apresentou alocação nula para dois municípios em alguns períodos, Jaboatão dos Guararapes e São Lourenço da Mata, foi considerando no presente cenário o menor custo de oportunidade dentre os dois municípios. Dessa forma, apresentamos na Tabela 20 o custo de oportunidade mensal do sistema Tapacurá nos meses de junho a dezembro, período em que a variável de decisão apresentou valor igual a zero na solução ótima do cenário 1.

A partir da otimização no GAMS do cenário 4 observou-se uma redução no valor da função-objetivo de 6,98% (R\$ 3.138.175,76) em relação à solução ótima no cenário 1 (condições atuais) e de 11,47% (R\$ 5.414.987,10) se comparado com o realizado pela COMPESA em 2013. Esses resultados mostram a economia que a empresa de abastecimento teria durante um ano caso investisse no sistema Tapacurá na busca pela redução de seus custos de energia e de tratamento, através da instalação de bombas mais eficientes ou políticas de melhoria da qualidade da água da bacia Tapacurá, por exemplo. Também torna possível a comparação dos custos dos investimentos necessários com o benefício, mensurado como a redução nos seus custos.

Contudo, quando comparado com o cenário de melhoria da qualidade da água de Tapacurá (cenário 2), em que o mesmo ainda apresentou alocação nula para o município de Jaboaão dos Guararapes por três meses, a presente simulação apresentou um aumento de 1,8% (R\$ 736.486,42) no custo anual da firma, evidenciando que a melhoria da qualidade da água desse sistema é um fator mais impactante nos custos da COMPESA do que seu custo de oportunidade.

**Tabela 20 - Custo de oportunidade do sistema Tapacurá nos meses de Junho a Dezembro (R\$/m<sup>3</sup>).**

Mês/Custo de Oportunidade	Custo de Oportunidade de Energia (R\$/m <sup>3</sup> )	Custo de Oportunidade de Tratamento (R\$/m <sup>3</sup> )	Custo de Oportunidade Total (R\$/m <sup>3</sup> )
<b>Jun</b>	0,05	0,10	0,15
<b>Jul</b>	0,04	0,07	0,11
<b>Ago</b>	0,05	0,09	0,15
<b>Set</b>	0,04	0,07	0,11
<b>Out</b>	0,08	0,10	0,18
<b>Nov</b>	0,06	0,08	0,15
<b>Dez</b>	0,07	0,09	0,15

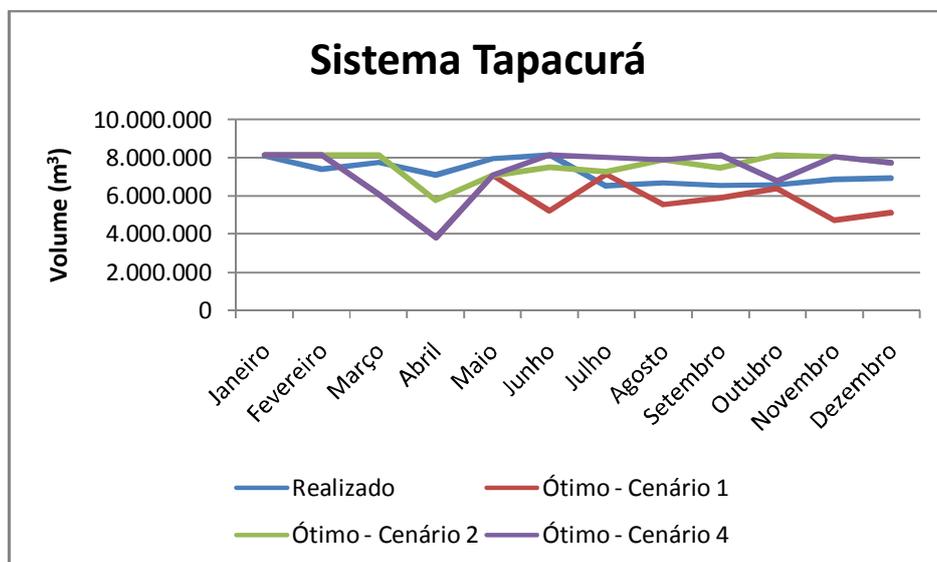
Decompondo a diminuição dos custos nota-se que a maior redução permaneceu no custo de energia, com 7,97% em relação ao cenário 1 e 12,93% quando comparando com o realizado no ano de 2013 pela COMPESA. Enquanto o custo de tratamento apresentou uma queda de 5,73% e 9,59%, respectivamente. Apesar da redução no custo real para se chegar ao custo de oportunidade ter sido em maior proporção nos custos de tratamento do sistema Tapacurá esse resultado está de acordo com o esperado, uma vez que em seis dos nove sistemas integrados da RMR a participação do custo de energia é maior do que a do custo de tratamento mensalmente.

Em relação ao volume anual produzido por cada sistema integrado quando comparado com o ótimo do cenário atual (1) destacam-se o aumento de 20% no volume produzido no ano pelo sistema Tapacurá e a paralisação das atividades do sistema Marcos Freire, que não produziria durante todo o ano. Além disso, observa-se uma redução de 40% na produção do sistema Alto do Céu e de 34% do sistema Caixa D'Água. Salientamos que, como esperado, os

sistemas mais afetados atendem a pelo menos um município que também recebe água do sistema Tapacurá.

Além disso, mesmo apresentando valor nulo para a variável de decisão em alguns meses no cenário 2 (melhoria da qualidade da água de Tapacurá), o volume total produzido no ano pelo sistema Tapacurá nesse cenário foi 3,55% maior do que no cenário 4, apesar de em ambos os cenários esse volume ter sido em torno de 20% maior do que o da solução ótima do cenário 1 (condições atuais).

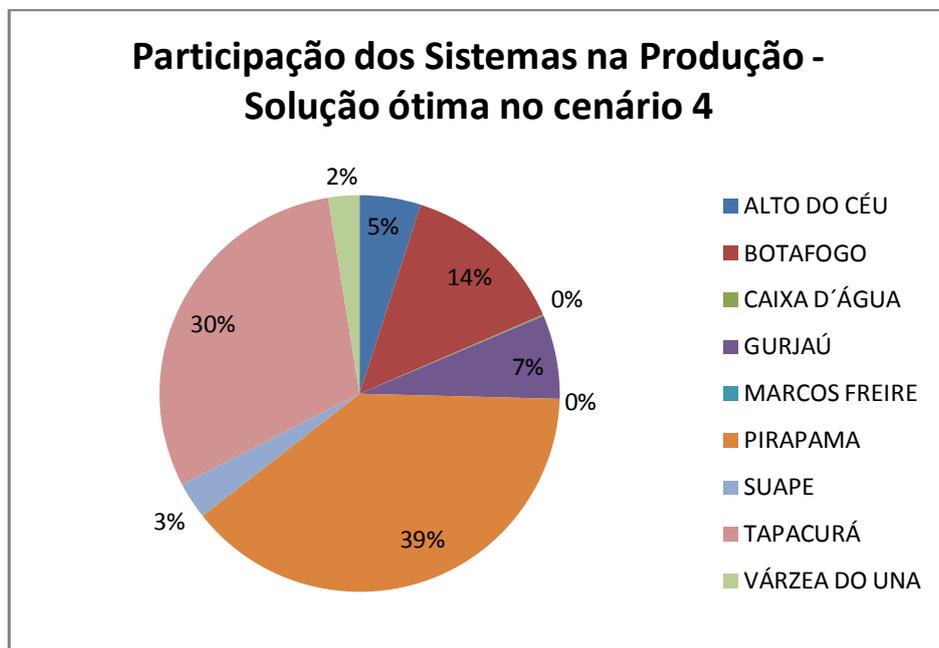
A Figura 18 representa o volume mensal produzido pelo sistema Tapacurá em cada um dos cenários, permitindo observar que a produção é menor no mês de abril em todas as situações, inclusive no realizado pela COMPESA, que nos meses de janeiro, fevereiro e maio a solução ótima dos três cenários coincide e que em todos os meses do segundo semestre o volume produzido segundo os cenários 2 e 4 do que o realizado pela empresa em 2013, além de apresentarem comportamento mais estável do que o volume mensal produzido no ótimo do cenário 1.



**Figura 18 - Comparação do volume produzido mensalmente pelo sistema Tapacurá.**

Na Figura 19 é apresentada a participação de cada sistema integrado no volume produzido no ano para a RMR, observando-se pequenas variações em relação ao ótimo do cenário 1, apresentando um aumento de 5% na participação do sistema Tapacurá e redução dos

sistemas Alto do Céu (4%) e Várzea do Una (1%). Por outro lado, em relação ao realizado pela COMPESA em 2013, manteve o mesmo percentual de participação dos sistemas Tapacurá, Botafogo e Gurjaú, aumentou a de Pirapama (7%) como esperado de acordo com os resultados anteriores, e reduziu, mesmo que em pequena proporção, a participação dos demais na produção anual. Quando confrontado com os resultados do cenário 2, nota-se uma diminuição de 1% na participação do sistema Tapacurá na produção anual e o aumento, na mesma proporção, na participação do sistema Alto do Céu, que substituiu parcialmente o primeiro no abastecimento de Recife.



**Figura 19 - Participação dos sistemas integrados na produção anual no cenário que considera o custo de oportunidade do sistema Tapacurá.**

Na análise da solução ótima da variável de decisão quando comparada com a do cenário 1 (condições atuais), observou-se que o sistema Tapacurá passou a alocar água todos os meses para todos os seus municípios atendidos, como esperado, uma vez que no cenário 4 foi considerado o custo de oportunidade sistema Tapacurá nos meses de junho a dezembro. Destacando-se o aumento de 112% no volume anual alocado pelo sistema para o município de Jaboatão dos Guararapes e de 98% para São Lourenço da Mata. Ainda, cresceu em 19% o volume destinado a Recife e 5% a Camaragibe.

As alocações nulas dos demais sistemas do cenário 1 se mantiveram e alguns sistemas, como Caixa D'Água, Marcos Freire e Várzea do Una, passaram a ter alocação nula em mais alguns meses. Além disso, o sistema Alto do Céu passou a fazer parte do grupo dos sistemas integrados com sem alocação para alguns municípios em determinados períodos, não distribuindo água para Recife nos meses de junho, novembro e dezembro. No Anexo I, Tabela I.3 é apresentada a solução ótima da variável de decisão do modelo para o presente cenário.

Foram também testados outros dois cenários, onde cada um considerava o custo de oportunidade de um dos sistemas Caixa D'Água e Marcos Freire, os quais na solução ótima do cenário 1 apresentaram maiores períodos sem alocação de água para pelo menos um dos municípios que podem atender. Contudo, a redução no valor da função objetivo foi inexpressiva, menos de 0,2% em ambos os cenários.

## 6. CONCLUSÕES

O presente estudo propõe uma plataforma capaz de determinar a quantidade ótima de água distribuída a cada município pelos sistemas integrados de abastecimento de água de forma a garantir a minimização dos custos de energia elétrica e de tratamento, esse último considerado no modelo como despesas com produtos químicos. A partir do modelo é possível calcular os custos reduzidos e os custos de oportunidade dos sistemas integrados, bem como o valor de uso da qualidade da água.

Como estudo de caso, para validação do modelo, foram utilizados dados da região metropolitana do Recife, que enfrenta problemas de escassez e apresenta um complexo sistema de abastecimento de água, conforme apresentado no Capítulo 3. A partir do modelo desenvolvido e das otimizações executadas através do *software* GAMS verificou-se que, sob as condições atuais, num ano de pouca disponibilidade hídrica é possível uma redução de 4,82% nos seus custos e, para isso, a principal mudança deve ser o aumento no volume produzido pelo sistema Pirapama em 20,73%, mesmo no cenário em que foi simulada a piora na qualidade da água captada e tratada por esse sistema a partir do aumento nos seus custos de tratamento.

Pelos resultados, discutidos no Capítulo anterior, conclui-se que os sistemas mais modernos, como é o caso do Pirapama, têm conseguido contribuir para a redução nos custos das empresas que atuam nesse setor. No caso desse sistema, o fato de ter o menor custo de energia elétrica por  $m^3$  pode ser explicado, de acordo com a Coordenação de Eficiência Energética da COMPESA, pelos seguintes fatores: opera com motores de alto rendimento, em virtude do desnível da barragem, permitindo que a energia potencial da barragem seja aproveitada diretamente no sistema de bombeamento e garante o aproveitamento do desnível geométrico com a ausência do poço de sucção, além disso, ela possui um inversor de frequência, que provoca uma economia no consumo de energia de aproximadamente 25%.

Além disso, a plataforma sinalizou os sistemas mais ineficientes, sendo capaz de indicar aos gestores as unidades que requerem medidas de redução nos custos de energia elétrica e de tratamento e ainda, através dos custos reduzidos (em quanto o custo real por  $m^3$  desses sistemas precisaria cair para que deixasse de ter valor nulo na distribuição ótima) e custos de oportunidade (maior custo admissível, que ainda compensa operar um dado sistema integrado na solução ótima

de forma que ele distribua água para todos os municípios da sua rede de atendimento) que o modelo também fornece, é possível visualizar em quanto os custos de cada sistema integrado precisam ser reduzidos para que seja vantajoso para a empresa mantê-lo em operação. Demonstrando, assim, ser uma ferramenta importante no processo de tomada de decisão dos gestores dos sistemas de abastecimento de água.

A redução nos custos de energia elétrica pode ocorrer através da modernização dos sistemas integrados, através da utilização dos fatores apontados acima para o caso do sistema Pirapama, ou ainda, através de resultados de modelos de apoio a decisão que auxiliem na gestão dos contratos de energia elétrica e, que incluam a não linearidade das tarifas de energia, conforme informações apresentadas na seção 4.1.1.1. Por outro lado, políticas de incentivo a redução na poluição dos reservatórios também devem ser estudadas, o que é possível com o auxílio de modelos como este ora desenvolvido, uma vez que o mesmo é capaz de estimar o valor de uso direto da qualidade da água dos mananciais, contribuindo para uma análise custo-benefício que apóie a decisão de políticas públicas neste sentido. Para a melhoria da qualidade da água, as políticas devem prover incentivos para que os agentes invistam em pesquisas de tecnologias que reduzam o uso de produtos químicos no tratamento da água, bem como levem a uma conscientização e capacitação da população sobre procedimentos para reduzir a poluição dos corpos hídricos. Incentivos a implantação de sistemas de tratamento de efluentes em indústrias e uma fiscalização eficaz que garanta o cumprimento de medidas regulatórias também devem ser providos por essas políticas.

Melhorias na plataforma ora desenvolvida podem ser feitas a partir da incorporação de dados sobre disponibilidade hídrica mensal no período estudado nos mananciais de cada sistema integrado. Esta é uma informação relevante para as empresas de abastecimento de água, e que pode ser obtida através da consideração das vazões de entrada de água nessas fontes. Com isso, a restrição e volume máximo produzido por sistema (equação 4.2) teria um limite diferente para cada mês.

Avanços no modelo também podem ser obtidos ao utilizar no lado direito da restrição de distribuição mínima de água por sistemas integrados para cada município (equação 4.3) a

demanda real, o que não foi possível no presente estudo em virtude das dificuldades para obtenção desse tipo de dado para a região do estudo de caso.

Contudo, apesar dessas limitações o modelo desenvolvido pode ser utilizado pelas empresas de abastecimento de água como uma ferramenta de apoio a decisão na busca por uma gestão mais eficiente. Além disso, os resultados apresentados para o caso da região metropolitana do Recife, em especial o da recomendação de aumento na exploração do sistema Pirapama, são bem pertinentes.

A partir do presente estudo podem ser realizadas análises custo-benefício da melhoria da qualidade da água de mananciais de sistemas de abastecimento, uma vez que a plataforma desenvolvida permite a estimação do valor de uso da qualidade da água de mananciais, o que pode ser interpretado como medida do benefício intangível desse bem público. Em trabalhos futuros sugere-se considerar no modelo de otimização a questão das águas subterrâneas e das perdas, problema comum enfrentado pelas empresas de abastecimento brasileiras. Pode-se também simular a exploração de sistemas integrados de abastecimento diante do aumento da demanda, dando apoio aos gestores no processo de tomada de decisão, inclusive na definição de estratégias de investimentos. A plataforma poderá também ser adaptada utilizando a programação estocástica, considerando coeficientes que no atual modelo foram assumidos constantes como variáveis aleatórias com uma definida distribuição de probabilidade. Funções não lineares envolvendo a variação dos preços e tarifas podem ser consideradas no mesmo modelo/plataforma utilizando programação não-linear.

## 7. REFERÊNCIAS

ABDALLA, Charles W., ROACH, Brian A., EPP, Donald J. (1992). *Valuing Environmental Quality Changes Using Averting Expenditures: An Application to Groundwater Contamination*. Land Economics, 68 (2), p. 163-169, May 1992, University of Wisconsin Press.

AGÊNCIA ESTADUAL DE PLANEJAMENTO E PESQUISA DE PERNAMBUCO ó CONDEPE/FIDEM. *Mapa mesorregiões de Pernambuco*. Recife. 2014. Disponível em <<http://www.bde.pe.gov.br/estruturacao geral/mesorregioes.aspx>> Acesso em 22 jan. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS ó ANA (Brasil). *Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado*. Engecorps/Cobrape, Brasília, v.2, 2010. Disponível em <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Download.aspx>> Acesso em 04 dez. 2013.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS ó APAC. *Sistema de Geoinformação Hidrometeorológico de Pernambuco*. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/#>> Acesso em 29 jan. 2014.

ANDRADE, P. R. G. S., CURI, W. F., CURI, R. C. *Alocação ótima de recursos de água associada a operação integrada de reservatórios de usos múltiplos- uma avaliação alternativa para reforço do abastecimento de Recife*. In: Seminário de Planejamento, projeto e operação de redes de abastecimento de água: O estado da arte e questões avançadas, João Pessoa-PB, v. 1. p. 1-14, (10-13 Junho), 2002.

ANTOCI, A., BARTOLONI, S. *Negative externalities, defensive expenditures and labour supply in an evolutionary context*. Environment and Development Economics, 9, p. 591-612, Cambridge University Press, printed in the United Kingdom, 2004.

BOARDMAN, Anthony E., GREENBERG, David H., VINING, Aidan R., WEIMER, David L. *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice*. Fourth Edition, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2011.

BOUZON, M., COELHO, A.S., RODRIGUEZ, C. M. T.. *Determinação do padrão de operação ótimo para o custo energético de um sistema de distribuição de água*. Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v.13, n. 2, p. 500-519, abr./jun. 2013.

BRAGA, Ricardo A. P., MONTENEGRO, Suzana M. G., CABRAL, Jaime J. S. P., AZEVEDO, José Roberto G. (2010). *Usos da terra e suas implicações sobre o reservatório da barragem na bacia do rio Tapacurá In: Reservatórios do Nordeste do Brasil: biodiversidade, ecologia e manejo*. Editora Recife, UFRPE, 2, p. 361-399, 2010, Recife ó PE.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. *Manual de orientação para cadastramento das diversas formas de abastecimento de água para consumo humano*. Brasília: Ministério da Saúde, 2007. 40 p. ó (Série A. Normas e Manuais Técnicos).

BROOKE, A., KENDRICK, D., MEERAN, A., RAMAN, R. *GAMS: A User's Guide*. GAMS Development Corporation, 1998.

CAI, X.M., MCKINNEY, D.C., LASDON, L.S. *Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management*. Journal of Water Resources Planning and Management ó ASCE 129 (1), 4617, 2003.

CARRERA-FERNANDEZ, J. e FERREIRA, P. M. *Otimização dos recursos hídricos ao nível de bacia hidrográfica: um estudo de caso para a bacia do rio formoso, na Bahia*. XXXI Encontro Nacional de Economia da ANPEC, Porto Seguro, Bahia, 2003.

CARRIJO, Ivaltemir de Barros ; REIS, L. F. R. ; CHEUNG, Peter Batista ; SOARES, Alexandre Kepler ; SILVA, Fernando das Graças Braga da. *Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Anais eletrônicos, 2003.

COELHO, B., ANDRADE-CAMPOS, A. *Efficiency achievement in water supply systems ó A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, p. 59-84, 2014.

COLIN, E. C. *Pesquisa Operacional: 170 aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas*. Rio de Janeiro LTC, 2007.

COMPANHIA ESTADUAL DE ÁGUAS E ESGOTOS ó CEDAE. *Norma Geral para Projeto e Construção de Estações Elevatórias de Água*. Rio de Janeiro, Novembro 2006.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO ó COMPESA. *Noções Básicas de Tarifação de Energia Elétrica*. Recife, 2008.

\_\_\_\_\_. *Relatório de Produção da COMPESA*. Gerência de Informação Operacional. Recife, Jan. a Dez. 2013.

\_\_\_\_\_. *Análise do Relatório da Administração ó Demonstrações Contábeis*. Recife, 18 abr. 2013. Disponível em: <<http://www.compesa.com.br/arquiosepublicacoes/demonstracoescontabeis>> Acesso em 30 jan. 2014.

\_\_\_\_\_. *Sistema de Informações Operacionais ó SIP*. Banco de Dados Alfanumérico. Edição especial, Região Metropolitana do Recife + Goiana. Gerência de Informação Operacional. Outubro, 2013.

\_\_\_\_\_. *Sistemas de Abastecimento*. Disponível em: <<http://www.compesa.com.br/saneamento/abastecimentodeagua>> Acesso em 22 jan. 2014.

DRAPER, A. J.; JENKINS, M. W.; KIRBY, K. W.; LUND, J. R. e HOWITT, R.E. *Economic-Engineering Optimization for California Water Management*. Journal of Water Resources Planning and Management, 129 (3), 155-164, 2003.

FRANCATO, A. L., BARBOSA, P. S. F. *Soluções de Compromisso na Tomada de Decisão sobre a Operação Diária de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 9, n.2, p. 39-50, Abr/Jun 2004.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico Brasileiro*, 2010.

JENKINS, M. W., LUND, J. R., HOWITT, R. E., DRAPER, A. J., MSANGI, S. M., TANAKA, S. K., RITZEMA, R. S., MARQUES, G. F. *Optimization of California's Water Supply System: Results and Insights*. Journal of Water Resources Planning and Management, 130, p. 271-280, July/August 2004.

LACHTERMACHER, G. *Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões: Modelagem em Excel*. Terceira edição, revista e atualizada. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LAMPARELLI, M. C. *Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento*. São Paulo: USP/ Departamento de Ecologia, 2004. 235 f. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2004.

LIM, S-R., SUH, S., KIM, J-H., PARK, H. S. *Urban water infrastructure optimization to reduce environmental impacts and costs*. Journal of Environmental Management, 91, p. 630-637, 2010.

LINS, M. P. E. e CALÔBA, G. M. *Programação Linear: com aplicações em teoria dos jogos e avaliação de desempenho (data envelopment analysis)*. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

MANOEL FILHO, J. *Exploração de água subterrânea em zona urbana: caso da Grande Recife*. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cuiabá-MT, 2004.

MCCONNELL, K. E., ROSADO, M. A. *Valuing discrete improvements in drinking water quality through revealed preferences*. Water Resources Research, v. 36, n. 6, p. 1575-1582, June, 2000.

MONTENEGRO, S. M. G. L., CABRAL, J. J. S. P., PAIVA, A. L. R., MONTENEGRO, A. A. A., DEMETRIO, J. G. A., CAVALCANTE, G. L. *Águas Subterrâneas na Zona Costeira da Planície do Recife (PE): Evolução da Salinização e Perspectivas de Gerenciamento*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 14, n.3, p. 81-93, Jul/Set 2009.

MORAES, M. M. G. A. *Otimização Estática ou Técnicas de Programação Matemática*. Apostila, UFPE.

MORAES, Márcia M. G. Alcoforado de, SAMPAIO, Yoni, CIRILO, José Almir (2006). *Integração dos Componentes Econômico e Hidrológico na Modelagem de Alocação Ótima de Água para Apoio a Gestão de Recursos Hídricos: Uma Aplicação na Bacia do Rio Pirapama*. Revista Economia, v. 7, n. 2, p. 331-364, maio-agosto 2006, Brasília-DF.

MORAES, M. M. G. A.; CAI, X.; RINGLER, C.; ALBUQUERQUE FILHO, B. E. M.; ROCHA, S. P. V.; AMORIM FILHO, C. A. G.. *Joint Water Quantity-Quality Management in a*

*Biofuel Production Area - An Integrated Economic-Hydrologic Modeling Analysis*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 136, p. 502-511, 2010.

MOTTA, R. S. da. *Economia ambiental*. Editora FGV, Rio de Janeiro, 2006.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos - SRH. Companhia Pernambucana de Saneamento ó COMPESA. *Manual de Operações do Projeto de Sustentabilidade Hídrica ó PSHPE*. Recife, v. 1, p. 8, 2012. Disponível em <[http://www.srh.srh.pe.gov.br/site/attachments/article/309/MANUAL%20DE%20OPERA%C3%87OES\\_PSHPE.pdf](http://www.srh.srh.pe.gov.br/site/attachments/article/309/MANUAL%20DE%20OPERA%C3%87OES_PSHPE.pdf)> Acesso em 04 dez. 2013.

ROSAL, M. C. F.; ASFORA, M. C.; TORRES, A. S. C. G. *Desafios e Ações para o Gerenciamento da Outorga de Água Subterrânea em Pernambuco*. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves-RS. Anais eletrônicos, 2013.

ROSENTHAL, R. E. *GAMS: A User's Guide*. GAMS Development Corporation, Washington, DC, 2006.

SILVA, S. C. da; RIBEIRO, M. M. R.. *Enquadramento dos Corpos D'água e Cobrança pelo Uso da Água na Bacia do Rio Pirapama - PE*. En. Sanit. Amb., v. 11, n. 4, p. 371-379, out/dez 2006.

SIMON, C. P., BLUME, L. *Matemática para Economistas* (tradução Claus Ivo Doering). Porto Alegre: Bookman, 2004.

THOMAS, Janet M., CALLAN, Scott J. (2010). *Economia Ambiental: fundamentos, políticas e aplicações* (tradução Antonio Cláudio Lot, Marta Reyes Gil Passos). São Paulo: Cengage Learning, 2010.

WURBS, R. A. *Reservoir-System Simulation and Optimization Models*. Journal of Water Resources Planning and Management, 119(4), 455-472, 1996.

ZECCHIN, A.C. *Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization*. Mathematical and Computer Modelling, v.44, n.5-6, p.451-468. 2006.

## **ANEXOS**

**Anexo I - Tabela I.1 ó Alocação ótima de água (m<sup>3</sup>) no cenário 2 - melhoria da qualidade da água de Tapacurá.**

N.	SISTEMA INTEGRADO	MUNICÍPIO ATENDIDO	Jan-13	Feb-13	Mar-13	Apr-13	May-13	Jun-13	Jul-13	Aug-13	Sep-13	Oct-13	Nov-13	Dec-13	TOTAL
1	ALTO DO CÉU	Olinda	129,330	129,330	129,330	129,330	129,330	129,330	44,223	129,330	129,330	129,330	129,330	129,330	1,466,853
		Recife	1,923,900	743,540	162,650	2,205,500	2,205,500	0	416,390	353,620	787,820	1,292,700	0	0	10,091,620
2	BOTAFOGO	Abreu e Lima	298,930	198,700	291,800	318,990	185,540	297,130	276,140	235,550	505,030	342,190	339,260	425,330	3,714,590
		Igarassu	200,350	180,260	199,170	197,280	214,380	211,240	235,390	265,370	264,280	268,630	284,260	235,330	2,755,940
		Olinda	1,848,800	1,233,200	1,419,300	1,277,900	1,328,000	1,307,700	1,617,900	1,473,000	1,212,700	1,255,800	1,412,800	1,796,600	17,183,700
		Paulista	1,300,000	1,374,700	1,235,000	1,094,500	1,392,500	1,281,400	1,530,300	1,685,900	1,289,400	1,499,000	1,148,600	1,108,400	15,939,700
3	CAIXA D'ÁGUA	Recife	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Olinda	0	0	0	0	0	0	0	50,862	0	0	269,940	0	320,802
4	GURJAÚ/MATAPAGIPE	Cabo de Santo Agostinho	255,520	41,817	500,900	500,900	500,900	500,900	500,900	500,900	500,900	405,780	500,900	500,900	5,211,217
		Jaboatão dos Guararapes	1,020,500	0	244,960	0	0	1,186,800	1,939,600	1,939,600	1,887,600	2,034,800	1,939,600	1,939,600	14,133,060
5	MARCOS FREIRE	Recife	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Jaboatão dos Guararapes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	PIRAPAMA	Recife	6,063,100	6,041,400	4,380,000	4,633,700	4,380,000	6,063,100	6,063,100	6,063,100	6,063,100	6,063,100	5,986,800	5,793,300	67,593,800
		Cabo de Santo Agostinho	1,574,200	1,574,200	1,574,200	1,574,200	1,574,200	875,300	1,574,200	1,574,200	1,574,200	1,497,600	1,574,200	1,574,200	18,114,900
		Jaboatão dos Guararapes	1,947,300	1,969,000	3,630,500	3,376,800	3,630,500	2,646,200	1,765,100	1,947,300	1,947,300	2,023,900	2,023,600	2,217,200	29,124,700
7	SUAPE	Cabo de Santo Agostinho	0	0	480,600	931,850	449,650	1,086,500	791,770	612,330	829,800	643,070	243,460	438,310	6,507,340
		Ipojuca	125,280	107,550	167,810	160,180	173,280	160,450	165,800	165,800	160,450	165,800	160,450	114,890	1,827,740
8	TAPACURÁ	Camaragibe	1,170,200	1,170,200	1,170,200	1,084,300	1,163,600	1,170,200	823,510	1,065,200	1,004,200	994,770	1,085,200	1,057,500	12,959,080
		Jaboatão dos Guararapes	523,080	523,080	753,950	753,950	475,920	0	0	375,230	0	698,490	526,490	215,540	4,845,730
		Recife	6,403,000	6,403,000	6,172,100	3,888,500	5,400,700	6,266,300	6,403,000	6,403,000	6,403,000	6,403,000	6,403,000	6,403,000	72,951,600
		São Lourenço da Mata	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068
9	VÁRZEA DO UNA	São Lourenço da Mata	687,780	484,840	317,390	425,630	493,700	495,660	696,240	721,810	711,860	704,060	704,510	718,210	7,161,690
		Camaragibe	52,721	63,698	99,442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	215,861
<b>TOTAL</b>			<b>25,556,059</b>	<b>22,270,583</b>	<b>22,961,370</b>	<b>22,585,578</b>	<b>23,729,768</b>	<b>23,710,278</b>	<b>24,875,631</b>	<b>25,594,170</b>	<b>25,303,038</b>	<b>26,454,088</b>	<b>24,764,468</b>	<b>24,699,708</b>	

**Anexo I - Tabela I.2 ó Alocação ótima de água (m<sup>3</sup>) no cenário 3 - piora da qualidade da água de Pirapama.**

N.	SISTEMA INTEGRADO	MUNICÍPIO ATENDIDO	Jan-13	Feb-13	Mar-13	Apr-13	May-13	Jun-13	Jul-13	Aug-13	Sep-13	Oct-13	Nov-13	Dec-13	TOTAL	
1	ALTO DO CÉU	Olinda	129,330	129,330	129,330	129,330	129,330	92,124	44,223	129,330	129,330	129,330	129,330	129,330	1,429,647	
		Recife	1,923,900	743,540	2,205,500	2,205,500	2,205,500	2,242,700	416,390	2,205,500	2,205,500	2,205,500	2,205,500	2,205,500	22,970,530	
2	BOTAFOGO	Abreu e Lima	298,930	198,700	291,800	318,990	185,540	297,130	276,140	235,550	505,030	342,190	339,260	425,330	3,714,590	
		Igarassu	200,350	180,260	199,170	197,280	214,380	211,240	235,390	265,370	264,280	268,630	284,260	235,330	2,755,940	
		Olinda	1,848,800	1,233,200	1,419,300	1,277,900	1,328,000	1,344,900	1,617,900	1,473,000	1,212,700	1,255,800	1,412,800	1,796,600	17,220,900	
		Paulista	1,300,000	1,374,700	1,235,000	1,094,500	1,392,500	1,281,400	1,530,300	1,685,900	1,289,400	1,499,000	1,148,600	1,108,400	15,939,700	
3	CAIXA D'ÁGUA	Recife	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	165,920	0	165,920	
		Olinda	0	0	0	0	0	0	0	50,862	0	0	0	269,940	0	320,802
4	GURJAÚ/MATAPAGIPE	Cabo de Santo Agostinho	255,520	41,817	500,900	500,900	500,900	500,900	500,900	405,780	500,900	405,780	405,780	500,900	5,020,977	
		Jaboatão dos Guararapes	1,020,500	0	244,960	1,939,600	0	1,939,600	1,939,600	2,034,800	1,939,600	2,034,800	2,034,800	1,939,600	17,067,860	
5	MARCOS FREIRE	Recife	0	0	0	0	0	0	0	0	0	219,060	219,060	219,060	657,180	
		Jaboatão dos Guararapes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,871	0	31,871	63,742	
6	PIRAPAMA	Recife	6,063,100	6,041,400	4,380,000	6,063,100	4,380,000	6,063,100	6,063,100	6,063,100	6,063,100	6,063,100	6,063,100	6,063,100	5,609,600	68,915,800
		Cabo de Santo Agostinho	1,574,200	1,574,200	1,574,200	1,574,200	1,574,200	875,300	1,279,500	1,195,200	1,317,500	1,054,200	826,310	1,574,200	15,993,210	
		Jaboatão dos Guararapes	1,947,300	1,969,000	3,630,500	1,947,300	3,630,500	1,893,400	1,765,100	2,227,400	1,895,300	2,467,300	2,455,000	2,400,800	28,228,900	
7	SUAPE	Cabo de Santo Agostinho	0	0	480,600	931,850	449,650	1,086,500	1,086,500	1,086,500	1,086,500	1,086,500	1,086,500	438,310	8,819,410	
		Ipojuca	125,280	107,550	167,810	160,180	173,280	160,450	165,800	165,800	160,450	165,800	160,450	114,890	1,827,740	
8	TAPACURÁ	Camaragibe	1,170,200	1,170,200	1,170,200	1,084,300	1,163,600	1,170,200	710,830	976,110	907,180	889,910	980,760	966,830	12,360,320	
		Jaboatão dos Guararapes	523,080	523,080	753,950	243,730	475,920	0	0	0	0	223,220	0	0	2,742,980	
		Recife	6,403,000	6,403,000	4,129,200	2,459,100	5,400,700	4,023,600	6,403,000	4,551,100	4,985,300	5,271,000	3,736,200	4,162,100	57,927,300	
		São Lourenço da Mata	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	0	2,001	0	0	0	0	194,409	
9	VÁRZEA DO UNA	São Lourenço da Mata	687,780	484,840	317,390	425,630	493,700	495,660	728,310	751,880	743,930	736,130	736,580	750,280	7,352,110	
		Camaragibe	52,721	63,698	99,442	0	0	0	112,680	89,113	97,065	104,860	104,410	90,712	814,701	
<b>TOTAL</b>			25,556,059	22,270,583	22,961,320	22,585,458	23,729,768	23,710,272	24,875,663	25,594,296	25,303,065	26,453,981	24,764,560	24,699,643		

**Anexo I - Tabela I.3 ó Alocação ótima de água (m<sup>3</sup>) no cenário 4 ó custo de oportunidade do sistema Tapacurá.**

N.	SISTEMA INTEGRADO	MUNICÍPIO ATENDIDO	Jan-13	Feb-13	Mar-13	Apr-13	May-13	Jun-13	Jul-13	Aug-13	Sep-13	Oct-13	Nov-13	Dec-13	TOTAL
1	ALTO DO CÉU	Olinda	129,330	129,330	129,330	129,330	129,330	129,330	44,223	129,330	129,330	129,330	129,330	129,330	1,466,853
		Recife	1,923,900	743,540	2,205,500	2,205,500	2,205,500	0	416,390	353,620	787,820	2,205,500	0	0	13,047,270
2	BOTAFOGO	Abreu e Lima	298,930	198,700	291,800	318,990	185,540	297,130	276,140	235,550	505,030	342,190	339,260	425,330	3,714,590
		Igarassu	200,350	180,260	199,170	197,280	214,380	211,240	235,390	265,370	264,280	268,630	284,260	235,330	2,755,940
		Olinda	1,848,800	1,233,200	1,419,300	1,277,900	1,328,000	1,307,700	1,617,900	1,473,000	1,212,700	1,255,800	1,412,800	1,796,600	17,183,700
		Paulista	1,300,000	1,374,700	1,235,000	1,094,500	1,392,500	1,281,400	1,530,300	1,685,900	1,289,400	1,499,000	1,148,600	1,108,400	15,939,700
3	CAIXA D'ÁGUA	Recife	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Olinda	0	0	0	0	0	0	0	0	50,862	0	0	269,940	0
4	GURJAÚ/MATAPAGIPE	Cabo de Santo Agostinho	255,520	41,817	500,900	500,900	500,900	500,900	500,900	500,900	500,900	405,780	500,900	500,900	5,211,217
		Jaboatão dos Guararapes	1,020,500	0	244,960	1,939,600	0	527,120	1,939,600	1,939,600	1,198,600	2,034,800	1,939,600	1,939,600	14,723,980
5	MARCOS FREIRE	Recife	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Jaboatão dos Guararapes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	PIRAPAMA	Recife	6,063,100	6,041,400	4,380,000	6,031,200	4,380,000	5,926,500	6,063,100	6,063,100	6,063,100	6,063,100	5,986,800	5,793,300	68,854,700
		Cabo de Santo Agostinho	1,574,200	1,574,200	1,574,200	1,574,200	1,574,200	875,300	1,574,200	1,574,200	1,574,200	1,054,200	1,574,200	1,574,200	17,671,500
		Jaboatão dos Guararapes	1,947,300	1,969,000	3,630,500	1,979,200	3,630,500	2,782,900	1,011,200	1,947,300	1,947,300	2,467,300	2,023,600	2,217,200	27,553,300
7	SUAPE	Cabo de Santo Agostinho	0	0	480,600	931,850	449,650	1,086,500	791,770	612,330	829,800	1,086,500	243,460	438,310	6,950,770
		Ipojuca	125,280	107,550	167,810	160,180	173,280	160,450	165,800	165,800	160,450	165,800	160,450	114,890	1,827,740
8	TAPACURÁ	Camaragibe	1,170,200	1,170,200	1,170,200	1,084,300	1,163,600	1,170,200	823,510	1,065,200	1,004,200	994,770	1,085,200	1,057,500	12,959,080
		Jaboatão dos Guararapes	523,080	523,080	753,950	211,860	475,920	523,080	753,950	375,230	689,020	255,090	526,490	215,540	5,826,290
		Recife	6,403,000	6,403,000	4,129,200	2,491,000	5,400,700	6,403,000	6,403,000	6,403,000	6,403,000	5,490,100	6,403,000	6,403,000	68,735,000
		São Lourenço da Mata	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068	32,068
9	VÁRZEA DO UNA	São Lourenço da Mata	687,780	484,840	317,390	425,630	493,700	495,660	696,240	721,810	711,860	704,060	704,510	718,210	7,161,690
		Camaragibe	52,721	63,698	99,442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	215,861
<b>TOTAL</b>			25,556,059	22,270,583	22,961,320	22,585,488	23,729,768	23,710,478	24,875,681	25,594,170	25,303,058	26,454,018	24,764,468	24,699,708	