

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

Marcus André Siqueira Campos

**QUALIDADE DE INVESTIMENTOS EM SISTEMAS PREDIAIS
DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL:
USO DE *PARTICLES SWARM OPTIMIZATION***

Campinas

2012

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

Marcus André Siqueira Campos

**QUALIDADE DE INVESTIMENTOS EM SISTEMAS PREDIAIS
DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL:
USO DE *PARTICLES SWARM OPTIMIZATION***

Tese apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na Área de Concentração de Edificações.

Orientadora: Profa. Dra. Marina Sangoi de Oliveira Ilha

Campinas, SP

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C157q Campos, Marcus André Siqueira
Qualidade de investimentos em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial: uso de particles swarm optimization / Marcus André Siqueira Campos. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Marina Sangoi de Oliveira Ilha.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Águas pluviais. 2. Avaliação econômica. 3. Instalações hidráulicas e sanitárias. 4. Água-conservação. I. Ilha, Marina Sangoi de Oliveira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Quality of investments in rainwater harvesting systems: use of particles swarm optimization

Palavras-chave em Inglês: Rainwater, Economic assessment, Plumbing and sanitary, Water - conservation

Área de concentração: Edificações

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Ariovaldo Denis Granja, Simar Vieira de Amorim, EneDIR Ghisi, Daniel Costa dos Santos

Data da defesa: 20-01-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

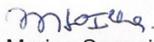
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Marcus André Siqueira Campos

**QUALIDADE DE INVESTIMENTOS EM SISTEMAS PREDIAIS
DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL:
USO DE PARTICLES SWARM OPTIMIZATION**

Tese apresentada ao Programa de pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na Área de Concentração de Edificações.

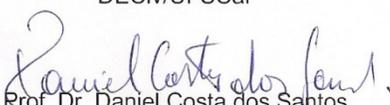
Aprovada em 20/01/2012 pela Banca Examinadora, constituída por:


Profa Dra. Marina Sangoi de Oliveira Ilha
Presidente e Orientadora – FEC/UNICAMP


Prof Dr. Ariovaldo Denis Granja
FEC/UNICAMP


Prof. Dr. Simar Vieira de Amorim
DECiv/UFSCar


Prof Dr. EneDir Ghisi
UFSC


Prof. Dr. Daniel Costa dos Santos
UFPR

Dedico este trabalho para minha Dila, que mesmo distante, cuidou e orou por mim em todas as etapas da minha vida (saudades eternas).

Aos meus pais (Marcus e Isabel) por acreditarem no meu sonho mais do que eu.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sem ele nada sou, nada tenho. Obrigado Senhor por segurar em minha mão quando a cruz foi pesada e me dizer “não desista”.

Aos meus pais, Marcus e Isabel, por todo o apoio moral, sentimental, amoroso, espiritual e financeiro. Sem vocês, nada disto teria acontecido. Amo vocês demais. Obrigado por tudo.

À minha Orientadora Profa. Dra. Marina Ilha pela paciência, dedicação, orientação e conselhos ao longo de todos esses anos.

À PRPG pela concessão da bolsa de BIG/PED por quatro anos que me fez aprender muito do que é ser um professor.

Para a banca de qualificação em nome do Prof.Dr. Ariovaldo Granja, Prof. Dr. Bastiaan e ao Prof. Dr. Orestes Gonçalves..

Ao Prof. Dr. Simar Amorim, por ter despertado em mim, esta vontade de seguir na vida acadêmica e por ter me dado a oportunidade de fazer meu mestrado sob sua orientação..

Ao meu irmão Wladimir, pela grande oportunidade de morarmos juntos no último ano e saber, que mesmo depois, de “grandes”, o nosso amor continua e continuará inabalável.

À minha irmã linda, Mabel, pelo seu amor e carinho.

Ao Msc. Eng. Computação Hugo Serrano Barbosa Filho por todo apoio e ajuda na formulação do algoritmo da PSO e elaboração do RainToolbox.

Aos amigos do LEPSIS: Luciana, Lais, Solange, Lia, Osvaldo, Leonel, Liwana, Gustavo, Sérgio, Paula e todos os outros membros que passaram por lá ao longo de todos estes anos.

Aos meus alunos que ajudei de alguma forma com pequenas orientações : Douglas, Stefânia e Ellen pela dedicação e ajuda em coletas e tratamentos de dados.

Aos professores do DAC/FEC.

À Paula e toda a equipe da Coordenação de Pós Graduação.

Aos meus amigos, que conheci em Campinas, e que tornaram esse tempo, um tempo também de alegria e amizade, compartilhando momentos que não serão esquecidos: Pedro, Iamara, Patrícia, Nathalie, Carlitos, Nelma, Alaor, Julia, Carlos, Philippe, Eduardo, entre tantos outros que tive o prazer de conhecer e conviver.

Aos meus amigos Claudius e Petrus pela amizade, conselhos e por servirem de modelo de onde quero chegar.

Aos meus tios, tias, primos e primas pelo amor e incentivo.

Aos amigos da LEMA ,Leonel, Marcelo, Luis, Mariana, Helena, Ronny, Johaine pelo apoio e aprendizado.

RESUMO

CAMPOS, M. A. S. Qualidade de investimentos em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial: uso de *particles swarm optimization*. Campinas. 2012. 90 fls. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas, 2012.

Os sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial tem como objetivos possibilitar o uso de fontes alternativas de água em atividades que prescindam da água potável nas edificações e também contribuir para a redução do escoamento superficial ocasionado pela impermeabilização do solo dos centros urbanos. O uso desses e de outros sistemas relacionados com a conservação de água nas edificações pode ser também atrativo do ponto de vista econômico, do que resulta um maior incentivo para a sua implementação. Para tanto, a análise da qualidade dos investimentos nesses sistemas deve ser considerada na tomada da decisão pela implantação de medidas voltadas para a mitigação do impacto ambiental da construção dos edifícios. O presente trabalho tem como objetivo propor uma ferramenta para a análise da qualidade de investimentos em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial, baseada na otimização do valor presente líquido dos investimentos necessários. Para tanto, é proposto o uso da técnica da *Particle Swarm Optimization*. A ferramenta desenvolvida foi utilizada para a avaliação da qualidade dos investimentos em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial em edificações representativas de três categorias tarifárias: pública, comercial e industrial. Os resultados obtidos indicam as oportunidades de investimentos nos referidos sistemas, a partir da consideração de cenários que contemplam ou não a cobrança da tarifa de esgoto decorrente do uso dessa fonte alternativa.

Palavras-chave: Sistemas prediais, *Particle Swarm Optimization*, qualidade de investimentos, aproveitamento de água pluvial, dimensionamento de reservatórios.

ABSTRACT

The main purposes of a Rainwater Harvesting systems is to allow the use of alternative water sources where potable water is not necessary and to contribute to reduce the surface runoff caused by the impervious areas in urban centers. The use of this system or any other technology that promotes water conservation in buildings can also be economically feasible, resulting in more incentives for their implementation. To achieve this goal, the quality of the investment's analysis must be considered when the decision making process is occurring, that way, the reduction of the impacts caused by is encouraging. The present work aims to propose a tool to analyze the quality of investments in rainwater harvesting systems, based on optimizing the net present value of the investments realized. It was proposed the use of the Particle Swarm Optimization technique. The developed tool was used to evaluate the quality of investments in buildings that uses rainwater representing three tariff categories: public, commercial and industrial. The results indicate the opportunities for invest in those systems, specially those scenarios that include or not the sewage rate , resulting from the use of this alternative water source.

Keywords: Plumbing system, particle swarm optimization, quality of the investments rainwater harvesting, reservoir sizing

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
SUMÁRIO	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL NOS EDIFÍCIOS	17
2.2 ESTIMATIVA DA OFERTA E DEMANDA DE ÁGUA PLUVIAL	20
2.3 DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS PARA APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL	24
2.4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA	28
2.5 OTIMIZAÇÃO DA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS	35
2.5.1 PSO	39
3 MÉTODO DE PESQUISA	47
3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA	48
3.1.1 <i>Desenvolvimento da ferramenta de otimização</i>	50
3.1.2 <i>Desenvolvimento dos estudos de caso</i>	51
3.1.2.1 <i>Determinação das entradas e saídas do fluxo de caixa para o cálculo do valor presente líquido</i>	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO	53
4.2 ESTUDOS DE CASO	58

4.2.1 Cálculo do Valor Presente Líquido.....	58
4.2.1.1 INVESTIMENTO INICIAL.....	58
4.2.1.2 Saídas do fluxo de caixa – custos de operação e manutenção.....	59
4.2.1.3 Entradas do fluxo de caixa – economias mensais.....	60
4.2.1.4 Taxa de desconto e duração do projeto.....	68
4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO INVESTIMENTO EM SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE ÁGUA PLUVIAL COM O EMPREGO DA PSO – APLICAÇÕES.....	69
4.3.1 Categoria tarifária 1 – pública.....	69
4.3.2 Categoria tarifária 2 –comercial.....	73
4.3.3 Categoria tarifária 3 – industrial.....	76
4.4 VALIDAÇÃO POR MEIO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS DO ALGORITMO DA PSO.....	79
5 CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS.....	86
APÊNDICE – ALGORITMO DA PSO.....	94

Lista de figuras

Figura 2-1: Topologias de vizinhança na PSO: a) totalmente conectada; b) local e c) focal.	43
Figura 2-2: Algoritmo básico da PSO.....	44
Figura 3-1: Delineamento da pesquisa. Estratégia empregada: estudo de caso.....	49
Figura 3-2: Fluxograma empregado para a determinação do VPL no desenvolvimento dos estudos de caso. E – Entrada mensal – proveniente da economia na conta d’água; i = tarifa de reajuste.....	51
Figura 4-1: Interface gráfica do programa <i>Rain Toolbox</i> - módulo de otimização.....	57
Figura 4-2: Interface gráfica do programa <i>Rain Toolbox</i> - módulo de simulação.....	57
Figura 4-3: Função de custo dos reservatórios de concreto. Os losangos representam os custos de execução (material e de mão-de-obra) aplicados por um construtora de médio porte da cidade de Campinas, SP. A linha contínua corresponde à função ajustada aos dados levantados.	59
Figura 4-4: Precipitação média mensal no período em análise, determinada a partir dos dados registrados pelo Posto Barão Geraldo, Campinas, SP – período: 1971 a 2009.....	62
Figura 4-5: Número de dias entre duas precipitações consecutivas, dados registrados pelo Posto Barão Geraldo, Campinas, SP – período: 1971 a 2009. A linha contínua representa a ocorrência acumulada do número de dias entre duas precipitações consecutivas.....	62
Figura 4-6: Valores de VPL correspondentes a diversos volumes de armazenamento, considerando a estrutura tarifária atual com (I) e sem (II) a tarifa de esgoto decorrente do uso da água pluvial e para acréscimos nesse valor de 100, 150 e 200% - aplicação 1 – categoria Pública.....	72
Figura 4-7: Valores de VPL correspondentes a diversos volumes de armazenamento, considerando a estrutura tarifária atual com (I) e sem (II) a tarifa de esgoto decorrente do uso da água pluvial e para acréscimos nesse valor de 100, 150 e 200% - aplicação 2 – categoria comercial.....	75
Figura 4-8: Valores de VPL correspondentes a diversos volumes de armazenamento, considerando a estrutura tarifária atual com (I) e sem (II) a tarifa de esgoto decorrente do uso da água pluvial e para acréscimos nesse valor de 100, 150 e 200% - aplicação 3 – categoria industrial.....	78
Figura 4-9: Análise comparativa dos parâmetros cognitivos e sociais da PSO com fator de inércia (ω) igual a 0,5, para a estrutura tarifária atual (A) e para acréscimos de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – categorias tarifárias: Pública, comercial e industrial.....	80
Figura 4-10: Análise comparativa do fator de inércia (ω) com C1=2; C2 =2 - considerando a estrutura tarifária atual (A) e para acréscimos de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – categoria tarifária 1 – Pública.....	81

Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Estimativa da demanda de água pluvial para usos não potáveis em edifícios.	24
Tabela 4-1: Despesas consideradas para a determinação do VPL dos estudos de caso.	60
Tabela 4-2: Estimativa da demanda de água pluvial – edificação representativa da categoria tarifária 1 - pública.	64
Tabela 4-3: Estimativa da demanda de água pluvial – edificação representativa da categoria tarifária 2 - comercial.	65
Tabela 4-4: Estimativa da demanda de água pluvial – edificação representativa da categoria tarifária 3 - industrial.	65
Tabela 4-5: Tarifa de serviços de abastecimento de água aplicadas pela concessionária de água e esgoto da cidade de Campinas - SANASA (valores em Reais, ano-base: 2011).....	67
Tabela 4-6: Comportamento dos reajustes da tarifa de abastecimento de água aplicados pela concessionária de água e esgoto local. Período: 2001-2009. Valores em porcentagem.	67
Tabela 4-7: Demanda diária de água pluvial da edificação representativa da categoria tarifária Pública	70
Tabela 4-8: Volumes e respectivos VPL (valor máximo), considerando a estrutura tarifária atual (A) e para reajustes de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – aplicação 1 – categoria Pública	70
Tabela 4-9: Demanda diária de água pluvial da edificação representativa da categoria tarifária comercial.....	73
Tabela 4-10: Volumes e respectivos VPL (valor máximo), considerando a estrutura tarifária atual (A) e para reajustes de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – aplicação 2 – categoria Pública.	74
Tabela 4-11: Demanda diária de água pluvial da edificação representativa da categoria tarifária industrial.....	76
Tabela 4-12: Volumes e respectivos VPL (valor máximo), considerando a estrutura tarifária atual (A) e para reajustes de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – aplicação 3 – categoria industrial.....	77

1 INTRODUÇÃO.

A sustentabilidade dos edifícios no tema água apresenta diferentes abordagens, sendo condição imprescindível o uso eficiente desse insumo, tanto pela redução de perdas e desperdícios como pelo uso de fontes alternativas à água potável disponibilizada pela rede pública de abastecimento, em atividades que prescindem de um insumo com esta qualidade.

Importante destacar que o uso de fontes de água não potável pressupõe a existência de um sistema de gestão da água na fase de uso, de modo a garantir a qualidade da água disponibilizada, preservando a saúde dos usuários.

Inserido nesse contexto, os sistemas de aproveitamento de água pluvial vem sendo gradativamente incorporados às edificações mais sustentáveis, reduzindo o consumo de água potável.

A qualidade econômica deve ser também incorporada à avaliação da sustentabilidade ambiental, de forma a tornar os investimentos na redução dos impactos ambientais atrativos sob o ponto de vista dos investidores.

Nesse contexto, a adequada estimativa do volume a ser reservado assume grande importância, uma vez que alguns estudos relatam que este componente representa cerca de 60 a 80% do custo total envolvido (HERNANDES *et al*, 2004; YRUSKA *et al* 2010).

Além disso, o volume reservado, confrontado com a oferta de água pluvial, é que determinará a parcela da demanda dessa fonte alternativa que poderá ser efetivamente utilizada e, em consequência, o quanto de retorno econômico, em termos da redução dos gastos com o uso da água potável, o sistema oferecerá.

Sendo assim, torna-se essencial para a qualidade econômica dos investimentos nesses sistemas, encontrar um volume ótimo que promova um equilíbrio entre investimentos e retornos econômicos mensais, ou seja, a análise da qualidade dos investimentos deve ser incorporada à tomada de decisão.

Para a análise da qualidade de investimentos, o emprego de opções reais tende a ser, em um futuro próximo, uma alternativa importante, pois permite valorar ações de flexibilidade, as quais são inerentes a diferentes sistemas dos edifícios.

Entretanto, ainda há carência de informações que não permite o cálculo do valor de opções reais de forma precisa, o que tem feito com que ainda os métodos tradicionais, baseados em fluxo de caixa descontado sejam ainda os mais empregados para esta análise, apesar das incertezas e da incapacidade de alteração do curso das medidas adotadas no futuro.

O período de retorno dos investimentos (*pay-back* atualizado), pela sua simplicidade e facilidade de determinação, foi essencialmente o indicador considerado na análise da qualidade dos investimentos dos primeiros programas de conservação de água consolidados desenvolvidos no país.

Contudo, esse indicador não permite medir a real capacidade no momento do investimento, e não possibilita comparações entre soluções diferentes.

Em função do exposto, esta tese propõe o emprego do valor presente líquido (VPL) para este fim, pois permite quantificar a real vantagem econômica do investimento além de ser útil em um processo de classificação de alternativas que são excludentes entre si.

Para a otimização do VPL, podem ser empregadas diferentes técnicas de otimização. Requisitos importantes para a seleção da técnica a ser utilizada são: rapidez, flexibilidade e adequabilidade ao problema em estudo.

A partir disso, essa tese propõe o uso da *Particle Swarm Optimization – PSO* para a otimização do VPL na avaliação da qualidade dos investimentos em sistemas de aproveitamento de água pluvial. Esta técnica permite incorporar variáveis futuras que possam interferir no problema de estudo, além de apresentar uma convergência rápida.

1.1 Objetivos

Considerando que a tomada de decisão para a implantação de sistemas de aproveitamento de água pluvial deva incorporar a análise da qualidade dos investimentos, trabalho objetiva fornecer uma ferramenta que possibilite essa análise, baseada na otimização do valor presente líquido dos investimentos realizados obtida por meio da *Particle Swarm Optimization (PSO)*.

Como objetivo secundário, pretende-se avaliar a qualidade de investimentos em sistemas de aproveitamento de água pluvial em estudos de caso representativos das categorias tarifárias pública, comercial e industrial, de modo a demonstrar a sua aplicabilidade e analisar o potencial do emprego desses sistemas de fontes alternativas de abastecimento para tornar as edificações mais sustentáveis no tema água.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta tese está estruturada em cinco capítulos. A introdução ao tema, com a sua contextualização e justificativas, é apresentada no capítulo 1.

O capítulo 2 contempla a revisão da literatura, com a caracterização dos principais componentes e apresentação dos aspectos a serem considerados no dimensionamento desses sistemas, com ênfase nos métodos usualmente empregados para a

determinação do volume de armazenamento; e na estimativa da demanda e da oferta de água pluvial.

Este capítulo apresenta também os conceitos relacionados com a avaliação econômica de empreendimentos, com ênfase nos métodos tradicionais empregados para este fim. Por último, é apresentada uma conceituação geral sobre técnicas de otimização, com ênfase na *Particle Swarm Optimization*, a qual foi selecionada para o desenvolvimento da ferramenta proposta nessa tese.

O método de pesquisa é apresentado no capítulo 3, seguido dos resultados da análise de sensibilidade e de aplicação da ferramenta desenvolvida, os quais são contemplados no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, com a apresentação das referências bibliográficas na sequência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está estruturada nos seguintes tópicos: caracterização do sistema predial de aproveitamento de água pluvial; estimativa da demanda e da oferta de água pluvial; apresentação dos métodos usualmente empregados para dimensionamento de reservatórios de sistemas de aproveitamento de água pluvial; avaliação da qualidade de investimentos nesses sistemas e, por fim, otimização da solução de problemas, com ênfase na técnica PSO.

2.1 Sistema de aproveitamento de água pluvial nos edifícios

O uso de água pluvial consiste em uma das importantes medidas para a gestão da água, contribuindo tanto para a economia de água potável como medida não estrutural de drenagem, a qual é realizada no próprio lote.

Sistemas de aproveitamento de água pluvial vêm sendo empregados desde milhares de anos antes de Cristo (GOULD; NISSEN-PETTERSEN, 1999; TOMAZ, 2003). Contudo, percebe-se que os problemas com o abastecimento de água e também com o aumento do escoamento superficial provocado pela crescente impermeabilização das cidades têm incrementado a sua utilização nos edifícios.

Importante ressaltar que o uso de água não potável nos edifícios pressupõe a existência de um sistema de gestão, uma vez que a responsabilidade da qualidade da água oferecida aos usuários deixa de ser responsabilidade da concessionária. Nesse sentido, CBCS (2009) destaca que:

“O uso de sistemas de fontes pode ser uma solução adequada para determinadas tipologias de edifícios, desde que sejam observados critérios de projeto, execução, operação e manutenção dos sistemas e que se implante um processo de

gestão – monitoramento e controle – e que se definam as responsabilidades pela eventual ocorrência de contaminação da água e de riscos de saúde dos usuários. Caso estes aspectos sejam negligenciados poderá haver um retrocesso no processo de difusão e evolução do emprego de sistemas de aproveitamento de fontes alternativas de água”.

Um sistema de aproveitamento de água pluvial é composto pelos seguintes subsistemas: coleta e transporte; reservação e tratamento.

O subsistema de coleta e transporte compreende a área de captação e o conjunto de tubulações e acessórios destinados a levar a água coletada até os subsistemas de reservação e de tratamento e, na sequência, para os pontos de consumo de água não potável no edifício.

Devem ser adotadas medidas no sentido de evitar o contato acidental entre a água potável e a não potável, tanto na fase de execução, com a adequada identificação das tubulações (cores diferenciadas), como na fase de uso, com a instalação de torneiras de acesso restrito e de avisos nos pontos de consumo, entre outras.

Conforme destacado por diferentes autores, a água pluvial pode apresentar poluentes ou, ao passar pela área de captação, sofrer contaminação (MAY, 2004; HERNANDES & AMORIM, 2006; SCORTEGANA *et al*, 2007; ROCHA, 2010; YAZIZ *et al*, 1989; SAZAKLI *et al*, 2007; DESPINS *et al* 2009).

Tendo em vista coletar água com menor contaminação, a NBR 15527 (ABNT, 2007) recomenda que, para fins de aproveitamento, seja considerada apenas a captação em áreas de coberturas. Adicionalmente, prevê o descarte da água de lavagem do telhado (*first-flush*).

O subsistema de tratamento deve propiciar a remoção dos poluentes, de forma a não prejudicar a saúde dos usuários. O grau de contaminação, contudo, pode variar em função de diferentes aspectos, destacando-se: época de chuvas e de estiagem, e

materiais e estado de conservação da área de captação, reservatórios e demais partes do sistema.

Vale destacar que o nível de tratamento depende não somente da qualidade da água captada, mas também do tipo de uso ao qual ela será destinada. Em Sautchuk *et al* (2005) e em ABNT (2007) podem ser encontrados requisitos qualitativos e quantitativos para a qualidade da água não potável em função do uso final.

O subsistema de reservação, por sua vez, deve ser exclusivo, sendo necessário também prever medidas que impeçam o contato da água não potável com a potável (conexão cruzada e retrossifonagem) nessa parte do sistema, tais como o emprego de válvulas de retenção de dupla checagem e previsão de separação atmosférica, conforme ilustrado por Peixoto (2008).

Podem ser utilizados um ou mais reservatórios no sistema, em função da sua posição e da localização dos pontos de consumo de água não potável. Disso decorre também a necessidade ou não de uma instalação elevatória.

Quando a oferta de água pluvial é muito superior à demanda de água não potável na edificação, o excedente pode ser infiltrado, contribuindo para uma maior sustentabilidade e possibilitando, em muitos casos, a gestão de 100% das águas pluviais no próprio lote.

O emprego da água pluvial na descarga de bacias sanitárias e lavagem de pisos implicará na geração de esgoto sanitário. Esse é um tópico importante a ser considerado quando da estimativa das economias advindas do emprego desses sistemas.

A maioria das concessionárias no Brasil tarifa o esgoto a partir do consumo de água potável, porém, a tendência é que, regulamentado o uso de fontes alternativas (água

pluvial, águas cinzas, etc), seja cobrada a taxa pela coleta de tratamento do esgoto gerado pelo uso dessas fontes.

2.2 Estimativa da oferta e demanda de água pluvial

A oferta de água pluvial depende basicamente do regime pluviométrico local, da área de captação e do coeficiente de aproveitamento do sistema.

Para a caracterização do regime pluviométrico, necessita-se conhecer não somente a altura de chuva precipitada, mas também como ela se distribui ao longo do tempo. Grandes períodos de estiagem conduzem normalmente à necessidade de reservação de maiores volumes (LIAW & TSAI, 2004).

Assim, a análise do potencial de aproveitamento de água pluvial normalmente é efetuada a partir de uma série histórica de dados de chuva.

Campos (2004) alerta sobre a importância do uso de dados diários de precipitação, pelo menos, para a estimativa da oferta de água pluvial para fins de aproveitamento.

Programas computacionais de simulação do comportamento de sistemas de infiltração de água pluvial, tais como o SWMM5 (Bentley, 2011), necessitam de dados de precipitação horários. Esta é a tendência também para os sistemas de aproveitamento de água pluvial, tendo em vista que médias ou totais diários podem levar a resultados imprecisos, pois se referem a grandes períodos de tempo.

Porém, dados de precipitação horários e, em alguns locais, até mesmo diários, não são facilmente encontrados. Não existem informações sobre chuvas locais com este detalhamento para grande parte dos municípios do país.

Agritempo (2010) apresenta séries históricas de precipitações para vários locais, em base diária, as quais têm sido empregadas para o dimensionamento de sistemas de aproveitamento de água pluvial no Brasil.

Ghisi *et al* (2012) avaliaram a possibilidade de utilizar séries históricas de curta duração para a estimativa da oferta futura da água pluvial no dimensionamento de sistemas de aproveitamento de água pluvial em residências.

Para tanto, foi desenvolvido um estudo de caso com dados de chuva da cidade de Santa Bárbara do Oeste, SP, o qual é caracterizado por um período chuvoso entre os meses de outubro e março, com uma precipitação média anual de 1379 mm/ano.

Os referidos autores concluíram que a duração recomendada para a série histórica depende da demanda de água pluvial da edificação em estudo. Para os cenários considerados no trabalho, essa duração variou entre 1 e 13 anos; contudo, para baixas demandas de água pluvial foi verificado que 1 ou 2 anos forneceriam resultados similares aos obtidos com séries históricas de maior duração.

Além disso, caso a oferta de água pluvial fosse maior (por exemplo, se a área do telhado fosse multiplicada por dois), seria necessário considerar séries com duração um pouco maior, porém, ainda consideradas de curta duração.

A partir da série histórica de dados de precipitação, o volume diário de água pluvial a ser aproveitado pode ser determinado a partir de ABNT (2007):

$$V_{\text{aprov}} = p \times A \times \eta \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

V_{aprov} – volume de água pluvial aproveitável (oferta de água pluvial), em m^3

p – precipitação diária, em m

A – área de coleta, em m^2

η – coeficiente de aproveitamento, adimensional.

O coeficiente de aproveitamento engloba o coeficiente de escoamento superficial (coeficiente de *run-off*) e as perdas existentes com descarte inicial, pela passagem pelos filtros e eventuais transbordamentos. O coeficiente de escoamento superficial expressa a relação entre o total precipitado e o total escoado.

A estimativa da demanda de água pluvial depende do tipo de uso que será dado à essa fonte alternativa. Dentre os usos que prescindem da água pluvial, destacam-se a descarga de bacias sanitárias, a irrigação de jardins e a lavagem de pisos e de automóveis.

Cohim (2009) apresenta uma proposta de emprego da água pluvial também para banho. Este uso, contudo, não será considerado no presente trabalho, pois pelo maior risco associado, acredita-se que o mesmo deva ser objeto de um maior número de pesquisas antes do incentivo a sua utilização generalizada.

As pesquisas que apresentam o consumo desagregado de água nos edifícios no Brasil para as diferentes tipologias são ainda escassas. Exemplos podem ser encontrados em Barreto & Medeiros (2008); Tomaz (2000) e Hernandez *et al* (2004). Destaca-se, contudo, que nem todas as tipologias de edifícios e usos que prescindem de água potável são considerados nos referidos estudos.

Barreto & Medeiros (2008), por exemplo, levantaram o consumo de água em lavatórios, torneiras de pia de cozinha, chuveiros, máquinas de lavar pratos e de lavar roupas e

bacias sanitárias. em sete residências com renda familiar entre R\$ 500,00 a R\$ 2.500,00, na zona oeste da cidade de São Paulo: Para a bacia sanitária, a vazão média foi 0,063 l/s com 8 usos diários para cada residência, considerando-se uma média de 3 usuários por residência.

Tomaz (2000) apresenta um resumo de dados de diferentes fontes nacionais e internacionais, o qual pode ser utilizado para a estimativa da demanda de água pluvial. Destaca-se, contudo, que os volumes de água consumidos podem variar de um país para outro, principalmente tendo em vista a conscientização dos usuários e as políticas públicas envolvidas.

Dentre os valores apresentados na referida fonte, foram considerados nessa tese, os seguintes:

- Lavagem de piso - 1 l/m²
- Irrigação paisagística – 1,0 l/m²

Em linhas gerais, o volume consumido para suprir estes usos depende de características do sistema predial, tais como a pressão (vazão) de utilização; os tipos de componentes utilizados (economizadores ou não) e, principalmente, do padrão de consumo (vazões de utilização, duração e frequência dos usos).

A Tabela 2-1 apresenta um resumo dos valores propostos para estas variáveis, considerando os usos citados, constantes na bibliografia consultada.

Apesar da importância da adoção de valores aderidos à realidade, não constitui escopo dessa tese levantar valores para as variáveis citadas. Assim, estes dados, além de alguns outros levantados *in loco*, foram empregados nos estudos de caso apresentados no capítulo de Resultados e Discussão.

Tabela 2-1: Estimativa da demanda de água pluvial para usos não potáveis em edifícios.

Uso de água não potável	Volume	Frequência de uso/realização da atividade
Descarga de bacias sanitárias	- 6,8 L/descarga (bacias com volume único) ^a - até 4,5 e 6,8 L/descarga (bacias de duplo acionamento) ^a	- residencial ^b : 5 a 8 usos / pessoa. dia - comercial ^b : 3 usos/pessoa. dia
Lavagem de pisos	1 a 2 L/m ² ^b	- residencial ^c : 1 lavagem/semana
Irrigação de jardins		- residencial ^c : 1 irrigação a cada 2 dias, dependendo da época do ano

Fontes: ^a ABNT (2011a, 2011b) ^b Tomaz (2000);

Alguns autores nacionais recomendam estimar a demanda de água pluvial em função da parcela do consumo total de água potável que pode ser atendida por essa fonte alternativa (ROCHA, 2010; COHIM *et al*, 2008; GHISI *et al*, 2011).

Contudo, verifica-se que existe uma grande variabilidade desses valores bibliografia. A título de ilustração, para descarga em bacias sanitárias em edificações residenciais, existem valores entre 5% (Rocha *et al*, 1998) e até 30 a 40% do volume total da edificação (MIELI, 2001; FIORI, 2005).

2.3 Dimensionamento de reservatórios para aproveitamento de água pluvial

O adequado dimensionamento de reservatórios é uma questão de suma importância para o sucesso da implantação do sistema de aproveitamento de água pluvial.

Caso superdimensionado, o reservatório implicará na alocação de grandes espaços no terreno, altos custos iniciais e de manutenção, além de um possível comprometimento da qualidade da água, já que o tempo de armazenamento pode ser demasiadamente longo.

Por outro lado, quando sub dimensionado, não suprirá adequadamente a demanda estimada para a edificação, resultando, em última análise, em pequena economia de água potável e tornando o sistema antieconômico.

O volume a ser reservado depende da relação entre a demanda e a oferta de água pluvial, além da eficiência do sistema (número de dias atendidos com água pluvial) que se deseja propiciar.

Os métodos empregados para o dimensionamento de reservatórios para o aproveitamento de água pluvial, os quais variam em complexidade e grau de sofisticação, podem ser classificados em métodos gráficos; métodos práticos; métodos baseados no diagrama de massas¹; métodos baseados em modelos estatísticos e métodos de simulação (LIAW & TSAI, 2004).

Os métodos gráficos consistem usualmente na determinação do volume de armazenamento por meio do emprego de ábacos e gráficos elaborados para uma determinado regime pluviométrico. Geralmente são utilizados para uma estimativa rápida, ou seja, se destinam principalmente para um pré-dimensionamento, ainda na etapa de planejamento do sistema.

Os métodos práticos, que também se destinam a um pré-dimensionamento, possuem usualmente abrangência local e têm como dado de entrada o índice pluviométrico (geralmente o total precipitado ao longo de um ano) e a área de captação. Normalmente são determinados por experiências práticas, por meio de observações de casos específicos, e servem apenas para a situação em estudo.

A NBR 15527 (ABNT, 2007) apresenta quatro métodos desse tipo, denominados em função do local de origem: brasileiro (ou Método de Azevedo Neto), australiano, alemão e inglês.

¹ Diagrama de volumes acumulados que afluem em um reservatório

Campos *et al* (2007a) e Amorim & Pereira (2008) destacam que todos os métodos práticos contemplados na normalização conduzem ao superdimensionamento do reservatório, principalmente quando consideradas grandes áreas de captação.

Os métodos baseados na análise do diagrama de massas consistem no equilíbrio dos volumes de entrada e de saída do reservatório. Assim, por exemplo, em um período de um ano, a entrada de água pluvial no reservatório (oferta) deverá ser capaz de suprir a saída de água para atender à demanda.

No Brasil, o exemplo mais conhecido e utilizado pelos projetistas é o Método de Rippl, também constante na normalização técnica.

Os métodos baseados em modelos estatísticos utilizam a série histórica para determinar o período sem chuva representativo de determinado regime pluviométrico. A partir da definição do período de estiagem, o volume do reservatório é determinado de forma que seja capaz de suportar a demanda durante o período de estiagem. Como exemplo desse tipo de método, pode ser citado o método de Weibull (SHARMA, 1995; SIMIONI *et al*, 2004).

Por fim, os métodos de simulação utilizam técnicas destinadas a investigar o comportamento do reservatório de um sistema predial de água pluvial. Os procedimentos para a simulação partem de uma correlação serial e ou consideram a sazonalidade dos dados de precipitação e o volume de reservação, para um determinado período, determinando assim o volume com maior eficiência entre todos analisados.

Os estudos encontrados na bibliografia indicam ser este o tipo de método preferencialmente adotado em outros países (DIXON *et al*, 1999; FEWKES, 1999; FEWKES, 2000; LIAW & TSAI, 2004; GHISI, 2006; GHISI *et al*, 2007; WALTHER & THANASEKARAN, 2001; CHENG *et al*, 2006).

Conforme destacado anteriormente, no Brasil, o método baseado no diagrama de massas, mais especificamente o método de Rippl, tem sido o mais utilizado pelos projetistas de sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial.

As principais críticas ao método de Rippl estão relacionadas fato deste método ser indicado para regularização de vazão em rios, o que faz com que os volumes obtidos para os reservatórios sejam usualmente grandes (GHISI *et al* 2009), uma vez que esta técnica seria mais adequada para reservatórios de abastecimento público, os quais devem estar constantemente cheios (FENDRICH & SANTOS 2008).

Em função disso, alguns pesquisadores têm investigado metodologias alternativas para este fim no país, merecendo destaque os estudos apresentados por Ghisi *et al* (2009) e Mierzwa *et al* (2007).

Ghisi *et al* (2009) apresentam um programa computacional denominado NETUNO, o qual foi desenvolvido para determinar o volume de reservatórios.

A partir da demanda de água potável, que pode ser fixa ou variável ao longo do tempo, é inicialmente estimada a porcentagem de substituição dessa fonte por água pluvial. Na sequência, com a entrada dos dados pluviométricos e da área de coleta, o programa determina o volume do reservatório a ser utilizado, em função da diferença de potencial de economia de água potável.

Após a determinação do volume, podem ser determinados indicadores de qualidade econômica (valor presente líquido, taxa interna de retorno e *payback* atualizado). Destaca-se, contudo que indicadores não se constituem em fatores limitantes quando da simulação do volume do reservatório.

O método proposto por Mierzwa *et al* (2007), por sua vez, parte do princípio de se aproveitar a maior quantidade de água pluvial no período chuvoso, reduzindo ao

máximo o consumo de água potável. Em geral, resulta em sistemas com menores investimentos iniciais, pois os volumes a serem reservados são menores.

Os autores calcularam o *payback* do reservatório dimensionado com o método proposto e comparam com o resultado obtido pelo reservatório determinado pelo método de Rippl. Destaca-se, contudo, que o *payback* não é o indicador mais apropriado para a avaliação econômica, conforme será descrito no próximo item.

Do exposto, verifica-se que os métodos apresentados nesse item não consideram a qualidade o investimento para a tomada de decisão quando da seleção do volume a ser reservado. A determinação do volume do reservatório visa aproveitar o máximo possível a água pluvial, sem considerar o valor do investimento necessário e como estes recursos irão se comportar ao longo do tempo.

Em um país em desenvolvimento como o Brasil, esse aspecto assume grande importância; nem sempre a conscientização ambiental é suficiente para motivar o emprego de sistemas voltados para a conservação de água e, assim, tornar as edificações mais sustentáveis nesse tema.

Nesse sentido, a análise da qualidade dos investimentos, mesmo que cercada de incertezas inerentes aos métodos de avaliação, pode se tornar uma importante aliada na busca por edifícios mais sustentáveis.

2.4 Avaliação econômica

Verificar a qualidade econômica de qualquer investimento é ferramenta fundamental em todo processo de tomada de decisão. Quando se trata de investimentos em conservação de água, conforme destacado anteriormente, isto assume o papel especial de incentivar o seu emprego, mesmo em situações em que ainda não se verifique *stress* hídrico.

A análise da qualidade dos investimentos em conservação de água no país tem sido baseada principalmente no período de recuperação de investimentos (*payback* atualizado), muito provavelmente pela sua fácil compreensão e determinação.

Os primeiros programas de conservação de água em edifícios desenvolvidos no país de forma consolidada e documentados na literatura recomendavam o emprego apenas desse indicador para a avaliação econômica (OLIVEIRA, 1999; SILVA, 2004).

O *payback* atualizado leva em consideração o valor do dinheiro ao longo do tempo, ao contrário do *payback* simples, em que o investimento total é simplesmente dividido pelas receitas no período considerado.

Rocha Lima Junior (1998) destaca que o emprego do *payback* não é uma forma adequada para se analisar a qualidade de investimentos, já que pode não medir a capacidade real de investimento no mesmo nível que o investidor possuía no momento inicial, ou mesmo não consegue verificar se o empreendedor já recuperou a condição equivalente, caso ele tivesse praticado o investimento em outro empreendimento.

De maneira similar, Monteiro (2003) argumenta que o *payback* atualizado não serve como indicador de lucratividade, já que não considera as entradas e saídas do fluxo de caixa após o período de recuperação.

Ywashima (2005) e Campos *et al* (2007b) apresentam as desvantagens de se utilizar somente o *payback* atualizado para a análise da qualidade de investimentos e propõem complementar essa avaliação com outros indicadores econômicos: taxa interna de retorno (TIR) e valor presente líquido (VPL).

A partir desses trabalhos, outras pesquisas desenvolvidas no país passaram a utilizar estes indicadores para a avaliação da qualidade de investimentos voltados para a conservação de água em edifícios. Como exemplo, pode-se citar os estudos apresentados por Hernandez (2006) e Ghisi *et al* (2011).

A TIR é definida como a taxa de desconto que deverá ser utilizada para igualar os valores presentes de entradas e saídas de um determinado fluxo, ou seja, a taxa de atratividade para que o VPL seja igual a zero. Para que este valor seja aceitável, esta taxa deve ser comparada com uma taxa de atratividade usual do mercado, normalmente estabelecida pelo investidor, em função do risco e do perfil de investimento (ROCHA LIMA JÚNIOR, 1998).

Rocha Lima Júnior (1993) apresenta a seguinte restrição ao uso da TIR:

“A taxa interna de retorno só pode ser medida para certa tipologia de empreendimentos, em que, no seu ciclo de vida, se tenha a garantia que os recursos do empreendedor alocados para o empreendimento estejam girando a uma taxa uniformizada com esta TIR, o que é um caso particular, que está associado aos empreendimentos que compreendem ciclos sucessivos com as mesmas características, como os de produção seriada da indústria ou aqueles circuitos de transações numa determinada linha de crédito de uma entidade financeira.”

Uma das críticas ao uso do TIR como indicador para medir a qualidade do investimento refere-se à possibilidade de se obter dois ou mais valores. Isto ocorre quando há mudanças de sinal no fluxo de caixa (entradas *versus* saídas). Um destes valores não é real do ponto de vista econômico e, portanto, não deveria ser considerado para comparações de investimentos (ANDRÉ & PELIN 1998).

O VPL, por sua vez, corresponde à diferença entre os valores presentes das entradas e saídas de um determinado fluxo de caixa, por meio da consideração de uma taxa de desconto mínima.

Assim, o critério para a aceitação de determinado investimento é que o respectivo VPL seja positivo, ou seja, a quantidade de recursos que entram no fluxo de caixa deve ser maior do que a quantidade que sai, já considerando o valor do dinheiro ao longo do tempo.

Ao se calcular o VPL de projetos mutuamente excludentes, pode se decidir qual dos dois é o melhor, ou seja, o que apresenta o maior valor desse indicador. Evidentemente que outros fatores de ordem financeira podem contribuir para a tomada de decisão, tal como a magnitude do investimento inicial.

A grande aplicação do VPL se deve principalmente ao cálculo simples e fácil entendimento do resultado obtido. A maior dificuldade para a sua aplicação é justamente determinar a taxa de desconto correta para o cálculo do valor presente, a qual é fundamental para a obtenção de valores corretos.

A taxa de desconto utilizada deverá ser igual a uma taxa de atratividade mínima de um determinado setor da economia, resultando em valores mínimos aceitáveis. Cada setor tem características próprias, que envolvem riscos, volume de recursos disponíveis, entre outras variáveis econômicas (ROCHA LIMA JÚNIOR & ALENCAR, 2006)

Os referidos autores avaliaram os investimentos necessários para aluguéis de salas em edifícios de escritórios e propuseram uma taxa de atratividade nominal mínima de 10% ao ano.

Alencar (2004) adotou esse mesmo valor ao avaliar o investimento em imóveis dessa mesma tipologia dotados de tecnologias que promovam a sustentabilidade.

Em função de algumas semelhanças entre as situações analisadas pelos autores citados e os investimentos em análise nessa tese, tais como longos períodos de retorno dos investimentos (20 anos) e a grande incerteza que cerca o investimento, o valor de 10% ao ano foi considerado no presente trabalho.

Vale ressaltar que o emprego de métodos tradicionais para a análise da qualidade de investimentos parte da estimativa de um cenário que normalmente está cercado por incertezas e, conseqüentemente, pode não ser cumprido.

Caso tal cenário subestime as entradas (receitas), pode-se perder oportunidades de investimentos. Se, por outro lado, as entradas forem superestimadas, podem ser realizados investimentos que resultarão em medidas pouco interessantes do ponto de vista econômico.

Incerteza é definida como sendo a “falta de certeza, hesitação, indecisão” (HOUAISS; VILLAR, 2001).

A incerteza direciona para o desconhecido em determinado momento do futuro. É justamente esta característica dos investimentos que torna a tomada de decisão tão difícil.

A capacidade de amenizar tal incerteza no futuro é que agregará valor ao projeto (RAMIREZ, 2002). Tal característica traz vantagens e desvantagens ao investimento.

Na tomada de decisão, se a situação for favorável, pode-se ganhar uma boa oportunidade em investimentos que a maioria não faria, por temer a situação incerta. Este ganho poderá ser maior à medida que a incerteza for maior.

Por outro lado, a incerteza também traz aspectos negativos. Ao se optar por investir em um empreendimento cheio de incertezas, o investidor dá “um tiro no escuro”, sem saber qual será a situação que irá chegar.

Dessa forma, pode-se definir um segundo termo, que é o risco. Segundo Ku (1995)² apud Ramirez (2002), a má consequência em se investir em uma situação de incerteza define o risco.

² Ku, A. **Modeling Uncertainty in Electricity Capacity Planning**. PhD Dissertation, London Business School, London, UK, 2005.

Assim quanto maior for a incerteza, maior será o valor do projeto, mas em contrapartida, maior será o risco. Estes três fatores estão intimamente ligados e são de grande importância para a análise da qualidade econômica de um investimento.

Outro aspecto que deve ser considerado é a flexibilidade. Esta é uma característica que se refere à capacidade de mudança, para um estado diferente do original com o intuito de adaptar-se a uma nova situação. Sendo assim, um investimento em uma situação de incerteza deve ser flexível, com o intuito de poder modificar a situação inicial quando aquela prevista originalmente não for atingida (COPELAND & ANTIKAROV, 2001). Esta capacidade de se adequar a determinada situação agrega valor ao projeto.

Quando se adota qualquer ação que vise acrescentar o conceito de flexibilidade, se paga a mais para ter este direito. Em contrapartida, esta ação terá um valor a mais, graças a este “direito” de mudança do plano original. Este valor dificilmente poderá ser captado pelos métodos tradicionais.

Os economistas americanos Robert Merton, Fischer Black e Myron Scholes publicaram um trabalho no início da década de 70 que se tornou um marco na valoração da flexibilidade (COPELAND & ANTIKAROV 2001). A partir desse trabalho, várias pesquisas têm sido desenvolvidas com este objetivo em diferentes tipos de empreendimentos.

No Brasil, para investimentos relacionados com a construção civil, destaca-se o estudo desenvolvido por Yoshimura (2007), que recomenda o emprego de opções reais para a referida análise.

A teoria das opções reais derivou da teoria das opções financeiras, proposta para a valorização dos ativos financeiros (ações, taxas de juros, etc). Essa nomenclatura passou a ser utilizada para nomear a oportunidade de comprar ativos reais (maquinário, empreendimento, projeto, etc.) a um determinado preço no futuro (MILLER & WALLER, 2003).

Embora semelhantes (a diferença mais significativa entre as opções financeiras e as reais é o tipo de ativo a que cada uma se aplica), a aplicação da modelagem das opções financeiras às opções reais pressupõe algumas adaptações, conforme destacado por Yeo & Qiu (2003).

A valoração desta flexibilidade em investimentos é válida principalmente em situações onde o VPL é próximo de zero (COPELAND & ANTIKAROV, 2001).

Além disso, a sua aplicação prática imediata é dificultada por falta de dados de mercado (YOSHIMURA, 2007). Assim, optou-se, na formulação da ferramenta proposta nessa tese, pelo emprego de um método tradicional para a análise da qualidade de investimentos em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial.

Para tanto, o VPL foi selecionado como o principal indicador, pois permite a comparação de opções que são excludentes entre si, além de determinar o valor final do investimento.

O VPL é determinado pela Equação 2:

$$VPL = \sum_0^n F_n \times (1 + i)^{-n} \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

F_n – entrada ou saída do fluxo de caixa no instante “n”;

i – taxa de desconto;

n – duração do projeto;

A qualidade do investimento em questão depende da determinação da relação que traga o maior benefício (aproveitamento de água pluvial) com o menor investimento. Para tanto, são utilizadas técnicas de otimização para a solução de problemas, as quais permitem, de forma rápida e eficiente, o encontro deste valor.

2.5 Otimização da solução de problemas

A otimização da solução de problemas consiste em um processo de maximização (ou minimização) de uma ou mais funções, com um ou mais objetivos, e sujeita ou não a restrições (BASTOS, 2004).

Em diferentes etapas de um empreendimento, desde o projeto até a construção, operação e manutenção, decisões devem ser tomadas. Estas decisões normalmente têm como objetivo minimizar esforços e/ou recursos, ou ainda, maximizar benefícios.

Quando os esforços ou benefícios podem ser expressos em termos de funções de algumas variáveis, um processo de otimização pode auxiliar a tomada de decisão. Desta forma, entende-se como otimização o processo de encontrar condições que forneçam o máximo (ou mínimo) valor para uma determinada função (RAO, 2006).

Alguns conceitos e definições são fundamentais para o entendimento dos métodos de otimização (BASTOS, 2004):

- variáveis de projeto: são aquelas que se alteram durante o processo de otimização; podem ser contínuas (reais), inteiras ou discretas;
- restrições: são as funções de igualdade ou desigualdade que descrevem as situações de projeto que são consideradas não desejáveis;
- espaço de busca: é o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis a serem otimizadas; é delimitado pelas funções de restrição;
- função objetivo ou de avaliação: compreende a função de uma ou mais variáveis que se quer otimizar, cujo objetivo é a minimização ou a maximização;
- ponto ótimo: é o ponto formado pelas variáveis de projeto que definem os extremos da função objetivo e satisfazem as restrições;
- valor ótimo: consiste no valor da função objetivo no ponto ótimo; e

- solução ótima: é o par formado pelo ponto e pelo valor ótimo; pode ser local ou global.

Existem diferentes aplicações de processos de otimização de problemas. Na área de Engenharia, por exemplo, podem ser citados exemplos de aplicação no projeto de aeronaves, de estruturas de obras civis, em projetos de bombas e turbinas, projetos de redes elétricas, de sistemas de abastecimento de água, entre outros (RAO, 2006).

A Inteligência Computacional é a sub-área da Ciência da Computação que tem como objetivo o estudo de modelos computacionais que apresentem algum tipo de comportamento adaptativo, melhorando o seu desempenho ao longo do tempo de acordo com alguma métrica.

As técnicas de Inteligência Computacional podem ser agrupadas em cinco grandes classes de algoritmos: redes neurais artificiais, computação evolucionária, sistemas imunológicos artificiais, sistemas de lógica difusa e inteligência de enxames.

Cada uma dessas classes possuem suas próprias técnicas e diferenciam-se uma das outras em diversos aspectos, tais como domínios de aplicação, (por exemplo, Engenharia, Biologia, Sociologia), tipo de aprendizado (supervisionado ou não-supervisionado, por exemplo) e classes de problemas a serem atacados (aproximação de funções, otimização, agrupamento, entre outros).

As redes neurais artificiais englobam diferentes modelos computacionais inspirados no funcionamento de neurônios naturais. Do ponto de vista matemático e de aplicação, compreendem um conjunto de técnicas voltadas principalmente para a aproximação de funções e classificação de dados (ENGELBRECHT, 2007).

Alguns modelos específicos são aplicados ainda para o agrupamento de dados com base em características, tais como os mapas auto-organizáveis ou mapas de Kohonen (KOHONEN, 1990). Por ser um aproximador de funções, as redes neurais artificiais

podem ser utilizadas em diferentes aplicações tais como otimização ou extrapolação (VALENÇA & LUDERMIR, 2000).

Na computação evolucionária, são utilizados modelos computacionais de processos evolucionários, inspirados nas teorias da evolução das espécies de Charles Darwin, tais como seleção natural, reprodução e aptidão.

Os diferentes algoritmos evolucionários utilizam uma *população* de indivíduos, chamados de cromossomos. Cada cromossomo é uma solução candidata para o problema a ser atacado, tal como o conjunto de entradas de uma função matemática ou os valores de parâmetros em um sistema (ENGELBRECHT, 2007).

Por sua natureza os algoritmos evolucionários são essencialmente algoritmos de otimização. Assim, técnicas de computação evolucionária têm sido aplicadas com sucesso em Arquitetura, Engenharia Mecânica, Engenharia Civil, entre outras áreas (DASGUPTA & ZBIGNIEW, 1997).

Dentre as técnicas disponíveis, aquelas que possuem maior disseminação são os algoritmos genéticos, cujas aplicações principais são os problemas de busca e otimização.

Os sistemas imunológicos artificiais, por sua vez, têm sua inspiração na grande capacidade que os sistemas imunológicos naturais têm para reconhecer padrões, a qual é utilizada para distinguir células invasoras daquelas pertencentes ao corpo dos indivíduos (ENGELBRECHT, 2007).

A partir dessa inspiração, os sistemas imunológicos artificiais modelam diversas características dos sistemas naturais na resolução de problemas envolvendo o reconhecimento de padrões, classificação, detecção de fraudes, entre outros.

Nos sistemas de lógica difusa, o objetivo é modelar o modelo aproximado que o raciocínio humano realiza, de forma a permitir o desenvolvimento de sistemas

computacionais que possam tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza e indecisão (SANDRI & CORREA, 1999).

Por fim, inteligência de enxames corresponde a uma classe de algoritmos inspirados no comportamento de grupos diferentes seres vivos, tais como pássaros, abelhas, peixes ou bactérias. (KENNEDY & EBERHART, 1995).

As diferentes técnicas de inteligência de enxames apresentam em comum o fato de que os indivíduos são extremamente simples, e o comportamento inteligente emerge a partir das interações entre eles.

Além disso, todas elas, independente de qual grupo de seres vivos contemple, possuem mecanismos de convergência, geração de diversidade e avaliação de sucesso. O que as diferencia é principalmente como cada um desses aspectos é implementado.

As técnicas de inteligência de enxames são adequadas para problemas de busca e otimização cujos domínios de aplicação variam desde Engenharia até Ciências Biológicas ou Sociais (RAO, 2006).

Dentre as principais técnicas empregadas, destacam-se: *Particle Swarm Optimization* (“otimização por enxame de partículas”); *Ant Colony Optimization* (“otimização por colônia de formigas”) e *Fish School Search* (“busca baseada em cardumes”) (KENNEDY & EBERHART, 1995; DORIGO & DI CARO, 1999; BASTOS FILHO *et al*, 2008).

A opção pela técnica PSO para a otimização do problema em questão nessa tese, que consiste em maximizar o valor presente líquido do investimento para a construção do reservatório do sistema de aproveitamento de água pluvial, complementando a análise do seu comportamento em relação à demanda e oferta de água pluvial foi feita

principalmente pela sua flexibilidade, que permitirá, em qualquer momento futuro, inserir outras variáveis importantes para o objetivo declarado.

2.5.1 PSO

A PSO é uma técnica de otimização estocástica de funções não-lineares, baseada em populações e é inspirada no comportamento social das aves (BOERINGER & WERNER 2004).

Este algoritmo em muito se assemelha com os algoritmos evolucionários, tais como os genéticos, que consistem em uma simulação onde o melhor “sobrevive”, seguindo a Teoria de Darwin. Porém, a técnica PSO requer menos conhecimento computacional e um número menor de linhas de programação, resultando em um menor tempo para obtenção do valor ótimo (ENGELBRECHT, 2007).

A busca por alimentos e ou por um lugar para o ninho e as iterações entre os pássaros são otimizados, tais como um mecanismo de otimização de problemas. Ao comparar um indivíduo com os pássaros, a área sobrevoada seria o espaço de busca deste algoritmo e o “encontrar alimento” seria achar o ponto ótimo da função objetivo (CANÔAS, 2008).

Esse “encontro” do alimento, de acordo com a referida autora, ocorre de uma forma conjunta, com o esforço de todos os integrantes do grupo. Toda a informação é compartilhada pelo grupo, de forma que o comportamento de cada um é fruto da experiência de cada pássaro, bem como do grupo como um todo.

Assim, um determinado indivíduo (partícula, no caso da PSO) aprende com as experiências vividas por ele e pelo grupo que este pertence. Sendo assim, esta técnica tende a buscar não somente a melhor experiência pessoal (posição visitada, na PSO), mas também a melhor do grupo.

O processo de otimização se inicia com a definição das variáveis a serem definidas e as restrições existentes e, por meio do espaço de busca, verifica-se qual o ponto ótimo da função objetivo do problema em questão.

As possíveis soluções, aqui chamadas de partículas, “voam” no espaço do problema, seguindo as partículas ótimas (XU, 2009).

Assim, por meio de uma simulação em um espaço bi-dimensional, um vetor define a posição da partícula e outro define o seu deslocamento (velocidade).

No caso do vetor de posição (Equação 3), tem-se as seguintes grandezas envolvidas (CARRILHO, 2007):

- momento da busca – k: é o momento em que está ocorrendo a varredura do espaço de busca por possíveis soluções;
- posição de cada partícula, que será uma possível solução i no tempo k - p_k^i : define a posição que cada possível solução possui no espaço de busca;
- posição da partícula i no tempo $k+1$ - p_{k+1}^i .

$$p_{k+1}^i = p_k^i + v_{k+1}^i \quad (\text{Equação 3})$$

Por sua vez, no vetor de velocidade, as grandezas envolvidas (Equação 4) são:

- velocidade da partícula i no tempo k - v_k^i ;
- velocidade ajustada da partícula i no tempo $k+1$ - v_{k+1}^i ;
- números aleatórios independentes entre 0 e 1 - rand_1 e rand_2 ;
- parâmetros cognitivo (C_1) e social (C_2): têm como função controlar o fluxo de informação entre a partícula e o seu enxame. Quando $C_2 > C_1$, há uma tendência de se aceitar o ponto ótimo global (gbest), caso contrário ,a tendência é de se encontrar o ponto ótimo local;

- fator de inércia – ω : controla o impacto da velocidade prévia da partícula sobre sua velocidade atual;
- melhor posição do enxame no tempo k : é a melhor posição alcançada por uma partícula usada para guiar as outras do enxame - b_k^g .

$$v_{k+1}^i = \omega v_k^i + C_1 rand_1(b_k^i - p_k^i) + C_2 rand_2(b_k^g - p_k^i) \quad (\text{Equação 4})$$

Cada partícula da PSO tem dois tipos de movimentos, um visando a busca em largura (*exploration*) e outra em profundidade (*exploitation*). A componente cognitiva induz a partícula a explorar melhor a região próxima ao seu "melhor individual" (pbest) ou onde ela, até o momento, encontrou um melhor resultado, com foco na busca em profundidade. Já a componente social direciona o movimento da partícula em direção ao "melhor da vizinhança" (lbest) ou o ponto onde uma partícula próxima do enxame encontrou o melhor resultado (KENNEDY, 1997).

Na versão utilizada neste trabalho, a vizinhança é global (gbest PSO). Isso significa que a informação relativa ao melhor resultado encontrado é compartilhada por todas as partículas. O ajuste dessas componentes, representados pelas constantes C_1 e C_2 , tem como objetivo equilibrar os dois processos de busca (largura e profundidade) de acordo com o problema a ser estudado.

Quanto maior for a componente social, mais rápida será a convergência. Entretanto, como esta velocidade aumenta, é possível que se passe por pontos ótimos sem que os mesmos sejam notados, prejudicando a análise do algoritmo (ENGELBRECHT, 2007).

Por outro lado, uma componente cognitiva com valores mais elevados, ou seja, acima de 2, permite que o algoritmo encontre um maior conjunto de soluções ótimas, sob um ponto de vista local, prejudicando, por outro lado a convergência para o ótimo global.

Funções com muitos pontos ótimos locais, tais como as de *benchmark rastring e peaks*, são mais sensíveis às constantes C_1 e C_2 , principalmente quando se trabalha em diversas dimensões e quando o refinamento do resultado precisa ser maior. Estudos acerca dessas componentes e sua influência no processo de convergência podem ser encontrados em Schutte & Groenwold (2005).

Considerando-se $C_1 = C_2$ indica-se que o processo de convergência deve ocorrer prezando por um equilíbrio entre as buscas em profundidade e largura, valorizando a convergência para um ótimo global sem a perda da capacidade de exploração em profundidade.

Conforme será detalhado nos capítulos seguintes, optou-se por utilizar $C_1 = C_2 = 2$ nessa tese. Isso foi motivado pelo fato de que os próprios propositores do algoritmo mostram que essa configuração paramétrica pode ser utilizada como ponto de partida para experimentos onde não se sabe de antemão as características da função a ser otimizada.

Caso esses valores não apresentem resultados satisfatórios, tal como convergência prematura para pontos ótimos locais deve ser efetuado um ajuste refinado dessas variáveis.

Para o coeficiente de inércia (ω), Carrilho (2007) sugere o uso de valores entre 0 a 1,4. Contudo, Eberhart & Shi (2000) afirmam que o melhor comportamento dos algoritmos por eles analisados ocorreu dentro da faixa de 0,4 a 0,9.

Deve-se também limitar a velocidade máxima para controlar o passo do algoritmo e prevenir o fenômeno de explosão, ou seja, evitar que a sua distância tenda para o infinito (TAYAL, 2003).

Na PSO, as partículas são influenciadas pelo excelente comportamento de qualquer outra partícula a qual a mesma esteja conectada. Esta “conexão” independe do valor

semelhante das mesmas, mas da proximidade em função da topologia de vizinhança, que define a estrutura social do enxame. Isso contribui para o cálculo da melhor posição do enxame no tempo k (b_k^g) de cada uma das partículas (CARRILHO, 2007).

De acordo com o referido autor, existem três tipos de topologias de vizinhança (Figura 2-1): totalmente conectada, local e focal.

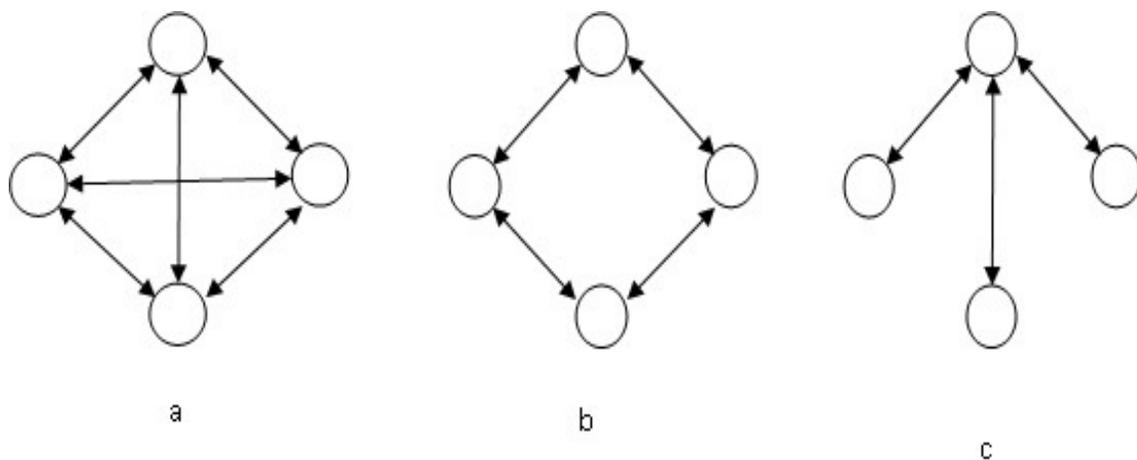


Figura 2-1: Topologias de vizinhança na PSO: a) totalmente conectada; b) local e c) focal.
Fonte: Carrilho (2007)

Na vizinhança totalmente conectada, todas as partículas são afetadas umas pelas outras. Na vizinhança local, cada partícula será afetada pela melhor partícula, dentre as suas vizinhas imediatas. Por fim, na vizinhança focal, cada partícula está conectada com todas as outras e também conectadas unicamente com a primeira.

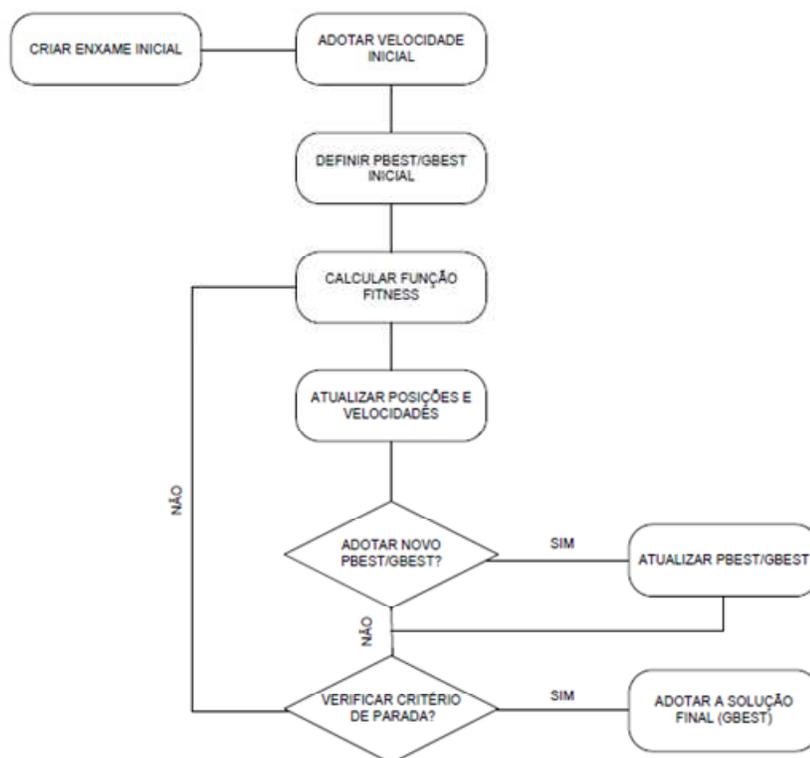
O tipo de topologia de vizinhança influencia diretamente a taxa de convergência, já que o tempo estimado para a identificação, para cada partícula, dependerá da sua localização ideal no espaço de busca.

Carrilho (2007) cita que, na versão global, como cada uma das partículas está conectada com as outras, todas recebem informações ao mesmo tempo sobre qual

seria a melhor solução, convergindo com maior rapidez. Assim, quando utilizada a topologia totalmente conectada, o enxame tende a convergir mais rápido do que quando usadas as topologias local e focal.

Para este trabalho, utilizou-se a convergência do tipo gbest, uma vez que se deseja uma ferramenta que seja rápida e que permita explorar diversas situações de problemas.

A Figura 2-2 apresenta o algoritmo padrão da PSO. A função *fitness* é a responsável por avaliar o desempenho das partículas, verificando se cada uma delas está ou não alinhada com o objetivo proposto (CARACIOLO *et al*, 2010).



pbest – *personal best* – o melhor de cada partícula gbest – *global best* – melhor em termos gerais

Figura 2-2: Algoritmo básico da PSO

Fonte : Baseado em Caraciolo *et al* (2010)

Existem aplicações da PSO em diferentes áreas. Por exemplo, Abdelaziz *et al* (2009) utilizaram a PSO para resolução de um problema na rede de distribuição de energia, maximizando a distribuição desse insumo e minimizando as perdas.

Wang *et al* (2009) estudaram o uso da PSO para estimar os parâmetros de qualidade de um determinado corpo hídrico, comparando os resultados obtidos com um algoritmo genético.

Foram também encontrados na literatura usos da PSO para planejamento de sistemas de suprimento de água e gerenciamento de recursos hídricos.

Yang & Zhai (2009) apresentam os resultados obtidos com a aplicação de um algoritmo genético e da PSO a um processo de otimização de horários de distribuição de uma rede de abastecimento de água, de forma a otimizar diâmetros e tubulações.

Montalvo *et al* (2010) analisaram a aplicação da PSO em uma análise multicritério para seleção da melhor forma de distribuição em um sistema de abastecimento de água.

Segundo Engelbrecht (2007), a PSO apresenta as seguintes características:

- é um algoritmo potente e capaz de lidar com problemas simples (otimização de funções com 10 dimensões ou menos, por exemplo) e também bastante complexos, envolvendo a otimização de funções com até 100 dimensões;
- em sua versão mais simples (gbest PSO), possui um número bastante reduzido de parâmetros a serem ajustados pelo utilizador, facilitando a sua aplicação em vários domínios, sem a necessidade de um especialista em inteligência computacional;

- para problemas mais simples (funções com poucas dimensões, poucos pontos ótimos locais etc.) a PSO se torna mais robusta e menos sensível aos ajustes paramétricos, o que facilita ainda mais a sua aplicação por não-especialistas.

Sobretudo, conforme destacado anteriormente, a PSO apresenta flexibilidade para a incorporação de variáveis futuras, expandindo a capacidade de tratamento dos dados e otimizando outras variáveis envolvidas (KENNEDY & EBERHART, 1995). Esta foi a principal razão para a sua seleção como técnica de otimização para o problema em estudo nessa tese.

3 MÉTODO DE PESQUISA

A motivação para o desenvolvimento dessa tese consiste em propor um método baseado na avaliação do valor presente líquido, de modo a complementar a análise da qualidade econômica de investimentos em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial. Pretende-se também fornecer uma ferramenta flexível que possibilite a incorporação de variáveis futuras e que seja de fácil utilização pelos agentes da cadeia da construção civil responsáveis pela referida análise.

A determinação do período de retorno (*pay-back*) dos investimentos realizados tem sido o método mais utilizado para a avaliação econômica de investimentos voltados para a conservação de água no país, porém este indicador não consegue prever o tempo exato de recuperação da capacidade de investimento que o investidor possuía no momento de decisão pelo investimento (Rocha Lima Junior, 1998), fazendo com o mesmo tome decisões baseadas em cenários mais otimistas.

Conforme destacado na revisão da literatura, o reservatório é responsável pela maior parcela dos custos de sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial. Além disso, a magnitude do volume a ser reservado determina a parcela de economia no uso de água potável, o que está diretamente relacionado com o retorno econômico a ser obtido. A partir disso, para a avaliação da qualidade dos investimentos foi considerado como investimento inicial, nessa tese, somente o custo do reservatório (mão-de-obra e material). Ressalta-se, porém, que os outros custos iniciais envolvidos podem ser acrescentados ao método proposto.

Inserido nesse contexto, a determinação do volume que implique no menor investimento e o maior retorno é essencial para que os investimentos em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial com qualidade econômica, de forma a motivar os investidores.

A técnica de otimização selecionada foi a PSO. Apesar do problema em estudo nessa tese ser relativamente simples quando comparado com outros estudos de aplicação encontrados na literatura, a sua seleção foi baseada na sua flexibilidade, no sentido que permite que outras variáveis possam ser incorporadas no futuro, caso desejado.

O algoritmo a ser desenvolvido já estará pronto para dar suporte às alterações que forem necessárias, com pouca ou praticamente nenhuma modificação no código da ferramenta proposta nessa tese.

A utilização de métodos de otimização mais simples, sejam eles métodos matemáticos ou computacionais, dificultariam bastante (ou até mesmo inviabilizariam) um aumento no número de variáveis a serem consideradas no processo de otimização (ENGELBRECHT, 2007).

A estratégia de pesquisa empregada no presente trabalho foi o estudo de caso, com o desenvolvimento de aplicações do método proposto em diferentes cenários de cobrança de tarifas, considerando-se três categorias tarifárias: pública, comercial e industrial.

3.1 Delineamento da pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas principais, conforme apresentado na Figura 3-1.

COMPREENSÃO DO PROBLEMA

- Revisão bibliográfica
- Avaliação de qualidade dos investimentos
- Técnicas e ferramentas de otimização
- aproveitamento de água pluvial - aspectos gerais; dimensionamento de reservatórios e estimativa de demanda e oferta,

FORMULAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO

- Construção do algoritmo de otimização
- Análise de sensibilidade

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO

- Desenvolvimento dos estudos de caso
- Análise de sensibilidade dos resultados obtidos

Figura 3-1: Delineamento da pesquisa. Estratégia empregada: estudo de caso.

A primeira etapa consistiu na compreensão do problema a partir da revisão da literatura, com o levantamento dos indicadores usualmente empregados em avaliações econômicas e de técnicas de otimização para o problema em questão. Como produto dessa etapa tem-se a definição do indicador econômico a ser utilizado para a avaliação econômica e a técnica de otimização a ser empregada no método a ser formulado.

A segunda etapa contemplou a formulação do método propriamente dito e a análise de sensibilidade das variáveis determinantes do seu desempenho. O produto dessa etapa é a ferramenta computacional desenvolvida, que teve como base a PSO para a determinação do volume ótimo em função do máximo VPL dos investimentos efetuados.

Na terceira etapa da pesquisa foram efetuadas aplicações do método proposto considerando estudos de caso em três categorias tarifárias (pública, comercial e industrial) e diferentes de acréscimos da tarifa de água (ou de água e esgoto).

3.1.1 Desenvolvimento da ferramenta de otimização

O desenvolvimento do método proposto nesse trabalho parte da hipótese de que a tomada de decisão acerca da escolha do volume de reservação em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial deve contemplar a análise da qualidade dos investimentos e a área a ser ocupada pelo reservatório, tendo em vista a limitação de espaço disponível nos lotes urbanos para a sua implantação.

O valor presente líquido foi selecionado como critério básico para a análise da qualidade dos investimentos em questão, tendo em vista que se trata de um indicador apropriado para o caso de comparação de opções mutuamente excludentes, além de permitir quantificar o ganho do valor no final do projeto. Estas informações são de extrema importância para o caso em análise, uma vez que está se comparando um volume com outro, já que não podem ser utilizados dois volumes, por exemplo; e, a partir da definição do VPL, verifica-se qual o reservatório que trará o maior ganho de valor ao final do projeto.

Por sua vez, a parcela da área do lote a ser ocupada pelo reservatório foi considerada como um fator restritivo no processo de otimização proposto.

O critério base para a seleção da técnica de otimização a ser empregada para a solução do problema em questão, qual seja, a otimização do VPL foi a flexibilidade para a incorporação de variáveis futuras, expandindo a capacidade de tratamento dos dados e otimizando outras variáveis envolvidas.

A partir disso, foi selecionada a técnica PSO (*Particle Swarm Optimization*) e desenvolvido um programa que possibilita o dimensionamento de um reservatório que possui, dentro de um universo preestabelecido, o maior VPL, ou seja, o volume a ser empregado corresponde a aquele que trará o maior benefício econômico.

3.1.2 Desenvolvimento dos estudos de caso

Foram estudadas três categorias tarifárias, conforme definido pela concessionária de água e esgoto local – SANASA (2012): pública, comercial e industrial. Dentro de cada categoria selecionada, foram considerados cenários de acréscimos na tarifa de água aplicada no ano de 2011.

3.1.2.1 Determinação das entradas e saídas do fluxo de caixa para o cálculo do valor presente líquido

As entradas e saídas consideradas no fluxo de caixa para a determinação do VPL dos estudos de caso desenvolvidos no presente estudo são Figura 3-2:

- investimento inicial;
- saídas: custos de manutenção mensais, bimestrais, semestrais e anuais;
- entradas: economias, em termos mensais, geradas pelo consumo de água pluvial na edificação.

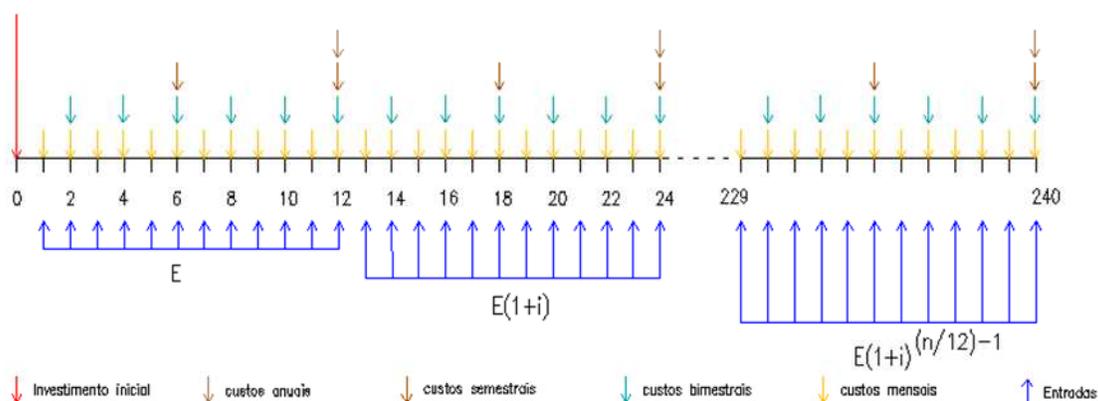


Figura 3-2: Fluxograma empregado para a determinação do VPL no desenvolvimento dos estudos de caso. E – Entrada mensal – proveniente da economia na conta d’água; i = tarifa de reajuste

O detalhamento de cada um desses itens, os quais variam de um caso para outro, é apresentado no capítulo de resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados: (1) do desenvolvimento da ferramenta de otimização; (2) da avaliação da qualidade dos investimentos em sistemas prediais de aproveitamento de água pluvial a partir de estudos de caso desenvolvidos em três categorias tarifárias: pública, comercial e industrial e (3) da análise de sensibilidade das variáveis determinantes do desempenho do algoritmo da ferramenta desenvolvida com o emprego da técnica de PSO.

4.1 Ferramenta de otimização

A ferramenta desenvolvida, denominada *Rain Toolbox*, está dividida em dois módulos: simulação e otimização.

O módulo de simulação destina-se ao cálculo da evolução do VPL no tempo, em função de uma série histórica de precipitações e da estimativa de reajustes tarifários futuros. Este módulo tem como saída o VPL final, o qual foi utilizado como função objetivo.

Conforme apresentado na revisão da literatura, a PSO é uma técnica de busca/otimização baseada em inteligência de enxames, em que a posição de cada partícula no espaço de buscas representa uma *solução candidata* para o problema em questão.

O módulo de otimização empregado neste trabalho contempla uma topologia global (*gbest* ou *global best PSO*), ou seja, existe troca de informações entre todas as partículas, o que propicia que a convergência seja mais rápida do que quando utilizada a topologia local.

Assim, a posição de uma partícula em um determinado instante representa um possível volume para o reservatório, a partir de um volume mínimo (v_{\min}), arbitrariamente estabelecido pelo usuário, e de um volume máximo (v_{\max}), determinado em função da definição da fração do lote que será ocupada para o seu posicionamento e de uma altura máxima preestabelecida.

Inicialmente, um enxame de 10 partículas (número padrão, conforme explicitado na revisão da literatura) é criado e essas são dispostas uniformemente no espaço de busca, dentro do intervalo $[v_{\min}, v_{\max}]$. Em seguida, é calculado o *fitness* de cada partícula e, a partir disso, cada partícula atualiza a sua melhor posição *pbest* para a posição inicial, uma vez que cada partícula conhece apenas esta posição.

O *gbest* é definido como sendo a posição da partícula com o melhor *fitness* do enxame. Nas iterações seguintes, as partículas atualizam a sua velocidade de acordo com a Equação 5:

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + c_1 r_1(t)[y_i(t) - x_i(t)] + c_2 r_2(t)[\hat{y}(t) - x_i(t)] \quad (\text{Equação 5})$$

em que:

- $v_i(t)$ velocidade da partícula i no instante t ;
- $x_i(t)$ posição da partícula i no instante t ;
- c_1 e c_2 constantes de aceleração que representam os componentes cognitivos e sociais do aprendizado;
- $r_1(t)$ e $r_2(t)$ valores aleatórios, amostrados a partir de uma distribuição uniforme $U(0,1)$.

Esses valores têm como objetivo inserir um elemento estocástico no algoritmo.

Para o estudo desenvolvido nesse trabalho, as componentes cognitivas e sociais c_1 e c_2 foram definidas como sendo ambas iguais a 2. Esse valor foi obtido empiricamente,

produzindo um equilíbrio satisfatório entre a capacidade de realizar buscas em profundidade e amplitude.

Contudo, é possível alterar o valor dessas componentes na ferramenta desenvolvida e verificar o impacto produzido. No capítulo de Resultados e análises são apresentadas algumas variações efetuadas dentro da análise de sensibilidade do algoritmo desenvolvido.

A melhor posição, que uma partícula i encontra até então, ou seja, o $pbest$ é representado por y_t . O cálculo do $pbest$ é efetuado a partir da Equação 6:

$$y_i(t + 1) = \begin{cases} y_i(t) & \text{se } f(x_i(t + 1)) \leq f(y_i(t)) \\ x_i(t + 1) & \text{se } f(x_i(t + 1)) > f(y_i(t)) \end{cases} \quad (\text{Equação 6})$$

em que $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ (domínio da função em números reais) é a função de *fitness*, representada pelo VPL em função do volume do reservatório.

Se, em um dado instante t uma partícula x encontra uma posição correspondente ao volume que produz um VPL melhor do que o melhor já encontrado por ela até então, o $pbest$ será atualizado para a posição que essa partícula ocupa nesse instante t .

Assim, a partir dos passos apresentados, é calculado do volume que representa o maior VPL.

A interface gráfica da parte de otimização do programa desenvolvido apresenta cinco módulos de entrada de dados, ilustrada na Figura 4-1, para uma aplicação hipotética qualquer. O algoritmo do programa desenvolvido encontram-se no Apêndice.

No primeiro módulo de entrada de dados deve-se informar a área do lote; a área de captação da água pluvial na edificação; a taxa de ocupação do lote para o posicionamento do reservatório e o coeficiente de aproveitamento.

No módulo 2, deve-se inserir o material do reservatório a ser dimensionado (por enquanto, apenas dois materiais estão contemplados: concreto armado e fibra de vidro); a categoria tarifária (atualmente o programa contém apenas as categorias e estruturas tarifárias da cidade de Campinas, São Paulo); a demanda diária de água pluvial, que deve ser inserida por meio de um arquivo no formato csv (*comma-separated values*), referente a 365 dias, e a altura máxima permitida para reservatório.

O módulo 3 contempla a inserção dos dados referentes às funções dos custos do reservatório e de manutenção e operação, cujo detalhamento foi apresentado no capítulo de Método.

No módulo 4, o usuário deve inserir o histórico de precipitações diárias, bem como o histórico de reajustes da tarifa, ambos em arquivo formato csv.

Por fim, no módulo 5, devem ser inseridos os dados referentes à otimização PSO: número de partículas e de iterações. Além disto, deve ser inserido o volume mínimo para o início das simulações.

A parte do programa desenvolvido responsável pela simulação apresenta a interface gráfica ilustrada na Figura 4-2, considerando uma aplicação hipotética qualquer.

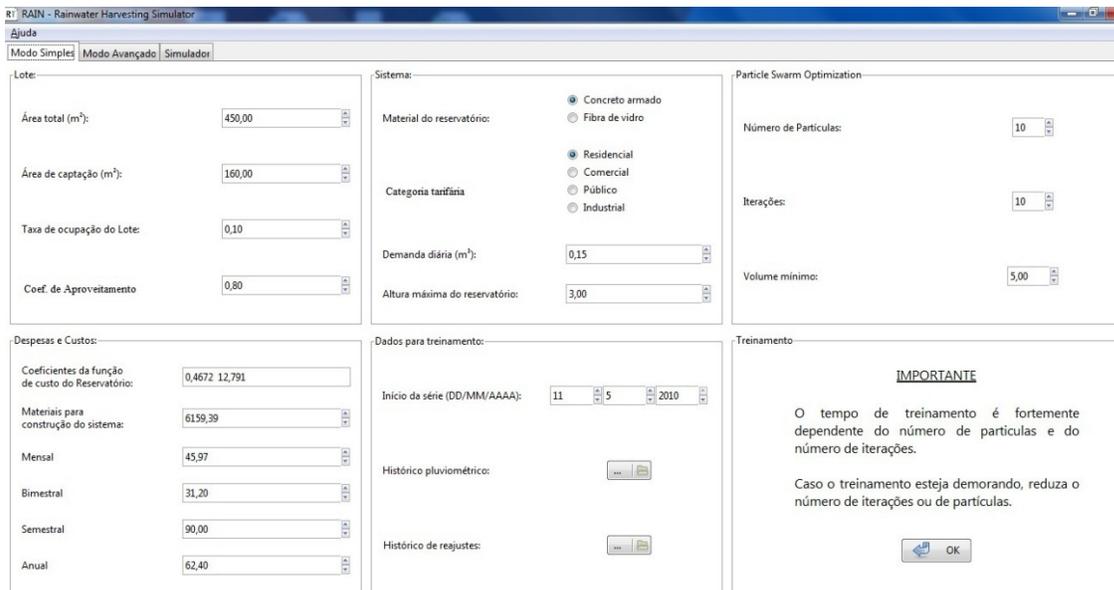


Figura 4-1: Interface gráfica do programa *Rain Toolbox*- módulo de otimização.

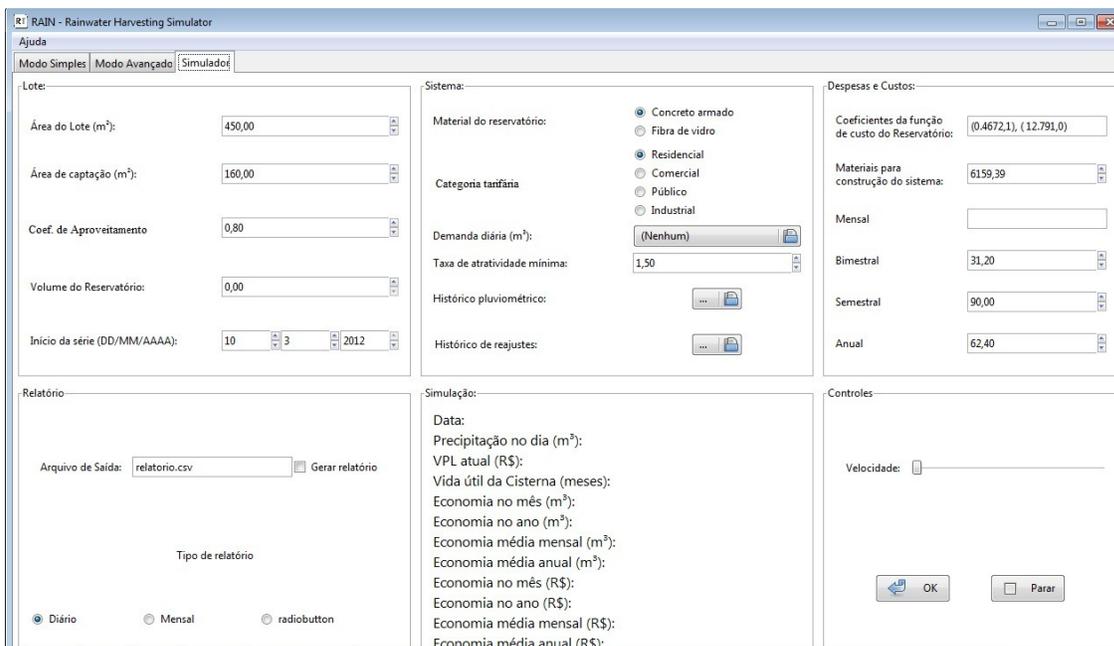


Figura 4-2: Interface gráfica do programa *Rain Toolbox* - módulo de simulação.

Esta interface permite a entrada do volume do reservatório para a simulação do seu desempenho, conforme explicado no capítulo de método, fornecendo ao usuário informações sobre o uso de água pluvial em uma determinada situação (volume consumido médio anual e mensal), além dos resultados de ordem econômica, tais como VPL, economias mensais e anuais (em Reais).

4.2 Estudos de caso

4.2.1 Cálculo do Valor Presente Líquido

4.2.1.1 Investimento inicial

Foi considerado como investimento inicial o custo (mão de obra e material) do reservatório. Os demais custos foram desprezados nessa análise porque são muito similares para diferentes volumes de reservação. Contudo, estes custos podem ser considerados em outras aplicações, pois a forma de entrada dos dados permite que se agregue outros itens ao investimento inicial.

Assim, para a construção da função do custo, dado de entrada do programa computacional desenvolvido, foram considerados os valores correspondentes à execução de reservatórios com diferentes volumes aplicados por uma construtora de médio porte que atua na cidade de Campinas, SP. A Figura 4-3. apresenta os dados levantados (ano-base: 2012) e a função ajustada.

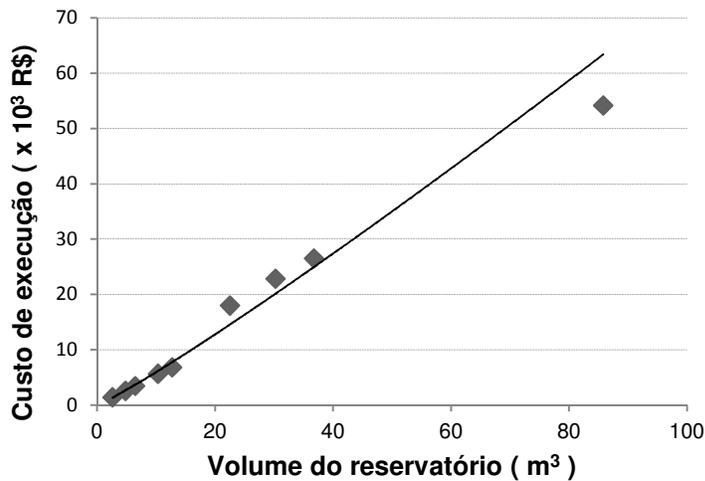


Figura 4-3: Função de custo dos reservatórios de concreto. Os losangos representam os custos de execução (material e de mão-de-obra) aplicados por um construtora de médio porte da cidade de Campinas, SP. A linha contínua corresponde à função ajustada aos dados levantados.

A partir disso, a função de custo dos reservatórios de concreto ajustada para os dados em questão, com coeficiente de determinação R^2 igual a 0,99, é dada por:

$$C = 0,2404 \times V^{1,0988} \quad \text{(Equação 7)}$$

Em que:

C – custo do reservatório, em Reais

V – volume do reservatório, em litros

4.2.1.2 Saídas do fluxo de caixa – custos de operação e manutenção

Os custos de operação e manutenção são informados em termos da sua periodicidade (mensal, bimensal, semestral ou anual).

A Tabela 4-1 apresenta os custos de operação e manutenção considerados nos estudos de caso.

Tabela 4-1: Despesas consideradas para a determinação do VPL dos estudos de caso.

Descrição	Periodicidade	Critérios	Valor ^a
Consumo de energia pelo uso do conjunto moto-bomba	mensal	um conjunto moto-bomba (potência: ½ HP, vazão de até 2300 L/h, funcionando por um período de 10 h/dia)	R\$ 22,20/mês
Custo do produto de desinfecção		Consumo de 4 gramas para cada 1000 litros de água ^b e que 1 balde de cloro tem 1 kg	R\$ 0,08/m ³ . mês
Realização de ensaios previstos em ABNT (2007)		Parâmetros: cloro (fitas) e pH	pacote com 50 fitas: R\$ 36,00 , no que resulta R\$ 0,72/mês ^c
		turbidez	R\$ 12,00/ mês ^c
	cor	R\$ 12,00/ mês ^c	
Custo mensal (R\$/mês): 0,08 V + 46,92, em que V – volume do reservatório (m ³)			
Limpeza do filtro	bimestral	Mão-de-obra para realizar o serviço (meia diária de um servente)	R\$ 31,20/ bimestre ^d
Realização de ensaios previstos em ABNT (2007)	semestral	Parâmetros: coliformes totais e termotolerantes	R\$ 90,00/ semestre ^c
Manutenção em geral (limpeza do reservatório, calhas, verificação da bomba)	anual	Mão-de-obra para realizar o serviço (diária de um servente)	R\$ 62,40/ ano ^d

^a Data-base: setembro/2011 ^b Fonte FUNASA (2012) ^c Fonte CQA (2011) ^d Fonte: SINTRACONSP (2011)

4.2.1.3 Entradas do fluxo de caixa – economias mensais

Os valores da conta de água, considerando-se que parte da demanda será atendida com água não potável, constituem-se nas entradas do fluxo de caixa para a determinação do VPL.

Os volumes de água pluvial que serão utilizados em substituição à água potável são determinados diariamente, a partir relação entre a oferta e a demanda, estimadas conforme detalhado na sequência.

Conforme apresentado anteriormente, no caso da demanda de água pluvial, os valores estimados foram inseridos por meio de um arquivo csv, o qual contém 365 dados de volume (m³), a partir do primeiro dia de cada ano.

De maneira similar, a oferta é inserida no programa por um arquivo, também em formato csv, o qual contém as precipitações diárias (mm). Para o desenvolvimento das aplicações contempladas nessa tese foi considerado um período histórico de precipitações de um período de 30 anos, totalizando 10950 dados.

a) Estimativa do volume de água pluvial a ser aproveitado na edificação

Para a estimativa da oferta de água pluvial, foram inicialmente levantados os dados de precipitação registrados no posto pluviométrico de Barão Geraldo, localizado na cidade de Campinas, São Paulo, para um período de 38 anos (1971 a 2009), os quais são disponibilizados em Agritempo (2010).

O regime pluviométrico do local em estudo é caracterizado por uma estação seca, que começa no mês de Abril e se estende até Agosto e uma chuvosa, entre os meses de Setembro e Março. Assim, em determinados períodos do ano não haverá oferta de água pluvial, resultando em uma diminuição dos retornos econômicos nesses períodos.

A Figura 4-4 apresenta os valores das precipitações médias mensais ocorridas no período considerado.

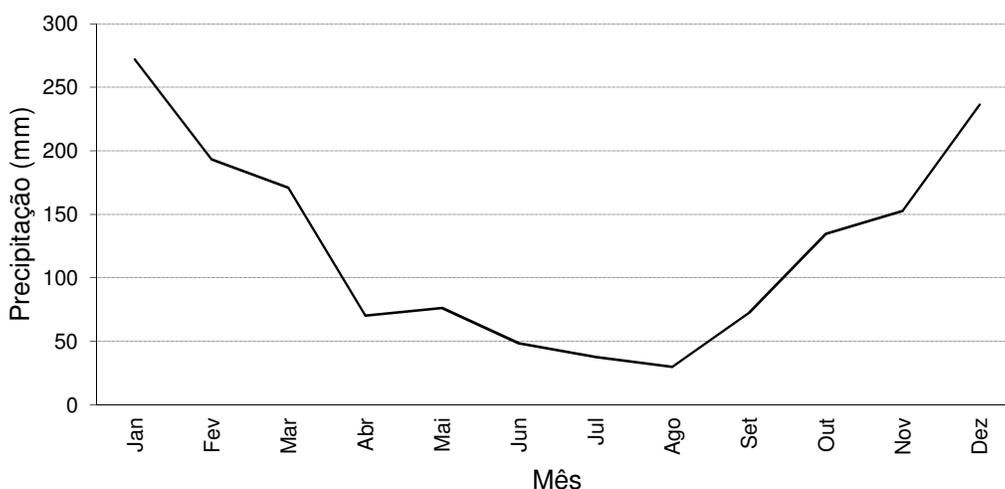


Figura 4-4: Precipitação média mensal no período em análise, determinada a partir dos dados registrados pelo Posto Barão Geraldo, Campinas, SP – período: 1971 a 2009.

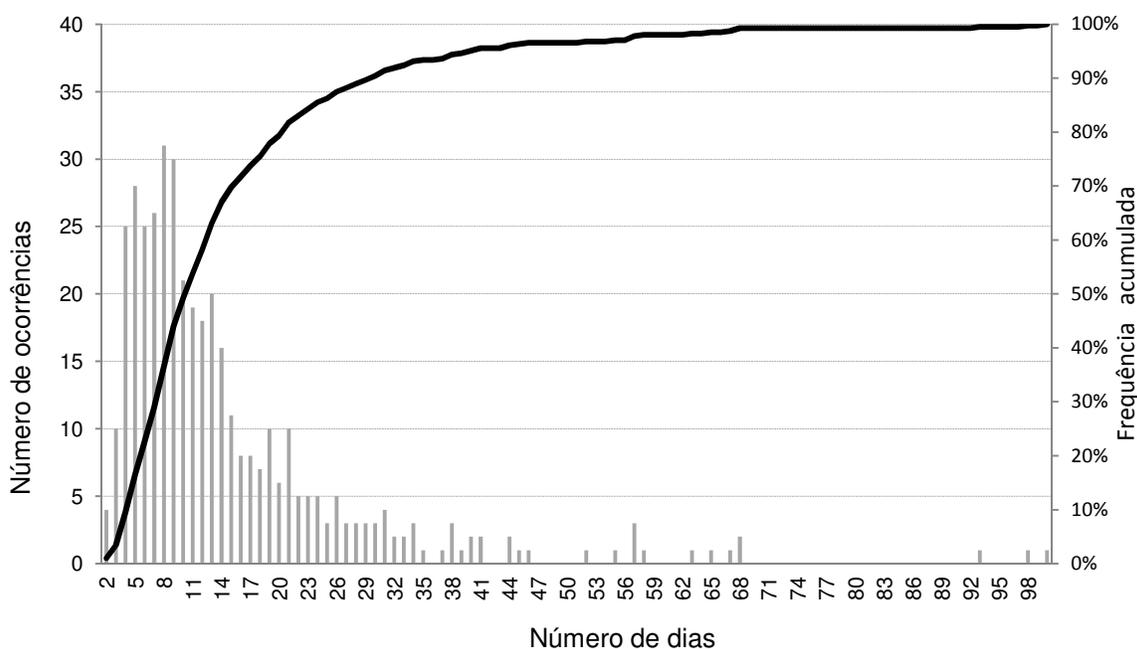


Figura 4-5: Número de dias entre duas precipitações consecutivas, dados registrados pelo Posto Barão Geraldo, Campinas, SP – período: 1971 a 2009. A linha contínua representa a ocorrência acumulada do número de dias entre duas precipitações consecutivas.
 Fonte: Agritempo (2010)

A Figura 4-5 ilustra a ocorrência de períodos de estiagem, expressos em termos do número de dias entre duas precipitações consecutivas (período de estiagem) nos anos

considerados na análise. Verificou-se que cerca de 90% dos períodos entre duas precipitações consecutivas ocorreram contêm um número de dias inferior a 30.

A área de captação corresponde à área da cobertura de cada edificação representativa da categoria em estudo, ou seja:

- pública: 1222 m²;
- comercial: 1431,40 m² e
- industrial: 291,40 m².

Assim, para cada dia, a partir da precipitação estimada e da área de captação, a oferta de água pluvial foi estimada a partir da Equação 8:

$$V_{\text{aprov}} = p \times A \times \eta \quad (\text{Equação 8})$$

em que:

V_{aprov} – volume de água pluvial aproveitável (oferta de água pluvial), em m³

p – precipitação diária, em m

A – área de coleta, em m²

η – coeficiente de aproveitamento, adimensional.

O coeficiente de aproveitamento procura traduzir a eficiência do sistema de captação, em que são considerados não somente a parcela da precipitação que irá se transformar em escoamento superficial e, portanto, captada pelo sistema predial, mas também das perdas em dispositivos de descarte inicial, filtros, entre outras.

Por sua vez, a demanda diária de água pluvial foi estimada em função dos usos a serem primordialmente atendidos com água pluvial, quais sejam, rega de jardim, lavagem de piso e descarga de bacias sanitárias.

Os dados considerados em cada estudo de caso para a determinação da demanda de água pluvial são apresentados nas Tabelas 4-2, 4-3, 4-4, respectivamente para as categorias pública, comercial e industrial.

Tabela 4-2: Estimativa da demanda de água pluvial – edificação representativa da categoria tarifária 1 - pública.

<p>Caracterização da edificação representativa (edificação existente)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ conjunto de edifícios de salas de aula de uma instituição de ensino superior; com 1 pavimento térreo e três pavimentos-tipo; ▪ cada pavimento tipo possui dois banheiros, um masculino e um feminino, totalizando seis banheiros; ▪ cada banheiro possui 5 lavatórios e 5 bacias sanitárias com caixa acoplada (duplo acionamento), além disso, os banheiros masculinos possuem mictórios tipo calha; ▪ no pavimento térreo há dois banheiros; tendo o banheiro masculino 5 bacias sanitárias com caixa acoplada, 5 lavatórios e 4 mictórios individuais de louça. Já os banheiros femininos, no térreo, possuem 6 lavatórios e 4 bacias sanitárias com caixa acoplada; ▪ área de jardim: 30 m²
<p>População</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ flutuante: média semanal de 2405 alunos, segundo a diretoria de assuntos acadêmicos da instituição envolvida, 441 usuários por dia útil e 200 aos sábados; ▪ fixa: 11 pessoas, todos funcionários da instituição
<p>Dados para a determinação da demanda diária de água pluvial</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ número médio de acionamentos da descarga das bacias sanitárias nos dias da semana e aos sábados^a: 0,9 descarga/aluno.dia; 75% delas com volume parcial (3,4 L/descarga) e 25% com volume total (6,8 L/descarga); ▪ irrigação paisagística^a: três vezes por semana (às segundas, quintas e aos sábados, com uma vazão de 0,12 L/s durante 10 minutos, em toda a área de jardim; ▪ lavagem do piso: (a)^a com pano e balde durante os dias úteis, utilizando 0,5 L/m² e (b)^a com balde e rodo aos sábados, utilizando 1,0 L/m²; ▪ variação sazonal: irrigação do jardim e a lavagem do piso ao longo do ano, independente das férias escolares; uso da bacia sanitária somente nos meses de março a junho, na primeira quinzena do mês de Julho, de agosto a novembro e nos últimos dez dias do mês de dezembro.

^a levantados via questionário ou medidos no local. ^b MELO; NETO (1988)³ apud TOMAZ (2000)

³ MELO, V. O.; NETTO, J. M. A. **Instalações prediais hidráulico sanitárias**. São Paulo: Edgard Blucher, 1988. 185p. 1ª. reimpressão.

Tabela 4-3: Estimativa da demanda de água pluvial – edificação representativa da categoria tarifária 2 - comercial.

Caracterização da edificação representativa (edificação a ser construída)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ edifício de escritórios comerciais e de serviços; com 2 pavimentos com 28 salas em cada um deles, totalizando 56 salas comerciais; ▪ cada sala tipo possui um banheiro com um lavatório e uma bacia sanitária; ▪ área de piso lavável: 1485,60 m² ▪ área de jardim: 675,65 m²
População estimada ^a	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 pessoa/3,3 m² → população total de 757 pessoas
Dados para a determinação da demanda diária de água pluvial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ número médio de acionamentos da descarga das bacias sanitárias nos dias da semana: 3 descargas/dia^a, 2 delas com volume parcial (3,4 L/descarga) e 1 com volume total (6,8 L/descarga); ▪ irrigação paisagística^b: três vezes por semana (às segundas, quintas e aos sábados, usando 1 L/m²; ▪ lavagem do piso^b: às segundas-feiras, usando 1L/m²

^a Fonte: TOMAZ (2000) ^b MELO; NETO (1988) ^c apud TOMAZ (2000)

Tabela 4-4: Estimativa da demanda de água pluvial – edificação representativa da categoria tarifária 3 - industrial.

Caracterização da edificação representativa (edificação a ser construída)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ edificação constituinte de um complexo industrial, com 4 pavimentos; ▪ o pavimento térreo não possui banheiros; ▪ cada um dos demais pavimentos possui salas de escritórios que abrigam o setor administrativo da indústria em questão e 4 banheiros, dois masculinos e dois femininos; ▪ área de piso lavável: 677,13 m² ▪ área de jardim: 410,55 m²
População estimada ^a	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 180 pessoas
Dados para a determinação da demanda diária de água pluvial	<ul style="list-style-type: none"> ▪ número médio de acionamentos da descarga das bacias sanitárias nos dias da semana: 3 descargas/dia^a, 2 delas com volume parcial (3,4 L/descarga) e 1 com volume total (6,8 L/descarga); ▪ irrigação paisagística^b: três vezes por semana (às segundas, quintas e aos sábados, usando 1 L/m²; ▪ lavagem do piso^b: às segundas-feiras, usando 1L/m²

^a número de usuários previstos de acordo com empresa proprietária da edificação ^b MELO; NETO (1988) ^c apud TOMAZ (2000)

A partir da estimativa da oferta e da demanda da água pluvial, foi determinado o volume de água pluvial que restou dentro do reservatório. Assim, considerando-se que no momento inicial o reservatório está cheio verificou-se, a cada final de dia, o volume de água pluvial que restaria no reservatório, conforme a Equação 9.

⁴ MELO, V. O.; NETTO, J. M. A. **Instalações prediais hidráulico sanitárias**. São Paulo: Edgard Blucher, 1988. 185p. 1ª. reimpressão.

$$V_t = V_{t-1} + V_{\text{aprov}} - D \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

V_t : volume existente no reservatório no final do dia, em m^3 ;

V_{t-1} : volume inicial do reservatório, em m^3 ;

V_{aprov} : volume aproveitado (Equação 4), em m^3 ;

D: Demanda diária de água pluvial, em m^3 .

Ou seja, a partir da definição do volume do reservatório, pode ser determinado o volume consumido diariamente:

- caso $V_{t-1} + V_{\text{aprov}}$ ou V_t seja superior à demanda, o valor consumido diário será igual a D;
- caso $V_t=0$ e $V_{t-1} + V_{\text{aprov}} =0$, o valor consumido diariamente será igual a zero;
- caso $V_t - V_{t-1} - V_{\text{aprov}}$ for inferior a demanda, mas superior a zero, o valor consumido será igual a $V_t - V_{t-1} - V_{\text{aprov}}$.

Esse volume consumido será o responsável pela economia de água potável e, conseqüentemente, depois de multiplicado pelo valor da conta de água, fornecerá o valor de redução da conta de água, constituindo as entradas do fluxo de caixa, conforme comentado anteriormente.

Para a determinação dos valores da conta de água referente aos diferentes cenários avaliados dentro de cada estudo de caso, foi considerada a estrutura tarifária aplicada pela concessionária de água e esgoto local (SANASA, 2012), a qual é reproduzida, para as categorias investigadas, na Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Tarifa de serviços de abastecimento de água aplicadas pela concessionária de água e esgoto da cidade de Campinas - SANASA (valores em Reais, ano-base: 2011)

Faixa de consumo (m³/mês)	Categoria comercial	Categoria industrial
0 a 10	36,43	33,26
11 a 20	6,08V - 24,37	3,60V - 2,74
21 a 30	9,68V - 96,37	7,29 V - 76,54
31 a 40	11,38V - 147,37	8,43V - 110,74
41 a 50	13,25V - 222,17	9,78V - 164,74
Acima de 50	15,98V - 358,67	17,08V - 529,74
Categoria pública		
0 a 10	21,53	
11 a 20	6,08V - 39,27	
21 a 40	10,12V - 120,07	
41 a 50	12,14V - 200,87	
Acima de 50	15,83V - 385,37	

As tarifas aplicadas pela concessionária de água e esgoto local têm sofrido reajustes anuais e, a cada quatro anos, ocorre uma reestruturação tarifária completa (SANASA, 2012). Para os reajustes futuros da tarifa de abastecimento de água, considerou-se o comportamento histórico dos reajustes verificado entre os anos de 2001 e 2009, cujo resumo é apresentado na Tabela 4-6.

A partir das definições destes valores, repetiu-se a mesma série de reajustes para os anos futuros, uma vez que não há previsões mais concretas para os referidos reajustes. Sendo assim, a partir de 2012, a série de reajustes apresentada foi considerada como repetindo até 2021 e, assim sucessivamente, até completar a vida útil do sistema.

Tabela 4-6: Comportamento dos reajustes da tarifa de abastecimento de água aplicados pela concessionária de água e esgoto local. Período: 2001-2009. Valores em porcentagem.

Categoria	2001-02	2002-03	2003-04	2004-05	2005-06	2006-07	2007-08	2008-09
pública	9,45	19,63	5,59	18,00	7,98	7,98	6,64	11,82
comercial	9,46	19,63	5,57	8,09	8,00	8,00	6,64	11,80
industrial	9,46	19,66	5,59	0,00	8,01	7,98	6,63	11,79

Fonte: SANASA (2012)

Para os três estudos de caso foram considerados os seguintes cenários:

- A. valor da conta de água determinado pela estrutura tarifária atualmente empregada pela concessionária de água e esgoto local, com e sem a cobrança da tarifa de esgoto sanitário correspondente ao volume de água pluvial empregado (100% em relação ao volume de água consumido);
- B. valor da conta de água obtido considerando-se um acréscimo de 100% na estrutura tarifária atual, com e sem a cobrança da tarifa de esgoto sanitário correspondente;
- C. valor da conta de água obtido considerando-se um acréscimo de 150% na estrutura tarifária atual, com e sem a cobrança da tarifa de esgoto sanitário correspondente; e
- D. valor da conta de água obtido considerando-se um acréscimo de 200% na estrutura tarifária atual, com e sem a cobrança da tarifa de esgoto sanitário correspondente.

4.2.1.4 Taxa de desconto e duração do projeto

Conforme apresentado na revisão da literatura, a taxa de desconto é a taxa de atratividade mínima que será utilizada para determinar o valor presente líquido.

Considerando os trabalhos desenvolvidos por Rocha Lima Junior & Alencar (2006) e Alencar (2004), foi selecionada nesse trabalho uma taxa de atratividade de 0,83%. Isso foi motivado pelos seguintes aspectos: similaridade entre os estudos realizados pelos referidos autores e o problema em questão no presente trabalho, traduzidas por longos períodos de duração do projeto investigado e grande incerteza dos valores econômicos que serão praticados no futuro. Além disso, o trabalho desenvolvido por Alencar (2004) analisa investimentos em tecnologias que promovem a sustentabilidade, ou seja, há similaridade, também, no objeto de estudo.

A duração do projeto, por sua vez, pode ser definida como o período do investimento em que haverá entradas e saídas do fluxo de caixa. Durante este período, o projeto estará economicamente produtivo.

No presente trabalho foi considerado que a duração do projeto equivale à vida útil do reservatório. A partir da ABNT (2010), foi adotada uma vida útil dos reservatórios de concreto igual a 20 anos. Assim, a duração do projeto, para fins de construção do fluxo de caixa é de 20 anos (240 meses) para todos os estudos de caso desenvolvidos, cujos resultados são apresentados no item seguinte.

4.3 Avaliação da qualidade do investimento em sistemas de aproveitamento de água pluvial com o emprego da PSO – aplicações

Este item apresenta os resultados obtidos com o emprego da ferramenta desenvolvida para a análise da qualidade dos investimentos em sistemas de aproveitamento da água pluvial para os três estudos de caso desenvolvidos nesse trabalho.

A caracterização das edificações representativas das categorias tarifárias selecionadas, os parâmetros e equacionamentos empregados para a determinação da oferta e da demanda de água pluvial em cada uma delas e as funções de custo e o fluxo de caixa descontado utilizados foram também apresentados no capítulo de Método.

4.3.1 Categoria tarifária 1 – pública

A edificação representativa da categoria tarifária pública consiste em um conjunto de edifícios de salas de aula de uma instituição de ensino superior.

A Tabela 4-7 apresenta a demanda diária estimada de água pluvial para essa edificação e a Tabela 4-8 apresenta os resultados obtidos com o emprego da ferramenta de otimização desenvolvida.

Tabela 4-7: Demanda diária de água pluvial da edificação representativa da categoria tarifária Pública

Mês		Demanda Diária (m ³)					
		Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb
Janeiro e Fevereiro		0,836	0,764	0,764	0,836	0,764	1,599
Julho	01 a 15	2,522	2,450	2,450	2,522	2,450	2,364
	16 a 31	0,836	0,764	0,764	0,836	0,764	1,599
Dezembro	01 a 20	2,522	2,450	2,450	2,522	2,450	2,364
	21 a 31	0,836	0,764	0,764	0,836	0,764	1,599
Março a Junho e Agosto a Novembro – semestre letivo		2,522	2,450	2,450	2,522	2,450	2,364

Tabela 4-8: Volumes e respectivos VPL (valor máximo), considerando a estrutura tarifária atual (A) e para reajustes de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – aplicação 1 – categoria Pública

Cenário de valor da conta	Com cobrança da taxa de esgoto (100% do consumo de água)		Sem cobrança da taxa de esgoto	
	Volume (m ³)	VPL (R\$)	Volume (m ³)	VPL (R\$)
A ¹	22,50	159.800,62	18,51	68.909,85
B	30,98	319.026,62	22,50	159.800,62
C	42,32	403.770,49	27,11	216.387,11
D	45,00	485.620,32	27,33	225.568,20

¹ considerando-se os valores cobrados no ano de 2011 pela concessionária de água e esgoto local, apresentados no item de Método.

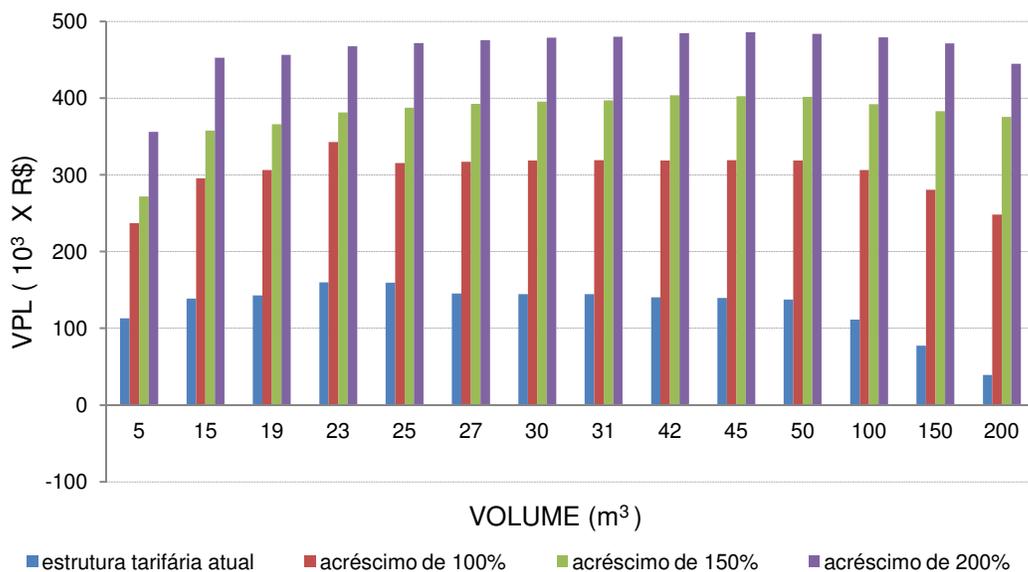
Quando considerada a cobrança da tarifa de esgoto correspondente ao volume de água pluvial, os volumes a serem reservados variam significativamente quando analisados os quatro cenários da estrutura tarifária. Ou seja, o exercício de tarifas maiores promoveria oportunidade no aumento dos volumes, uma vez que permite ter retornos econômicos maiores para equilibrar e ultrapassar os investimentos nestes reservatórios, melhorando a qualidade do investimento na medida em que se aumenta a tarifa.

Este comportamento também se observa quando não há a cobrança da taxa de esgoto, entretanto a magnitude do aumento do volume é menor do que no caso anterior. Isso

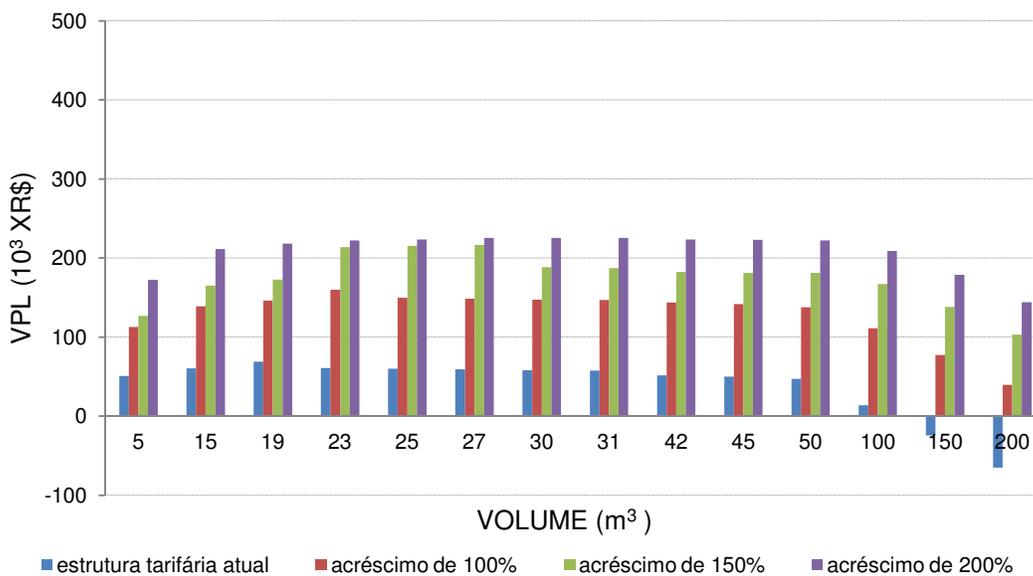
se deve ao fato de que o retorno econômico quando da inexistência da tarifa de esgoto é menor, e, portanto, não há vantagem econômica em adotar um volume maior de armazenamento.

Por exemplo, comparando-se o cenário D (200% de acréscimo nos valores da estrutura tarifária atual) com o cenário A (tarifa atual), verifica-se um aumento do volume de 100% no caso da cobrança da tarifa de esgoto e de cerca de 48% quando da inexistência da referida cobrança.

A partir disso, foi efetuada uma análise de sensibilidade empregando a ferramenta desenvolvida e considerando diferentes volumes teóricos dentro dos cenários de estrutura tarifária apresentados, com o intuito de validar o resultado obtido com o emprego da PSO ao determinar o maior VPL possível. A Figura 4-6 apresenta os resultados obtidos, respectivamente para os cenários que consideram a cobrança do esgoto gerado pelo uso da água pluvial e os que desconsideram a referida tarifa.



(I) COM A COBRANÇA DA TARIFA DE ESGOTO (100% do valor do volume de água)



(II) SEM A COBRANÇA DA TARIFA DE ESGOTO

Figura 4-6: Valores de VPL correspondentes a diversos volumes de armazenamento, considerando a estrutura tarifária atual com (I) e sem (II) a tarifa de esgoto decorrente do uso da água pluvial e para acréscimos nesse valor de 100, 150 e 200% - aplicação 1 – categoria Pública

Observa-se que para todas as estruturas tarifárias e para os cenários de cobrança e de não cobrança da taxa de esgoto, os valores obtidos pelo PSO coincidem com os máximos atingidos pela simulação.

Estes resultados permitem também, caso desejado, a escolha de um volume que não seja necessariamente o ótimo do ponto de vista econômico, caso os investimentos iniciais necessários para implantar o volume ótimo não estejam disponíveis. Além disso, permite que se avalie o montante de recursos econômicos que seriam investidos de forma desnecessária com volumes maiores do que o ótimo sob este ponto de vista, contribuindo diretamente para a qualidade do investimento realizada.

4.3.2 Categoria tarifária 2 –comercial

Para a categoria tarifária comercial foi selecionado um conjunto de salas comerciais e de serviços. A demanda diária estimada de água pluvial é apresentada na Tabela 4-9 e os resultados obtidos com o emprego da ferramenta de otimização desenvolvida são apresentados na Tabela 4-10.

Tabela 4-9: Demanda diária de água pluvial da edificação representativa da categoria tarifária comercial.

Mês	Demanda diária (m ³)					
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb
Janeiro a Dezembro	12,456	10,295	10,295	10,971	10,295	5,823

Tabela 4-10: Volumes e respectivos VPL (valor máximo), considerando a estrutura tarifária atual (A) e para reajustes de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – aplicação 2 – categoria Pública.

Cenário de valor da conta	Com cobrança da taxa de esgoto (100% do consumo de água)		Sem cobrança da taxa de esgoto	
	Volume (m ³)	VPL (R\$)	Volume (m ³)	VPL (R\$)
A ¹	116,21	798.810,90	74,00	361.035,64
B	140,25	1.670.267,52	104,69	812.489,06
C	152,55	2.053.723,62	119,87	969.874,66
D	186,16	2.631.400,48	132,72	1.216.968,91

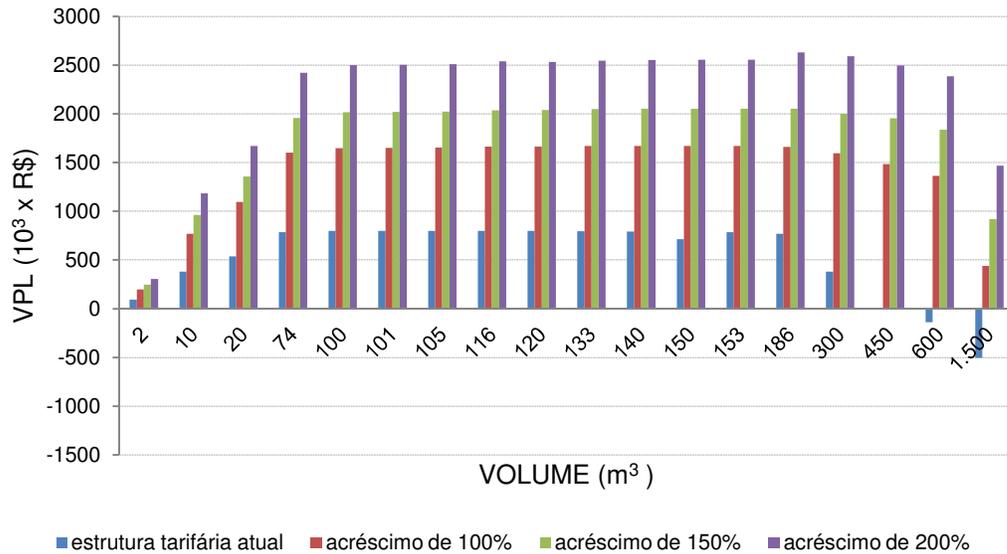
¹ considerando-se os valores cobrados no ano de 2011 pela concessionária de água e esgoto local, apresentados no item de Método.

Nessa aplicação, o impacto da cobrança da taxa de esgoto foi um pouco menor, devido aos maiores valores das faixas contempladas na estrutura tarifária e também pela elevada demanda de água pluvial da edificação selecionada para a análise.

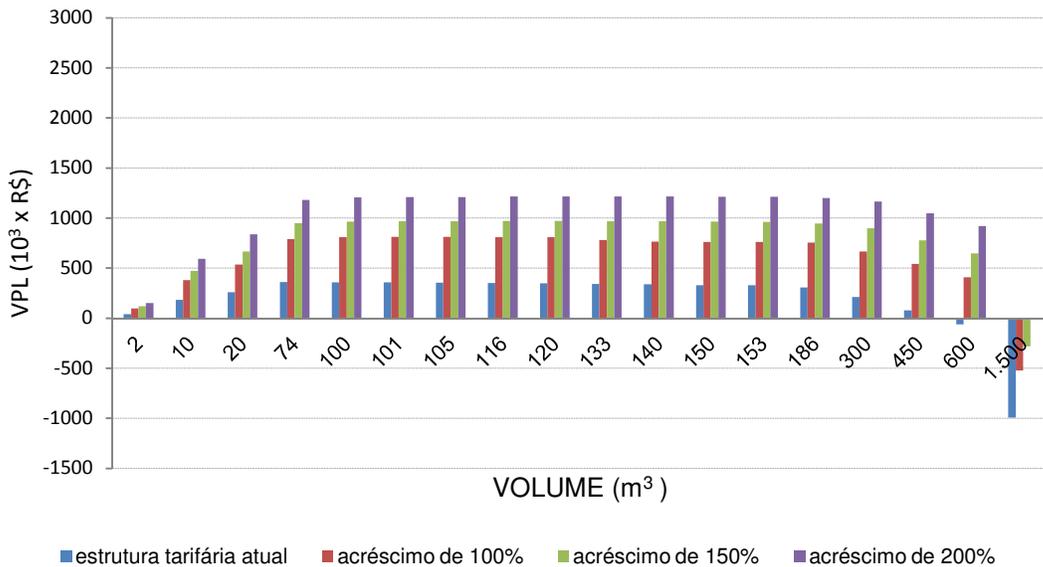
O aumento relativo dos volumes ótimos dos cenários sem a cobrança da tarifa de esgoto foi maior do que quando considerada a referida cobrança de esgoto. No caso do cenário A (estrutura tarifária atual) com cobrança da tarifa de esgoto, o volume encontrado já explora o potencial de aproveitamento da edificação, uma vez que se pode aproveitar grande parte do volume precipitado. Sendo assim, o impacto no acréscimo de tarifa não é tão significativo como o que ocorre quando não há essa cobrança, uma vez que os volumes de armazenamento ainda são menores.

Contudo, de maneira similar a aplicação anterior, fica evidente o incentivo ao emprego de volumes maiores em situações de tarifas mais elevadas para que se tenha uma maior qualidade do investimento a ser realizado.

Os resultados da análise de sensibilidade desenvolvida para essa aplicação são apresentados na Figura 4-7.



(I) COM A COBRANÇA DA TARIFA DE ESGOTO (100% do valor do volume de água)



(II) SEM A COBRANÇA DA TARIFA DE ESGOTO

Figura 4-7: Valores de VPL correspondentes a diversos volumes de armazenamento, considerando a estrutura tarifária atual com (I) e sem (II) a tarifa de esgoto decorrente do uso da água pluvial e para acréscimos nesse valor de 100, 150 e 200% - aplicação 2 – categoria comercial

De maneira similar à aplicação anterior, os resultados apresentados pelo algoritmo PSO para todas as estruturas tarifárias e para os cenários de cobrança e de não cobrança da taxa de esgoto coincidem com os máximos atingidos pela simulação realizada com a ferramenta desenvolvida.

4.3.3 Categoria tarifária 3 – industrial

Para a análise dessa categoria tarifária, foi considerada uma edificação existente dentro de um complexo industrial, a qual abriga a parte administrativa da indústria em questão. Portanto, os tipos de usos a serem dados para a água pluvial são semelhantes ao considerados nas demais aplicações apresentadas.

A demanda diária estimada de água pluvial é apresentada na Tabela 4-11 e a Tabela 4-12 apresenta os resultados obtidos com o emprego da ferramenta de otimização desenvolvida.

Tabela 4-11: Demanda diária de água pluvial da edificação representativa da categoria tarifária industrial

Mês	Demanda Diária (m ³)						
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb	Dom
Janeiro a Dezembro	2,858	2,448	2,858	2,448	2,448	3,528	2,448

Tabela 4-12: Volumes e respectivos VPL (valor máximo), considerando a estrutura tarifária atual (A) e para reajustes de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – aplicação 3 – categoria industrial

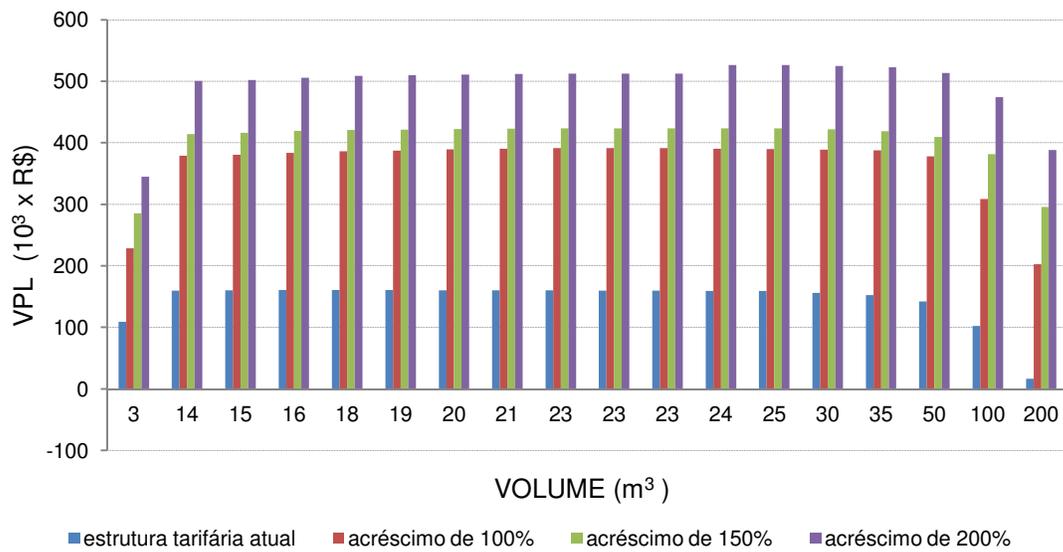
Cenário de valor da conta	Com cobrança da taxa de esgoto (100% do consumo de água)		Sem cobrança da taxa de esgoto	
	Volume (m ³)	VPL (R\$)	Volume (m ³)	VPL (R\$)
A ¹	17,92	160.602,76	14,45	70.941,08
B	22,75	391.426,71	18,58	160.783,42
C	22,84	423.270,78	20,00	200.500,97
D	24,48	526.175,40	21,25	251.463,30

¹ considerando-se os valores cobrados no ano de 2011 pela concessionária de água e esgoto local, apresentados no item de Método.

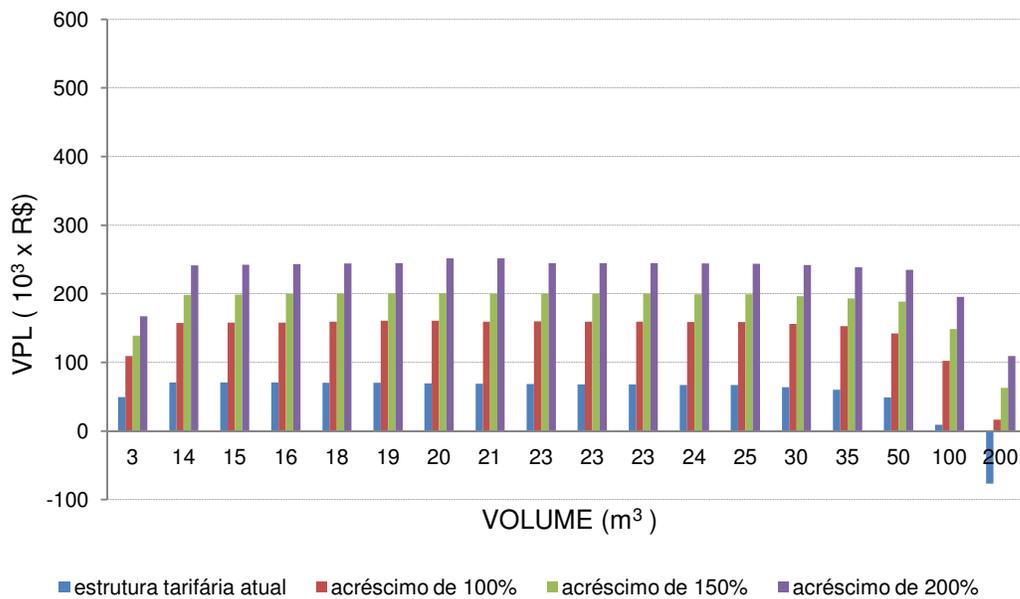
Observa-se novamente o aumento dos volumes ótimos à medida que se tem acréscimos na estrutura tarifária atual, fato que contribui para uma melhoria na qualidade dos investimentos, por meio do ganho de oportunidade de se reservar mais para compensar tarifas mais elevadas.

Verifica-se também que os aumentos dos volumes apresentaram diferentes magnitudes para os cenários com e sem cobrança da tarifa de esgoto (37% e 47%). Comparado aos valores das outras categorias tarifárias, vê-se que tais aumentos foram inferiores, o que pode ser explicado pela alta demanda desta edificação e uma baixa oferta, decorrente da pequena área de captação.

Os resultados da análise de sensibilidade realizada para a verificação da eficiência do uso da PSO são apresentados na Figura 4-8.



(I) COM A COBRANÇA DA TARIFA DE ESGOTO (100% do valor do volume de água)



(II) SEM A COBRANÇA DA TARIFA DE ESGOTO

Figura 4-8: Valores de VPL correspondentes a diversos volumes de armazenamento, considerando a estrutura tarifária atual com (I) e sem (II) a tarifa de esgoto decorrente do uso da água pluvial e para acréscimos nesse valor de 100, 150 e 200% - aplicação 3 – categoria industrial

A simulação realizada apontou valores coincidentes com obtidos com a aplicação do algoritmo da ferramenta desenvolvida, indicando a aderência do mesmo ao problema em questão.

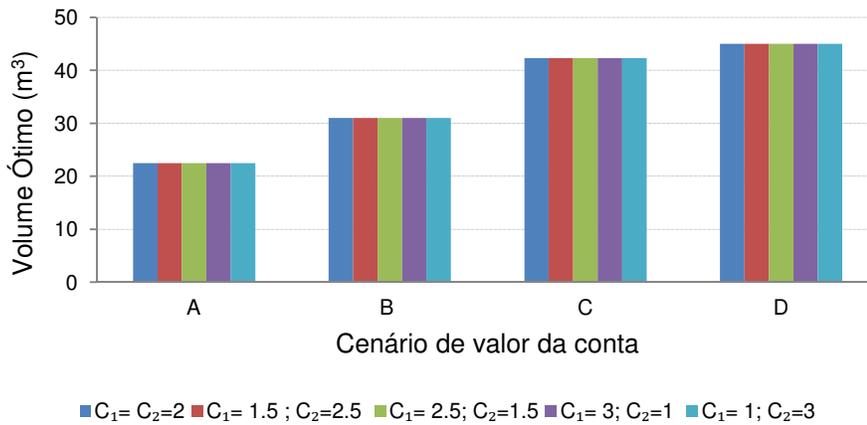
4.4 Validação por meio da análise de sensibilidade das variáveis do algoritmo da PSO

Conforme destacado, três variáveis determinam o comportamento e, conseqüentemente, os resultados obtidos com a ferramenta desenvolvida com o emprego da PSO: o fator de inércia ω e os parâmetros cognitivo e social, C_1 e C_2 . Nesse sentido, foram avaliados os efeitos da variação desses parâmetros considerando valores dentro das faixas $C_1 + C_2 = 4$ e ω entre 0,4 e 0,9, conforme a bibliografia consultada.

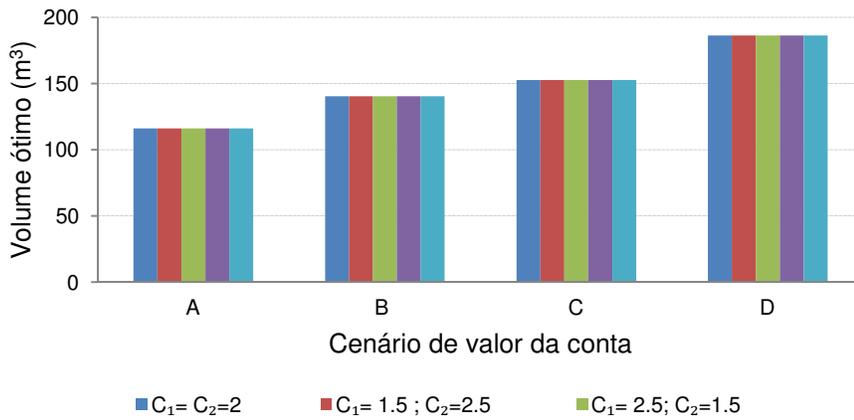
Assim, as seguintes combinações de valores foram analisadas:

- parâmetros cognitivos e sociais: $C_1 = C_2 = 2$; $C_1 = 1,5$ e $C_2 = 2,5$; $C_1 = 2,5$ e $C_2 = 1,5$, $C_1 = 3$ e $C_2 = 1$; $C_1 = 1$ e $C_2 = 3$;
- fator de inércia: 0,5, 0,6 e 0,8.

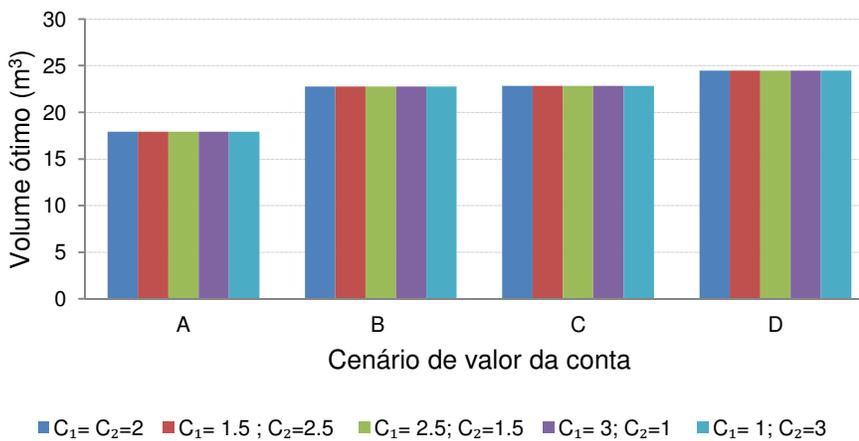
A título de ilustração, a Figura 4-9 apresenta os resultados obtidos para fator de inércia igual a 0,5 para diferentes combinações de C_1 e C_2 ; e a Figura 4-10 apresenta os resultados da simulação com $C_1 = C_2 = 2$, e os fatores de inércia selecionados.



Categoria tarifária 1 - Pública



Categoria tarifária 2 - comercial



Categoria tarifária 3 - industrial

Figura 4-9: Análise comparativa dos parâmetros cognitivos e sociais da PSO com fator de inércia (ω) igual a 0,5, para a estrutura tarifária atual (A) e para acréscimos de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – categorias tarifárias: Pública, comercial e industrial

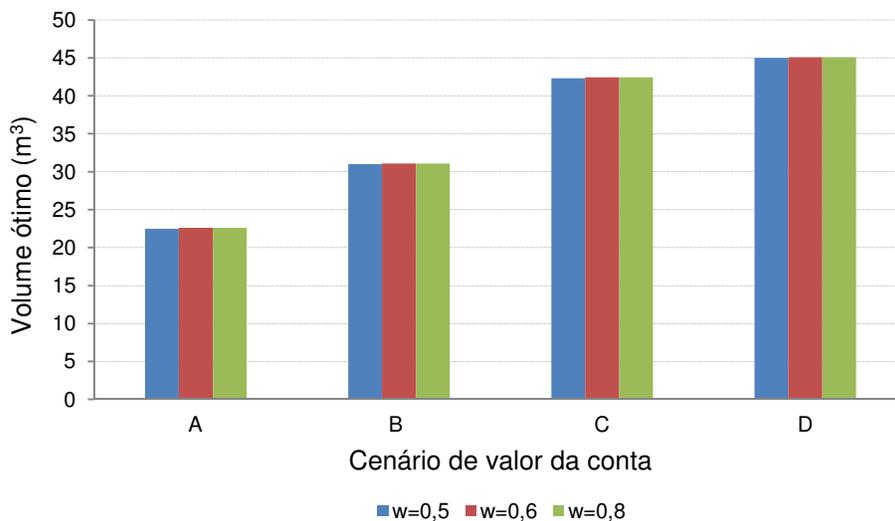


Figura 4-10: Análise comparativa do fator de inércia (ω) com $C_1=2$; $C_2 =2$ - considerando a estrutura tarifária atual (A) e para acréscimos de 100 (B), 150 (C) e 200% (D) – categoria tarifária 1 – Pública

Observa-se que os resultados foram similares para diferentes de C_1 e C_2 em todas as classes tarifárias consideradas.

Por sua vez, a variação do fator de inércia resultou em flutuações do valor do volume representativo do maior VPL em torno de 0,01 a 0,02 m^3 . Esta diferença foi observada em todas as avaliações efetuadas, considerando-se somente a tarifa da água ou da água e esgoto, conforme o caso; e em todas as categorias tarifárias apresentadas no capítulo de Método. Contudo, estas variações podem ser consideradas desprezíveis em função da magnitude dos volumes totais de armazenamento obtidos.

Os resultados obtidos corroboram com aqueles constantes em estudos que empregam a PSO no desenvolvimento de ferramentas de otimização consultados na literatura (Ebehart & Shi, 2000; Schutte & Groenwold, 2005; Engelbrecht, 2007): em determinados problemas, com universos pequenos, os fatores analisados têm pouca ou nenhuma variação quando usados dentro das faixas consideradas.

Assim, a partir dos resultados obtidos na validação efetuada, conclui-se que as variáveis determinantes do desempenho da ferramenta desenvolvida para o problema em questão apresentam um comportamento compatível com o esperado, não afetando a ordem de grandeza dos resultados obtidos com a sua utilização.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs a análise da qualidade de investimentos em sistemas de aproveitamento de água pluvial, por meio da utilização da técnica de *Particles Swarm Optimization* (PSO) para a maximização do VPL. A PSO foi selecionada pela sua flexibilidade, que permite incorporar outras variáveis no futuro, mesmo para uma situação de simples cálculo como a do problema em questão.

A ferramenta desenvolvida apresenta interfaces gráficas que permitem a entrada dos dados de forma simples e direta, facilitando a sua utilização.

Os resultados obtidos com as aplicações realizadas indicam melhorias na qualidade dos investimentos à medida em que há acréscimos na tarifa atual da água. Nos casos em que a demanda é alta, mas a estrutura tarifária contempla faixas de valores mais baixos, o aumento relativo dos volumes ótimos correspondentes aos maiores VPL é maior do que nos casos em que as demandas são menores, uma vez que ainda há potencial para se aproveitar mais água pluvial.

De sua vez, quando a demanda é alta, mas a oferta de água pluvial não é suficiente para supri-la na sua totalidade, o aumento relativo dos volumes ótimos é menor do que nos casos que a oferta consegue atender plenamente à demanda estimada.

Embora os cenários de acréscimos da tarifa considerados nas aplicações realizadas possam parecer, a princípio, elevados, dois fatores principais poderão contribuir para que, a curto ou médio prazo, as tarifas sofram acréscimos significativos.

O primeiro fator refere-se à cobrança pelo uso da água bruta, já implantada em algumas bacias hidrográficas do país, cujos custos poderão ser repassados para os usuários finais. O segundo relaciona-se à cobrança de tarifa de drenagem. Nesse sentido, ressalta-se que a Lei Federal 9433, no Artigo 12 (BRASIL,1997), permite a

cobrança pelo lançamento de esgoto pluvial em corpos hídricos. Embora amparada sob aspectos legais e técnicos, inclusive com jurisprudência de julgamento do Superior Tribunal Federal, esta cobrança ainda não existe na grande maioria dos municípios brasileiros. Entretanto, há grande possibilidade que esta previsão se torne realidade nos próximos anos, devido à crescente necessidade de investimentos para controle das cheias urbanas.

Outro aspecto que deve ser considerado e que motivou a análise nesse trabalho de dois cenários para cada aplicação realizada é a cobrança de tarifa de esgoto sanitário decorrente do uso da água pluvial, já implantado por algumas concessionárias de água e esgoto no país. Essa cobrança implica em uma tarifa mais elevada, o que torna mais vantajoso reservar um maior volume de água como compensação.

Há que se considerar, contudo que, se por um lado esses aspectos podem contribuir para tornar as tarifas de água e esgoto aplicadas atualmente muito mais elevadas no futuro, por outro, a existência de uma política de subsídios públicos como a que se tem no presente pode distorcer a estrutura tarifária a ser empregada no futuro. A parcela que é efetivamente subsidiada, por quanto tempo este subsídio existirá e qual o valor que ela representará, são informações importantes para a análise da qualidade dos investimentos; contudo, não há domínio dessas informações por parte dos investidores.

O grau de incerteza dessas questões, por sua vez, indica que o emprego de técnicas que possam valorá-las, tais como a análise de opções reais (ROA) podem agregar valor ao processo de análise da qualidade dos investimentos a serem realizados com a implantação de sistemas de aproveitamento de água pluvial. A técnica de PSO, tendo em vista as vantagens apresentadas, pode ser empregada para tanto, sendo que uma das recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros é justamente avaliar essa aplicação.

Tendo em vista que para avaliações econômicas de sistemas destinados à conservação de água (uso racional e emprego de fontes de água não potável), tem sido

frequentemente considerado pelo meio técnico em geral apenas o período de retorno dos investimentos (*pay-back*), a ferramenta disponibilizada nesse trabalho permite uma análise da qualidade dos investimentos de forma mais detalhada, pois o VPL permite quantificar os retornos ao longo do tempo, além de ser mais indicado para realização de análises comparativas entre opções mutuamente excludentes, como o problema em questão.

Destaca-se, por fim, que os resultados obtidos nesse trabalho não devem ser generalizados para diferentes regimes pluviométricos, estruturas tarifárias e materiais, pois tratam-se de apenas três aplicações específicas. Além disso, as demandas de água pluvial foram estimadas e podem ser diferenciadas para outras realidades de consumo.

REFERÊNCIAS

ABDELAZIZ, A. Y; MOHAMMED, F. M.; MEKHAMER, S. F.; BADR, M. A. L. Distribution Systems Reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm. **Electric Power Systems Research**. Reino Unido. V. 79 p 1521-1530, 2009.

AGRITEMPO – Sistema de monitoramento agrometeorológico. Disponível em: < <http://www.agritempo.gov.br>> Acesso em: 23 de setembro de 2010.

ALENCAR, C. T. O equilíbrio entre a sustentabilidade e a atratividade do investimento em edifícios de escritórios para locação em São Paulo. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL/ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1/10. 2004, São Paulo. **Anais eletrônicos** São Paulo, 2004.

AMORIM, S. V.; PEREIRA, D. J. A. Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial. **Ambiente Construído**. Brasil. v. 08, p. 53-66, 2008.

ANDRÉ, P. T. A.; PELIN, E. R. **Elementos de análise econômica relativos ao consumo predial**. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. DTA - Documentos Técnicos de Apoio B1. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento. 1998. 50p.

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

_____. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho Parte 1; Requisitos Gerais. Rio de Janeiro. 2010.

_____. **NBR 15097-1** Aparelhos sanitários de material cerâmico – Parte 1 – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2011a.

_____. **NBR 15097-1** Aparelhos sanitários de material cerâmico – Parte 2 – Procedimentos para instalação. Rio de Janeiro, 2011b.

BARRETO, D. ; MEDEIROS, O. Caracterização da vazão e frequência de uso de aparelhos sanitários. **Ambiente Construído**. Brasil. v. 8, p. 137-149, 2008..

BASTOS, E. A. **Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos**, Dissertação (Mestrado) COOPE-UFRJ Rio de Janeiro. 2004. 168p.

BASTOS FILHO, C. J. A.; LIMA NETO, F. B. DE; LINS, A. J. C. C.; NASCIMENTO, A. I. S.; LIMA, M. P. A novel search algorithm based on fish school behavior. In: **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, 2008. Singapura. **Proceedings**. Singapura, 2008.

BENTLEY. SWMM – **Storm Water Modeling and Management**. Disponível em: <<http://www.bentley.com/en-US/Promo/HM+Solutions/SWMM.htm>>. Acesso em 16 de junho de 2011

BOERINGER, D. W.; WERNER, D. H. Particle Swarm Optimization Versus Genetic Algorithms for Phased Array Synthesis. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, United States, v.52, n. 3. 2004.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, DF, n. 6, 09 jan. 1997. Seção 1, p. 470-474

CAMPOS, M. A. S. **Aproveitamento de água pluvial em edifícios residenciais multifamiliares na cidade de São Carlos**. Dissertação (mestrado) PPGCiv/DECiv – UFSCar São Carlos, 2004. 131 p.

CAMPOS, M. A. S.; ILHA, M. S. DE O.; GRANJA, A. D. Investimentos em sistemas de aproveitamento de água pluvial: estudo de caso para uma edificação residencial multifamiliar no município de Campinas In: SIMPÓSIO BRASILEIRO EM GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 5. 2007, Campinas, SP. **Anais eletrônicos**. Campinas, 2007a.

CAMPOS, M. A. S.; ILHA, M. S. DE O.; NOUR, E. A. A.; FRANÇA, V. H.; ALVIM, C. R.. Sistemas de aproveitamento de água pluvial: aspectos qualitativos e quantitativos In: SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS, 10. 2007, São Carlos. **Anais eletrônicos**. São Carlos, 2007b.

CANÔAS, A. C. G. **Lógica Nebulosa e Técnica de Otimização Particle Swarm aplicadas ao controle de tensão e de potência reativa**. Tese (doutorado) FEEC-UNICAMP Campinas. 2008. 139p.

CARACIOLO, M.; FERNANDES, D.; BOCKHOLT, T.; SOARES, L. **ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MOTION**. Disponível em: <<http://aimotion.blogspot.com>> Acesso em : 10 de fevereiro de 2010.

CARRILHO, O. J. B. **Algoritmo Híbrido para Avaliação da Integridade Estrutural: Uma abordagem Heurística**. Tese (Doutorado) EESC-USP. São Carlos, 2007. 162 p.

CBCS. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Posicionamento do Comitê Temático Água sobre o uso de fontes alternativas de água nos edifícios**. 2009.

CHENG, C.; LIAO, M.; LEE, M. A quantitative evaluation method for rainwater use guideline. **Building Service Engineering Research & Technology**. Estados Unidos. V. 27 n 3 p 209-218, 2006.

COHIM, E. D. É seguro usar água de chuva para banho? In: SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS, 11 Curitiba. **Anais eletrônicos**. Curitiba, 2009.

COHIM, E. D.; GARCIA, A.; KIPERSTOK, A. Captação e utilização de água pluvial em residências para população de baixa renda em áreas urbanas: estudo de caso. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador. **Anais eletrônicos**. Salvador, 2008.

COPELAND, T.; ANTIKAROV, V. **OPÇÕES REAIS: Um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos** 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2001. 368 p.

CQA – Centro de Qualidade Analítica . Disponível em: <<http://www.cqa.com.br>> Acesso em: 30 de janeiro 2012.

DASGUPTA, D.; ZBIGNIEW, M. **Evolutionary Algorithms in Engineering Applications** 1st ed. Alemanha. Springer, 1997. 561 p.

DESPINS, C.; FARAHBAKHS, K.; LEIDL, C. Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada. **Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA**. Reino Unido. V. 58, n. 2, p. 117-134, 2009.

DIXON, A.; BUTLER, D.; FEWKES, A. Water saving potential of domestic water reuse systems using greywater and rainwater in combination **Water Science and Technology**. Reino Unido, V. 39, n. 5, p. 25-32, 1999.

DORIGO, M.; DI CARO, G. Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In Proceedings of the 1999 **Congress on Evolutionary Computation-CEC99** (Cat. No. 99TH8406), 1470-1477. IEEE, 1999.

COHIM, E. D.; GARCIA, A.; KIPERSTOK, A. Captação e utilização de água pluvial em residências para população de baixa renda em áreas urbanas: estudo de caso. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador. **Anais eletrônicos**. Salvador, 2008.

EBERHART, R. C.; SHI, Y. **Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization**. . [S.l.]: IEEE. , 2000

ENGELBRECHT, A. P. **Computational intelligence: an introduction**. 2nd ed. Wiley, 2007. 630 p.

FENDRICH R.; SANTOS, D. C. Discutindo a Lei 10.785 - PURAE. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS, 10. 2007, São Carlos. **Anais eletrônicos**. São Carlos, 2007.

FEWKES, A. The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. **Building and Environment**. Reino Unido. V. 34, p. 765-772, 1999.

FEWKES, A. Modeling the performance of rainwater collection systems: Towards a generalized approach. **Urban Water**. Reino Unido. V. 1 p. 323-333, 2000.

FIORI, S. **Potencial de reuso de água cinza em edifícios residenciais multifamiliares**. Dissertação (Mestrado) FEAR-UPF Passo Fundo. 2005. 143 p.

Fundação Nacional de Saúde – FUNASA . **Portaria N° 1.469** – Controle e Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade. Brasília. 2001. Disponível em: <<http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria1469.pdf>>. Acesso em: 31 de janeiro de 2012.

GHISI, E. Potencial for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. **Building and Environment**. Reino Unido, V. 41, p. 1544-1550, 2006.

GHISI, E.; BRESSAN, D. L.; MARTINI, M. Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil **Building and Environments**, Reino Unido. V. 42, p. 1654-1666, 2007.

GHISI, E.; TAVARES, D. F.; ROCHA, V. L. Rainwater harvesting in petrol stations in Brasília: potential for potable water savings and investment feasibility analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, Estados Unidos. V. 54, p. 79-85, 2009

GHISI, E.; CORDOVA, M. M.; ROCHA, V. L. **Netuno 3.0**. Programa computacional. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/>. 2011. Acesso em: 22 de janeiro de 2012

GHISI, E.; CARDOSO, K. A.; RUPP, R. F. Short-term versus long-term rainfall time series in the assessment of potable water savings by using rainwater in houses. **Journal of Environmental Management**, Estados Unidos. V. 100, n. 0, p. 109–119, 15 jun 2012.

GOULD, J.; NISSEN-PETERSEN. E. **Rainwater catchment systems for domestic supply** 2 ed. Reino Unido. Intermediate Technology Publications, 1999. 335 p.

HERNANDES, A. T. **Diretrizes para o gerenciamento da água pluvial nas edificações escolares municipais da cidade de Ribeirão Preto**. Dissertação (Mestrado). PPGCiv/DECiv- UFSCar. São Carlos. 2006. 308 p

HERNANDES, A. T.; AMORIM, S. V. Avaliação quantitativa e qualitativa de um sistema de aproveitamento de água pluvial em uma edificação na cidade de Ribeirão Preto *In:*

ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11. 2006, Santa Catarina. **Anais eletrônicos**. Santa Catarina, 2006.

HOUAISS, A. ; VILLAR, M. S. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro. Objetiva, 2001.

HU, X. **PARTICLE SWARM OPTIMIZATION**. Disponível em: <<http://www.swarmintelligence.org>> Acesso 13 nov. 2009.

KENNEDY, J. The particle swarm: social adaptation of knowledge. Evolutionary Computation, 1997., IEEE International Conference on. **Proceedings...** [S.l: s.n.]. , abr 1997

KENNEDY, J., EBERHART, R.. Particle swarm optimization. In: IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948. IEEE Computer Society, Los Alamitos. **Proceedings**.1995

KOHONEN, T. The self-organizing map. **Proceedings of the IEEE**, v. 78, n. 9, p. 1464–1480, 1990.

LIAW, C-H; TSAI, Y-L. Optimum Storage Volume of rooftop rainwater harvesting systems for domestic use. **Journal of the American Water Resources Association**, Estados Unidos, V. 40, n. 4, p. 901-912, 2004.

MAY, S. **Estudo de viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações** Dissertação (Mestrado). EPUSP-USP. São Paulo. 2004. 159 p.

MIELI, J. C. A., **Reuso de água domiciliar** Dissertação (Mestrado) UFF. Niteroi. 2001, 153p.

MIERZWA, J. C. ; HESPANHOL, I. ; SILVA, M. C. C. da ; RODRIGUES, L. D. B.. Águas Pluviais: método de cálculo do reservatório e conceitos para um aproveitamento adequado. **REGA. Revista de Gestão de Águas da América Latina**, Brasil. V. 4, p. 29-37, 2007.

MILLER, K. D.; WALLER, G.. Scenarios, Real Option and Integrated Risk management **Long Range Planning**, Estados Unidos. V. 36, p. 93-107, 2003.

MONTALVO, I.; IZQUIERDO, J.; SCHWARZE, S.; PÉREZ-GARCÍA, R. Agent Swarm Optimization: a paradigm to tackle complex problems. Application to water distribution systems design. In: International Congress on Environmental modeling and Software,5. 2010. Canadá. **Proceedings**.2010.

MONTEIRO, R. C.. **Contribuições da abordagem de avaliação de opções reais em ambientes econômicos de grande volatilidade - uma ênfase no cenário latino-americano**. Dissertação (Mestrado). FEA-USP. São Paulo, 2003. 200 p.

OLIVEIRA, L. H. **Metodologia para a implantação de programa de uso racional da água em edifícios.** Dissertação (Mestrado) EPUSP-USP. São Paulo. 1999. 344p.

PEIXOTO, L. M. **Requisitos e critérios de desempenho para sistema de água não potável de edifícios residenciais.** Dissertação (Mestrado) EPUSP-USP. São Paulo. 2008. 146 p.

RAMIREZ, N. **Valuing flexibility in infrastructure developments: the Bogotá Water Supply Expansion Plan** Dissertação (Mestrado). MIT. Estados Unidos, 2002. 226 p.

RAO, S.S. **Engineering optimization: Theory and Practice** 3rd ed. Canadá. Wiley, 2006.948 p.

ROCHA, A. L.; BARRETO, D.; IOSHIMOTO, E. **Caracterização e monitoramento do consumo predial de água.** Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água – DTA - Documento Técnico de apoio E1. Brasília, 1998.

ROCHA, B. C. C. M. **Avaliação do desempenho do sistema de descarte de água de chuva em coberturas de três diferentes tipos de materiais.** Dissertação (Mestrado) EEC-UFG. Goiânia, 2010. 186 p.

ROCHA LIMA JR, J. **Análise de investimentos: princípios e técnicas para empreendimentos do setor da construção civil.** São Paulo: EPUSP, 1993. 50p. (Texto técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil, TT/PCC/06).

ROCHA LIMA JR., J. **Decidir sobre investimentos no setor da Construção Civil.** São Paulo, EPUSP, 1998. 72p. (Boletim Técnico. EPUSP. Departamento de Construção Civil, BT/PCC/200).

ROCHA LIMA JR., J.; ALENCAR, C. T. The office buildings market in São Paulo: time cycles to absorb vacant space and to recover investment attractiveness. **Journal of Financial Management**, Estados Unidos. V. 11, n. 1, p. 171–180, 2006.

SANASA. Resolução Tarifária 01/2011. Disponível em ; < <http://www.sanasa.com.br>>. Acesso em: 21 de janeiro de 2012.

SANDRI, S.; CORREA, C. **Lógica Nebulosa.** In : Escola de Redes Neurais. ,5. PP c073-c090. São José dos Campos/SP. 1999.

SAUTCHUK, C. et al. Conservação e reuso de água em edificações. Agência Nacional de Água, Sinduscon-SP e FIESP. 2005.

SAZAKLI, E.; ALEXOPOULOS, A.; LEOTSINIDIS, M. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece **Water Research**, Reino Unido. V. 41, p. 2039-2047, 2007.

SCHUTTE, J. F.; GROENWOLD, A. A. A study of global optimization using particle swarms. **Journal of Global Optimization**, Reino Unido. V. 31, n. 1, p. 93–108, 2005.

SCORTEGAGNA, V.; BECKER, V. E. G.; FERNANDES, V. M. C. Estudo preliminar da eficiência de filtros com areia, brita e antracito para uso em sistemas de aproveitamento de águas pluviais. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS PREDIAIS*, 10. 2007, São Carlos. **Anais eletrônicos**. São Carlos, 2007.

SHARMA, T. C. A Markov-Weibull rains-sum model for designing rain water catchment systems. **Water Resources Management**, Reino unido, V. 10, n. 2, p. 147-162, 1995 1995.

SILVA, G. S. **Programas permanentes de uso racional da água em campi universitários: o programa de uso racional da água da Universidade de São Paulo**. . Dissertação (Mestrado) EPUSP-USP. São Paulo. 2004. 482 p.

SIMIONI, W. I.; GHISI, E.; GÓMEZ, L. A. Potencial de economia de água tratada através do aproveitamento de águas pluviais em postos de combustíveis :estudo de caso *In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL/ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 1/10. 2004, São Paulo. **Anais eletrônicos**. São Paulo, 2004.

SINDICADO DOS TRABALHADORES NAS INDÚSTRIAS DA CONSTRUÇÃO CIVIL DE SÃO PAULO - SINTRACONSP – Convenção Coletiva de Trabalho . Ano 2011. Maio, 2011. São Paulo. Disponível em: <http://www.sintraconsp.org.br>. Acesso em 30 janeiro de 2012.

TAYAL, M. **Particle Swarm Optimization for Mechanical Design**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Texas at Arlington , Arlington, Tx. Estados Unidos 2003. 93p.

TOMAZ, P. **Previsão de consumo de água**. 1ª Edição ed. Rio de Janeiro. Navegar Editora, 2000. 250 p.

TOMAZ, P. **Aproveitamento de água de chuva: aproveitamento de água de chuva para Áreas urbanas e fins não potáveis** 1ª Edição ed. Rio de Janeiro. Navegar Editora , 2003. 180p.

VALENCA, M.; LUDERMIR, T. Monthly stream flow forecasting using an neural fuzzy network model. *In: Brazilian Symposium on Neural Networks*, 6,2000. Brasil. **Proceedings Vol.1**. Brasil, 2000.

WALTHER, D.; THANASEKARAN, K. Cost-effective Dimensioning of Artificial Rainwater storage systems. *In: International Rainwater Catchment System Association Conference*,10. 2001, Alemanha . **Proceedings** Alemanha,2001.

YANG. K.; ZHAI, J. Particle Swarm optimization Algorithms for Optimal scheduling of Supply systems. *In: International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 2, 2009. China. **Proceedings**. China, 2009.

YAZIZ, M.I.; GUNTING, H.; SAPARI, N.; GUAZALI, W. Variations in Rainwater Quality from Roof Catchment. **Water Research**, Reino Unido, V. 23, n. 6, p. 761-765, 1989.

YEO, K.T.; QIU, F.. The value of management flexibility- a real option approach to investment evaluation. **International Journal of Project Management**, Reino Unido. V. 21, p. 243-250, 2003.

YOSHIMURA, E. K. **Opções reais aplicadas na análise da qualidade de investimentos na construção civil**. Dissertação (Mestrado). FEC-UNICAMP. Campinas/SP. 2007. 150 p.

YRUSKA, I.; BRAGA, L. G; SANTOS, C. A. G. Viability of precipitation frequency use for reservoir sizing in Condominiums. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, Reino Unido, v. 4, n. 1 p. 23-28,2010.

YWASHIMA, L. A. **Avaliação do uso de água em edifícios escolares públicos e análise de viabilidade econômica da instalação de tecnologias economizadoras nos pontos de consumo** Dissertação (Mestrado). FEC-UNICAMP. Campinas/SP. 2005. 312 p.

WANG, Y-G., KUHNERT, P., HENDERSON, B. AND STEWART, L. Reporting credible estimates of river loads with uncertainties in Great Barrier Reef catchments. In: World IMACS Congress and International Congress on Modelling and Simulation, 18. 2009, Austrália. **Proceedings**. Austrália, 2009.

APÊNDICE – ALGORITMO DA PSO

