

Dimensionamento de Reservatórios de Armazenamento de Águas Pluviais, usando um Critério Financeiro

Júlio Gomes, Daniele Cruz Weber, Carolina Melissa Delong

Universidade Positivo

jgomes@up.edu.br, danielacruzweber@yahoo.com.br, carodelong@hotmail.com

Recebido: 24/03/09 - revisado: 15/05/09 - aceito: 04/03/10

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é propor um método para a definição do volume de reservatórios de armazenamento de águas pluviais, baseado em um critério hidrológico, relacionado ao regime local de chuva, e em um critério financeiro, relacionado ao custo de implantação do sistema e ao benefício gerado pela diminuição do consumo de água tratada. A análise financeira é feita exclusivamente sob o ponto de vista do investidor privado. Um exemplo de aplicação do método é apresentado através de um estudo de caso, onde se procura dimensionar um reservatório de armazenamento de águas pluviais para um posto de abastecimento de combustíveis hipotético, localizado na cidade de Curitiba. Apresenta-se também uma análise de sensibilidade dos volumes ótimos e dos custos em razão da variação da demanda, da disponibilidade hídrica e da taxa de desconto.

Palavras-chave: uso de água de chuva, dimensionamento de reservatórios, água de chuva.

INTRODUÇÃO

A água representa inegavelmente um recurso indispensável à vida humana e ao desenvolvimento sócio-econômico de uma Sociedade. O Brasil embora possa ser considerado privilegiado em termos de recursos hídricos, já enfrenta problemas relacionados à escassez de água, devido a dois fatores principais: a distribuição espacial não uniforme e a degradação ambiental dos recursos hídricos.

A captação direta das águas das chuvas em pequenos reservatórios, para seu posterior armazenamento e uso, tem sido uma das alternativas para amenizar o problema das populações de baixa renda, com pouco acesso à água. A impermeabilização dos solos nas grandes cidades é hoje um fato consumado, enquanto o emprego de materiais de cobertura que facilitem a infiltração da chuva é exceção. Paralelamente ao aumento das áreas impermeabilizadas, ocorre um adensamento da população e o conseqüente aumento da demanda por água potável, tornando o abastecimento preocupante. Em contrapartida, há ainda o problema das inundações urbanas causadas pelas chuvas torrenciais e pela dificuldade de escoamento dessa água (BRASIL, 2006a)

Dentro deste contexto, destaca-se a importância de estudos que procurem estabelecer méto-

dos, técnicas e critérios para o dimensionamento de sistemas de captação, armazenamento e utilização das águas pluviais. O objetivo do presente trabalho é apresentar um método para a definição do volume de reservatórios de armazenamento de águas pluviais, baseado em um critério hidrológico, relacionado ao regime local de chuva, e em um critério financeiro, relacionado ao custo de implantação do sistema e ao benefício gerado pela diminuição do consumo de água tratada. A análise financeira é feita exclusivamente sob o ponto de vista do investidor privado, deixando-se para trabalhos futuros a expansão do método para a análise econômica sob o ponto de vista da Sociedade, na qual poderiam ser inseridos outros benefícios, tangíveis e intangíveis, por exemplo, abatimento de picos de cheias.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A captação da água da chuva pode ser feita através de telhados, do chão e do solo, sendo armazenada e/ou infiltrada de forma segura, tratada conforme requerido pelo uso final e utilizada em seu potencial pleno, substituindo ou suplementando outras fontes usadas, antes de ser finalmente dispensada. Desta forma, quer seja para o armazenamento e o consumo, quer seja para a redução dos impactos

negativos que podem ser causados à jusante pelo escoamento oriundo das cidades à montante, a adoção de práticas e tecnologias de manejo de água de chuvas nas zonas urbanas, tais como a instalação de sistemas de captação nas edificações e o aumento de áreas urbanas com cobertura vegetal, deve ser intensificada (BRASIL, 2006b).

O aproveitamento planejado da água consiste na utilização interna da água, antes de sua descarga em um sistema geral de tratamento ou outro local de dispersão (Viana e Cerqueira, 2005). Nessas condições, o conceito de “substituição de fontes” mostra-se como a alternativa mais plausível para satisfazer a demandas menos restritivas, liberando as águas de melhor qualidade para usos mais nobres, como o abastecimento doméstico (Mancuso e Santos, 2003). As cidades, segundo Group Raindrops (2002a), precisam promover o aproveitamento e a infiltração da água da chuva para assegurar a auto-suficiência na provisão de água.

No Brasil, existem algumas iniciativas isoladas no sentido da captação e utilização da água da chuva. Por exemplo, na região Nordeste do Brasil, a população que sofre com a escassez da água “acostumou-se” a armazenar a água da chuva em cisternas. Outro exemplo vem de um posto de gasolina em Uberlândia, cujo proprietário capta água da chuva de um telhado de 90 m² e conduz para um reservatório de 30.000 L para posterior lavagem de veículos. Supermercados também vêm tornando cada vez mais freqüente o armazenamento da água da chuva para a limpeza de áreas como pisos entre outros (Silva e Tassi, 2005).

Um aspecto importante relativo ao armazenamento das águas pluviais refere-se à necessidade de remoção de uma parcela inicial da chuva (Group Raindrops, 2002b). Para Tomaz (2001), as águas pluviais não devem ser utilizadas para uso potável. Já em Group Raindrops (2002b), esta utilização é viável desde que sejam seguidas todas as recomendações de limpeza em conjunto com técnicas específicas de purificação.

Atualmente, tem-se despertado na comunidade técnica-científica o interesse em estudos e pesquisas para a definição de critérios de dimensionamento de reservatórios para acumulação de água de chuva. Alguns dos trabalhos desenvolvidos nos últimos anos são relacionados a seguir.

Kobiyama e Hansen (2002) apresentam um critério de dimensionamento baseado na análise estatística das séries de precipitações, procurando identificar, para um dado período de retorno, o número de dias consecutivos sem chuva. O volume no reservatório é então definido pelo produto entre

o número de dias sem chuva e a demanda diária. Uma deficiência do método é a de que o mesmo prioriza a não disponibilidade de chuva e não leva em consideração a disponibilidade de chuva. Em outras palavras, em regiões muito secas, a tendência do método é produzir reservatórios relativamente grandes, sem que haja precipitação a ser armazenada.

Fendrich (2004) analisou a capacidade de detenção de reservatórios de águas pluviais propondo o método do coeficiente de escoamento superficial regional das áreas de coleta das águas pluviais. Segundo o referido autor, o volume dos reservatórios de armazenamento (detenção) das águas pluviais é determinado pelo produto entre um coeficiente de escoamento superficial regional das áreas de coleta das águas pluviais, que representa basicamente a capacidade de geração de volume de escoamento superficial por m² de área, e a área de coleta das águas pluviais. A ênfase do trabalho citado é o uso dos reservatórios para o abatimento de cheias e não propriamente como fonte alternativa de abastecimento.

May (2004) apresenta um trabalho interessante sobre viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações, usando o método de Rippl para a determinação do volume do reservatório. Destaca-se, inclusive, que a análise financeira é mais completa do que a apresentada no presente trabalho e poderia ser também acrescentada à metodologia aqui proposta. Contudo, no referido trabalho, a análise é feita em uma escala mensal, que parece ser demasiadamente grande para o dimensionamento de pequenos reservatórios. Adicionalmente, o enfoque no trabalho é a análise da viabilidade do projeto, não havendo uma sugestão de uso na determinação de volumes ótimos.

Silva e Tassi (2005) apresentam um estudo de caso de dimensionamento de um reservatório para aproveitamento da água da chuva em uma residência na cidade de Flores da Cunha, RS. O método usa o conceito de continuidade para a determinação dos volumes armazenados no reservatório ao longo do tempo. A análise é feita principalmente em relação ao número de dias em que o reservatório fica vazio. Os autores não apresentam nenhum critério financeiro para a definição do volume do reservatório.

Viana e Cerqueira (2005) definem o volume do reservatório de armazenamento como uma função da área impermeabilizada, coeficiente de escoamento do telhado e índice pluviométrico. No referido trabalho, foram utilizados dados de chuva refe-

rentes à cidade de Itajubá, MG. O índice pluviométrico foi definido a partir do ano mais seco no histórico da estação pluviométrica. Foram utilizados dois valores distintos para o índice pluviométrico, um índice diário, correspondente a uma chuva média diária, e um índice anual, correspondente ao total precipitado anual. A análise da necessidade de suprimento externo (demanda não atendida pelo sistema) foi feita em uma escala mensal, usando o conceito de continuidade. Os autores apresentam custos relativos ao sistema, mas não existe uma análise financeira para estabelecimento do volume ótimo. Além disso, as escalas mensal e anual parecem demasiadamente grandes para o dimensionamento de pequenos reservatórios.

Zortea *et al.* (2005) também apresentam método de dimensionamento, procurando representar a precipitação diária como uma variável aleatória e usando geração sintética de séries de precipitações diárias. No referido trabalho, adota-se uma perspectiva de otimização em relação à determinação do volume do reservatório. No entanto, o critério de otimização não leva em consideração nenhum tipo de análise financeira.

Em uma análise dos trabalhos citados, de modo geral, verifica-se que, em determinados casos, as escalas de tempo são relativamente grandes para o dimensionamento de pequenos reservatórios e em outras situações não são adotados critérios financeiros para o estabelecimento de um volume ótimo. Neste contexto, insere-se o presente trabalho, onde se pretende apresentar um método para pré-dimensionamento de reservatórios de armazenamento de águas pluviais levando-se em consideração critérios hidrológico e financeiro e adotando-se uma escala temporal diária para a representação da chuva.

Há que se destacar que o presente trabalho considera o uso da água da chuva somente para fins não potáveis. Desta forma, não são discutidos aspectos relacionados aos sistemas de purificação recomendados para uso potável.

Segundo em Group Raindrops (2002b), a qualidade das águas pluviais coletadas varia com o grau de poluição do ar e com a condição de limpeza da área de coleta. Mesmo para usos não potáveis é necessário assegurar a inexistência de sedimentos, folhas, óleos ou outros materiais contaminantes. A inexistência de dejetos de animais, como pássaros, gatos e ratos, também garantem a qualidade da água (Group Raindrops, 2002b).

Group Raindrops (2002b) sugere ainda que a eliminação (descarte) da primeira porção de água coletada é uma forma prática de se amenizar a polu-

ção das águas pluviais pelos poluentes dispersos na atmosfera. Tal procedimento pode ser entendido também como uma forma de limpeza da área de coleta. Tomaz (2003), por exemplo, sugere a eliminação de 1 mm de chuva por m² de área de captação. May (2004) descreve algumas das técnicas utilizadas para o descarte da água de limpeza de telhados, considerando o aproveitamento da água da chuva para fins não potáveis em edificações.

Destaca-se que, no presente trabalho, não foram considerados: a diminuição do volume de chuva coletada devido ao descarte da primeira porção de água coletada; os custos relativos ao circuito hidráulico de coleta, condução e distribuição das águas pluviais; e os custos relativos à implantação de alguma técnica para o descarte da água de limpeza do telhado. No entanto, ressalta-se que a inclusão dos mesmos não inviabiliza o procedimento aqui sugerido para o dimensionamento de reservatórios de captação de águas pluviais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O método proposto sugere a definição do volume do reservatório (V_R) com base em uma análise financeira realizada sob o ponto de vista do investidor privado, responsável pela implantação do sistema de captação, armazenamento e uso das águas pluviais. A idéia básica é definir V_R a partir da comparação entre duas alternativas:

Alternativa 1 – Edificação sem o sistema de captação, armazenamento e uso das águas pluviais.

Alternativa 2 – Edificação com o sistema de captação, armazenamento e uso das águas pluviais.

A análise financeira é feita pela comparação dos custos relativos às duas alternativas mencionadas. No caso da Alternativa 1, o custo é representado pelo consumo de água tratada. Já no caso da Alternativa 2, o custo é representado pela implantação, manutenção e operação do sistema mais o custo do consumo de água tratada nos episódios em que o reservatório se encontra vazio. Portanto, o método proposto é mais adequado para áreas urbanas que possuem rede de abastecimento de água. Contudo, o mesmo pode ser adaptado para regiões com esquemas alternativos de abastecimento de água.

Considerando-se o exposto, as informações básicas para a análise financeira e conseqüente definição de V_R são:

- Custo de implantação do sistema (R\$);
- Custo anual de manutenção e operação do sistema (R\$/ano);
- Custo unitário da água tratada (R\$/m³);
- Consumo anual médio de água tratada (R\$/ano) para as Alternativas 1 e 2.

A seguir são descritos os procedimentos para a estimativa do consumo anual médio de água tratada, a análise financeira e a determinação de V_R , que constituem as principais etapas do método proposto.

Estimativa do consumo anual médio de água tratada

O procedimento para a estimativa do consumo anual médio de água tratada é baseado na análise de séries diárias de precipitação e no conceito de conservação de massa. A Equação 1, apresentada a seguir, representa a lei de variação do volume de água armazenada em um reservatório hipotético de volume V_R :

$$V_t = V_{t-1} + (VC_t - D_t) \quad (1)$$

onde: V_{t-1} e V_t = volume armazenado no fim dos dias $t-1$ e t , respectivamente (m³);

VC_t = volume coletado pelo sistema a partir da precipitação no dia t (m³);

D_t = demanda do dia t (m³).

A representação da variação do volume armazenado no reservatório ao longo do tempo (V_t) exige o estabelecimento de restrições que representem as condições de reservatório cheio e reservatório vazio.

Na condição de reservatório cheio, qualquer volume excedente deve ser descartado, uma vez que o reservatório não possui volume disponível para o armazenamento. Na condição de reservatório vazio, qualquer déficit de volume não pode ser fornecido pelo reservatório, uma vez que o mesmo se encontra vazio.

Considerando-se um reservatório hipotético de volume V_R , estabeleceu-se, por convenção, $V_t = 0$ como condição de reservatório vazio. Deste modo, a condição de reservatório cheio é representada por $V_t = V_R$. Do ponto de vista lógico, as condições de reservatório vazio e reservatório cheio podem ser assim representadas:

Condição de reservatório vazio: Se $V_t < 0$ então $V_t = 0$

Condição de reservatório cheio: Se $V_t > V_R$ então $V_t = V_R$

Além disso, existe a necessidade de se estabelecer uma limitação quanto ao volume coletado em um dia t qualquer (VC_t), respeitando-se o volume do reservatório (V_R) e a demanda (D_t). Como não se tem uma idéia da distribuição da chuva ao longo do dia, adotou-se o volume V_R como limite máximo para o volume coletado (VC_t) pelo sistema. Deste modo, considerando-se o volume precipitado (P_t) em um dia t qualquer, o volume VC_t seria dado pela seguinte condição lógica:

Se ($P_t < V_R$) então $VC_t = P_t$ senão $VC_t = V_R$

A Equação 1 e as restrições que representam as condições de reservatório vazio, reservatório cheio e limite máximo de volume coletado são utilizadas para permitir a estimativa do consumo de água tratada a partir da rede de abastecimento.

De modo simples, o consumo de água tratada em um dia t (CA_t) ocorrerá na condição de reservatório vazio, já que, para essa condição, a demanda diária deverá ser total ou parcialmente atendida pela rede de abastecimento. O consumo de água tratada (CA_t) é representado logicamente por:

Se ($V_t = 0$) então $CA_t = (D_t - P_t) - V_{t-1}$

Essa expressão lógica é válida para qualquer condição de armazenamento no reservatório no dia anterior (V_{t-1}). Contudo, também existem restrições que devem ser impostas aos valores de CA_t . Basicamente, o valor de CA_t não pode ser superior à demanda diária (D_t) e nem inferior a zero. Deste modo, tem-se:

Se ($CA_t < 0$) então $CA_t = 0$ e se ($CA_t > D_t$) então $CA_t = D_t$

A partir do cálculo do consumo diário de água tratada (CA_t) é possível estimar um consumo anual médio de água tratada para um reservatório hipotético de volume V_R , desde que seja conhecida uma série histórica de precipitações diárias para o local em estudo. Este consumo anual é então usado para o cálculo dos custos relativos às duas alternativas analisadas e cuja comparação constitui a análise financeira do sistema de captação, armazenamento e uso das águas pluviais sob o ponto de vista do investidor privado, como discutida a seguir.

Análise financeira

O método sugerido para a análise financeira é o método do valor presente, no qual valores futuros são descontados e trazidos para valores presentes, através do uso de uma taxa de desconto (i). Considerando-se o método do valor presente, as Equações 2 e 3, apresentadas a seguir, são utilizadas respectivamente para a determinação dos custos relativos às Alternativas 1 e 2:

$$C_1 = \sum_{t=1}^n \frac{C_{u_t} \times CA_t}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^t} \quad (2)$$

onde: C_1 = custo presente da Alternativa 1 (R\$);

C_{u_t} = custo unitário da água tratada no ano t (R\$/m³);

CA_t = consumo anual de água tratada no ano t (m³/ano);

i = taxa de desconto anual (% ao ano);

n = horizonte do projeto (anos).

$$C_2 = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_{m_t} + C_{u_t} \times CA_t}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^t} \quad (3)$$

onde: C_2 = custo presente da Alternativa 2 (R\$);

C_0 = custo de implantação do sistema (R\$);

C_{m_t} = custo de manutenção e operação do sistema no ano t (R\$) e demais variáveis já definidas.

Uma diferença fundamental entre as Equações 2 e 3 refere-se ao consumo anual de água tratada em um ano t (CA_t). Na Alternativa 1, o valor de CA_t coincide com a demanda anual de água para um determinado uso ou conjunto de usos, uma vez que toda a demanda é atendida pelo sistema de abastecimento. Já na Alternativa 2, o valor de CA_t não coincide com a demanda anual de água, uma vez que parte da demanda é atendida pelo sistema de captação, armazenamento e uso das águas pluviais.

Ainda em relação às Equações 2 e 3, as mesmas são genéricas o suficiente para permitir analisar diferentes cenários, representados, por exemplo, por variações da demanda de água ao longo do tempo e variações do custo unitário da água ao longo do tempo.

Determinação do volume do reservatório (V_R)

A análise financeira, é baseada na comparação dos custos das alternativas 1 (sem o sistema) e 2

(com o sistema). Destaca-se que os custos de implantação (C_0) e de manutenção e operação do sistema (C_m), presentes na Equação 3, são função principalmente de V_R . Portanto, considerando-se a Equação 3, não se tem inicialmente, uma solução direta do problema.

O procedimento sugerido é o de variar o valor de V_R , obtendo-se para cada V_R , o consumo anual médio de água tratada e o custo da Alternativa 2 para a comparação com o custo da Alternativa 1. Deste modo, é possível definir um intervalo de V_R para o qual a Alternativa 2 apresente menores custos em relação à Alternativa 1. Destaca-se que o custo da Alternativa 1 também pode ser obtido a partir da Equação 3, adotando-se V_R igual a zero.

Os passos da metodologia proposta, podem ser facilmente implantados computacionalmente. No estudo de caso apresentado foram utilizadas planilhas eletrônicas para a determinação do consumo anual médio de água tratada e para a definição dos custos da Alternativa 2 para diferentes valores de V_R .

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Este item visa apresentar um exemplo de aplicação do método proposto que consiste na determinação do volume do reservatório de um sistema de captação, armazenamento e uso de águas pluviais para um posto de abastecimento de combustíveis hipotético, localizado na cidade de Curitiba. Os dados básicos necessários para a análise são: área de coleta da água da chuva; demanda diária de água; custo unitário da água tratada; custos de implantação, manutenção e operação do sistema e série de precipitações diárias.

Descrição da série de dados pluviométricos

Como o estudo de caso refere-se a um posto de abastecimento de combustíveis hipotético localizado em Curitiba, optou-se por utilizar a série de dados de chuva da estação pluviométrica Curitiba (02549006), localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A referida série de dados pode ser obtida a partir do sítio da Agência Nacional de Águas (ANA, 2007).

A série de dados diários de chuva compreendeu os anos de 1889 a 2005. De fato foram utilizados 102 anos de observações, uma vez que alguns anos do período de observação foram descartados

em razão da existência de falhas na série de chuvas diárias da estação.

Considerando-se o conjunto de dados utilizados, obtém-se, para a estação pluviométrica Curitiba (02549006), uma precipitação anual média de longo período de 1426,3 mm. As precipitações anuais variaram de 765,5 mm a 2165,2 mm para o período do estudo.

A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam as precipitações médias mensais para o período utilizado no estudo com o objetivo de mostrar como as precipitações se distribuem, em termos médios, ao longo do ano. A Tabela 1 apresenta também as precipitações mensais mínimas e máximas para o período considerado no estudo.

Tabela 1 - Características das precipitações mensais para o período utilizado no estudo

Mês	Precipitação Média (mm)	Precipitação Mínima (mm)	Precipitação Máxima (mm)
Jan	189,0	20,9	473,8
Fev	154,0	12,9	421,7
Mar	123,4	22,2	335,8
Abr	80,9	7,7	196,9
Mai	98,0	4,2	365,6
Jun	97,5	2,6	312,7
Jul	79,8	2,7	347,5
Ago	80,1	2,0	271,1
Set	124,6	6,3	358,7
Out	136,0	26,4	405,9
Nov	114,8	15,6	344,1
Dez	148,2	46,6	314,6

Verifica-se, a partir da Figura 1, a tendência, em termos médios, de maiores precipitações nos meses de verão e de menores precipitações nos meses de inverno, sugerindo uma sazonalidade no regime de chuvas. Do ponto de vista climático, Curitiba apresenta clima temperado úmido com verão temperado (Cfb), segundo classificação de Köppen-Geiger, não apresentando estação seca definida. Contudo, como já destacado, existe uma tendência, em termos médios, de ocorrerem menores precipitações nos meses de inverno.

É importante destacar que os dados de precipitações mensais mínimas e máximas, apresentados na Tabela 1, mostram a possibilidade de ocor-

rência de meses de inverno excepcionalmente úmidos e meses de verão excepcionalmente secos.

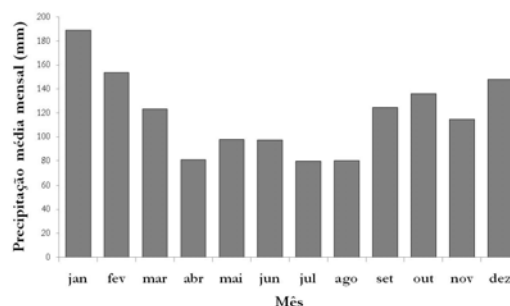


Figura 1 - Precipitação média mensal para o período utilizado no estudo

Uma vez que o presente trabalho adota uma escala temporal diária para a representação da chuva é importante caracterizar o comportamento da precipitação observada na estação pluviométrica Curitiba (02549006) em termos de número de dias de chuva, considerando-se o período de dados utilizado no estudo. A Tabela 2 apresenta um panorama do número mensal de dias de chuva para a estação pluviométrica Curitiba (02549006).

Tabela 2 - Número mensal de dias de chuva para o período utilizado no estudo

Mês	Número médio de dias de chuva	Número mínimo de dias de chuva	Número máximo de dias de chuva
Jan	19	7	28
Fev	18	6	26
Mar	18	7	25
Abr	16	7	25
Mai	17	4	27
Jun	15	1	23
Jul	14	3	30
Ago	13	1	26
Set	15	5	26
Out	15	6	24
Nov	15	6	25
Dez	17	8	28

Verifica-se, a partir dos dados apresentados na Tabela 2, que os meses de verão tendem a apre-

sentar um número maior de dias de chuva relativamente aos meses de inverno. No entanto, observa-se também que existe a possibilidade de um pequeno número de dias de chuva nos meses de verão e um grande número de dias de chuva nos meses de inverno.

A análise do conjunto de dados mostrou um número máximo anual de dias consecutivos *sem* chuva variando entre 13 dias e 51 dias, com um valor médio de 22 dias. A distribuição da frequência amostral permitiu estimar números máximos anuais de dias consecutivos *sem* chuva de aproximadamente 26, 30 e 35 dias para os tempos de retorno de 5, 10 e 20 anos, respectivamente.

Obtenção dos dados básicos

A área de coleta da água da chuva foi estabelecida a partir do projeto básico de um posto de combustíveis, sendo avaliada em aproximadamente 590,3 m². A demanda diária para o posto hipotético foi estimada em 2,0 m³/dia. Este consumo refere-se aos usos para os quais é possível utilizar a água da chuva em substituição ao consumo de água tratada. Os custos unitários de água tratada foram definidos a partir das tarifas para abastecimento de água tratada, obtidas a partir de SANEPAR (2005).

A demanda diária de água foi estimada a partir do apresentado em Tomaz (2000) que propõe metodologia para estimativa do consumo médio mensal de água em postos de gasolina, com base em dados obtidos no Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Guarulhos, SP. Adotou-se, por hipótese, que a demanda diária é constante ao longo do mês. No entanto, destaca-se que a estimativa do consumo anual médio de água tratada, a ser discutida no próximo item, é realizada adotando-se uma escala diária, o que permitiria inclusive definir padrões de consumo distintos para os dias da semana.

Os custos de implantação do sistema, como são função do volume do reservatório (V_R), foram definidos a partir da determinação de custos unitários (R\$/m³), com base em PINI (1991) e PINI (2003). Adotou-se, na estimativa dos custos de implantação, reservatório enterrado em concreto armado e bomba de recalque. Por hipótese, definiu-se o reservatório com uma altura padrão de 1 m. Deste modo, independente de V_R , a altura manométrica é constante. Estimou-se um custo unitário de R\$ 1724,81/m³ para implantação do reservatório. Por questão de simplicidade, adotou-se o custo unitário de manutenção e operação do sistema como um

percentual fixo em relação ao custo unitário de implantação e assumiu-se esse valor igual a 5%.

Estimativa do consumo anual médio de água tratada

Conforme mencionado anteriormente, o método proposto para a determinação de V_R requer uma série de dados diários de precipitação.

Segundo o sugerido por Kobiyama e Hansen (2002), foram considerados os valores diários de chuva iguais ou superiores a 1,0 mm. O volume diário de chuva foi calculado a partir do produto da altura diária pela área de cobertura, multiplicado ainda por um coeficiente de *runoff* igual a 0,8, respeitadas as devidas unidades.

A Tabela 3 e a Figura 2 apresentam o consumo anual médio de água tratada para diferentes volumes de reservatório (V_R), considerando-se os dados da estação pluviométrica Curitiba (02549006) e uma demanda diária de 2,0 m³, equivalente a cerca de 60 m³/mês.

Tabela 3 - Consumo anual médio de água tratada para diferentes valores de V_R

V_R (m ³)	Consumo (m ³)	V_R (m ³)	Consumo (m ³)
0,0	730,5	5,5	376,5
0,5	668,3	6,0	364,9
1,0	613,6	8,0	328,8
1,5	567,1	10,0	302,4
2,0	526,4	20,0	228,6
2,5	490,2	30,0	195,8
3,0	460,9	50,0	158,5
3,5	438,5	100,0	117,8
4,0	418,9	150,0	108,9
4,5	403,4	200,0	107,3
5,0	389,2		

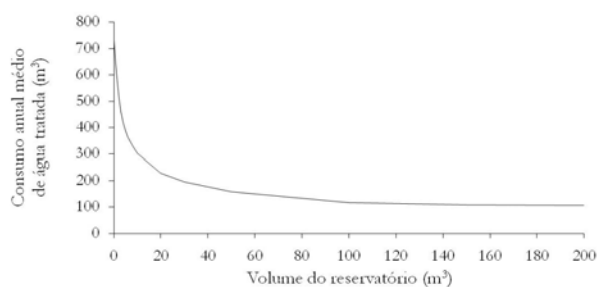


Figura 2 - Variação do consumo anual médio de água tratada em função do volume do reservatório (V_R)

Verifica-se, a partir da Figura 2, que o consumo anual médio de água tratada é decrescente com o aumento do volume do reservatório (V_R), o que representa um comportamento esperado, uma vez que aumentar a capacidade do reservatório implica em atender uma parcela maior da demanda. No entanto, é importante destacar que o consumo anual médio de água tratada tende a um valor limite constante e diferente de zero. Este limite é definido pela disponibilidade natural da precipitação local. Em outras palavras, não adianta aumentar o reservatório, já que não há chuva suficiente para enchê-lo. Este fato fica mais evidente para situações onde a demanda é relativamente alta em comparação à disponibilidade hídrica natural.

Cálculo do volume do reservatório

O volume ótimo para o reservatório foi estimado conforme sugerido anteriormente. Foram adotados diferentes valores de V_R e foram calculados os respectivos custos associados à Alternativa 2. Em relação à Alternativa 1, o seu custo foi estimado pela adoção de um reservatório de volume nulo. A Tabela 4 apresenta os custos da Alternativa 2 para diferentes valores de V_R e a Figura 3 apresenta uma comparação entre os custos relativos às Alternativas 1 e 2. Novamente, destaca-se que o custo da Alternativa 1 é igual ao custo da Alternativa 2 para V_R igual a zero. Os custos apresentados são todos referentes a um valor presente, obtido considerando-se um horizonte de 20 anos e uma taxa de desconto de 10%.

Tabela 4 - Custo da Alternativa 2 para diferentes valores de V_R

V_R (m^3)	Custo (R\$)	V_R (m^3)	Custo (R\$)
0,0	20.585,41	3,0	18.312,61
0,5	19.721,14	3,5	18.568,70
1,0	19.066,04	4,0	18.905,46
1,5	18.643,00	4,5	19.355,26
2,0	18.382,83	5,0	19.843,72
2,5	18.249,91	5,5	20.372,19
2,6	18.245,94	6,0	20.933,34

Verifica-se, a partir dos dados apresentados na Tabela 4, que o menor custo presente é obtido para um valor de V_R igual a 2,6 m^3 , resultando em R\$ 18.245,94, inferior ao custo presente da Alternativa 1, estimado em R\$ 20.585,41. Além disso, considerando-se a Tabela 4 e a Figura 3, verifica-se a exis-

tência de um intervalo compreendido entre 0 m^3 e aproximadamente 5,5 m^3 , no qual a Alternativa 2 (com o sistema) apresenta um custo presente igual ou inferior ao da Alternativa 1 (sem o sistema). Este intervalo é definido pela relação entre a demanda de água e a disponibilidade hídrica. O custo mínimo representa o ponto no qual um aumento do volume de armazenamento não implica em uma redução do consumo de água tratada que compense os custos associados ao aumento do reservatório.

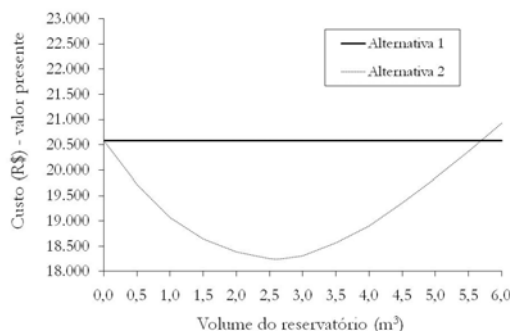


Figura 3 Comparação dos custos relativos às Alternativas 1 e 2

Análise de sensibilidade em relação à demanda de água

A análise de sensibilidade em relação à demanda de água teve por objetivo verificar variações nos resultados em razão de variações na demanda. Foram usados os mesmos dados do estudo de caso e foram analisadas variações de demanda de $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$ em relação à demanda diária de 2 m^3 usada no estudo de caso. Os resultados obtidos são resumidos na Tabela 5 e nas Figuras 4 e 5, onde são apresentadas as variações do volume ótimo do reservatório e dos custos mínimos em função das variações na demanda.

Tabela 5 - Análise de sensibilidade em relação à demanda de água

Demanda diária (m^3)	Volume ótimo (m^3)	Custo mínimo (R\$)	Variação volume (%)	Variação custo (%)
1,6	2,15	14.258,90	-17,3	-21,9
1,8	2,40	16.237,16	-7,7	-11,0
2,0*	2,60	18.245,94	0,0	0,0
2,2	2,75	20.272,46	5,8	11,1
2,4	2,90	22.314,28	11,5	22,3

Obs: *Cenário-base

Verifica-se, a partir dos resultados apresentados na Tabela 5 e nas Figuras 4 e 5, que o volume ótimo e os custos mínimos são crescentes com a demanda, o que representa um resultado esperado. Além disso, os custos mínimos se mostraram mais sensíveis a variações da demanda do que os volumes ótimos. Destaca-se que os custos variaram de modo aproximadamente linear. Estas observações são válidas considerando-se os dados do estudo de caso e as variações impostas à demanda.

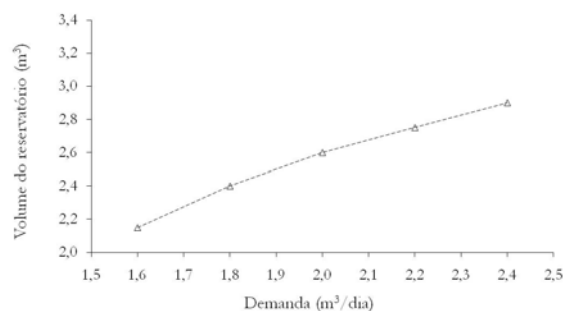


Figura 4 - Análise da sensibilidade dos volumes ótimos à demanda de água

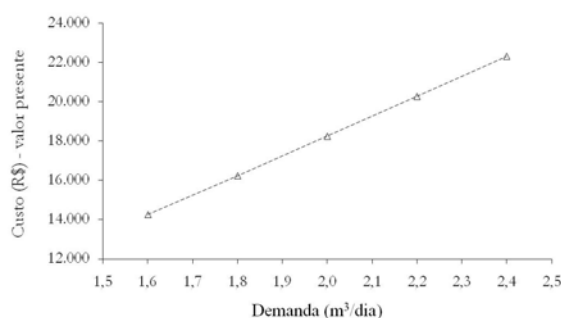


Figura 5 - Análise da sensibilidade dos custos mínimos à demanda de água

Análise de sensibilidade em relação à disponibilidade hídrica

A análise de sensibilidade em relação à disponibilidade hídrica teve por objetivo verificar a modificação nos resultados obtidos em razão de variações nos valores de precipitação. Foram utilizados os mesmos dados do estudo de caso descrito anteriormente e foram analisadas variações na precipitação diária de $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$ em relação à série histórica utilizada no estudo de caso. Os resultados

obtidos são resumidos na Tabela 6 e nas Figuras 6 e 7, onde são apresentadas as variações do volume ótimo do reservatório e dos custos mínimos em função de variações na precipitação.

Tabela 6 - Análise de sensibilidade em relação à disponibilidade hídrica

Porcentagem da chuva original	Volume ótimo (m³)	Custo mínimo (R\$)	Variação volume (%)	Variação custo (%)
80	2,35	18.759,58	-9,6	2,8
90	2,50	18.524,09	-3,8	1,5
100*	2,60	18.245,94	0,0	0,0
110	2,65	18.060,93	1,9	-1,0
120	2,65	17.868,99	1,9	-2,1

Obs: *Cenário-base

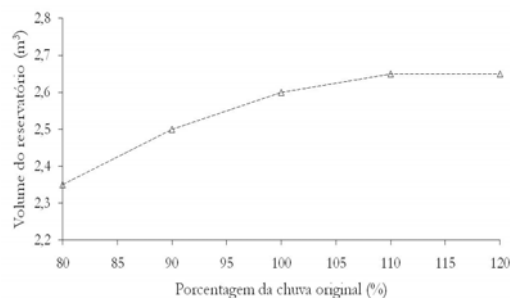


Figura 6 - Análise da sensibilidade dos volumes ótimos à disponibilidade hídrica

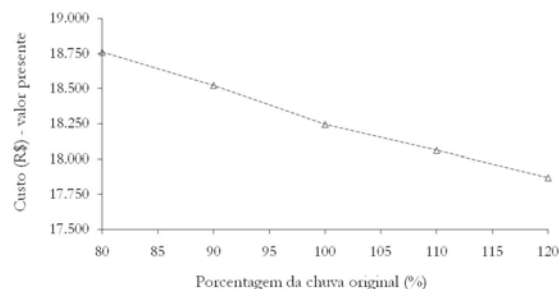


Figura 7 - Análise da sensibilidade dos custos mínimos à disponibilidade hídrica

Verifica-se, a partir dos resultados apresentados na Tabela 6 e nas Figuras 6 e 7, que o volume ótimo é crescente com a disponibilidade hídrica, enquanto os custos mínimos são decrescentes. Este comportamento também pode ser considerado esperado, uma vez que uma maior disponibilidade hídrica permitiria o armazenamento de um volume maior de água da chuva e conseqüente diminuição no uso da água tratada.

Além disso, neste caso, os volumes ótimos se mostraram mais sensíveis a variações da disponibilidade hídrica do que os custos mínimos. Destaca-se, no entanto, que as variações observadas nos volumes ótimos e nos custos mínimos foram inferiores às variações impostas sobre a precipitação. Novamente, deve-se ter em mente, que estas observações são válidas considerando-se os dados referentes ao estudo de caso analisado e as variações impostas à disponibilidade hídrica.

Análise de sensibilidade em relação à taxa de desconto (i)

A análise de sensibilidade em relação à taxa de desconto (i) teve por objetivo verificar a modificação nos resultados obtidos em razão de variações nos valores de i . Foram utilizados os mesmos dados do estudo de caso descrito anteriormente e foram analisadas variações de i em relação à taxa utilizada no estudo de caso. Os resultados obtidos são resumidos na Tabela 7 e nas Figuras 8 e 9, onde são apresentadas as variações do volume ótimo do reservatório e dos custos mínimos em função de i .

Verifica-se, a partir dos resultados apresentados na Tabela 7 e nas Figuras 8 e 9, que o volume ótimo e os custos mínimos são decrescentes com i . A influência da taxa de desconto (i) sobre os custos mínimos é óbvia, uma vez que os mesmos são calculados utilizando-se diretamente a própria taxa de desconto. Já em relação aos volumes ótimos, a adoção de taxas de desconto maiores tende a fazer com que os custos iniciais sejam preponderantes em relação aos demais, fazendo com que o custo de instalação do sistema se torne um fator de maior peso na comparação das alternativas.

Além disso, os custos mínimos se mostraram bem mais sensíveis a variações da taxa de desconto do que os volumes ótimos, o que pode ser novamente explicado pelo fato de que os custos são calculados utilizando-se diretamente a taxa de desconto. Uma vez mais, destaca-se que estas observações são válidas considerando-se os dados do estudo de caso analisado e as variações impostas à taxa de desconto na análise de sensibilidade.

Tabela 7 - Análise de sensibilidade em relação à taxa de desconto

Taxa desconto (% a.a)	Volume ótimo (m ³)	Custo mínimo (R\$)	Variação volume (%)	Variação custo (%)
6	3,00	23.374,72	1,5	28,1
8	2,80	20.530,82	0,8	12,5
10*	2,60	18.245,94	0,0	0,0
12	2,40	16.389,34	-0,8	-10,2
14	2,05	14.853,25	-2,1	-18,6

Obs: *Cenário-base

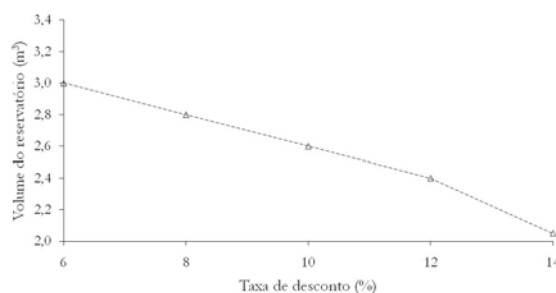


Figura 8 - Análise da sensibilidade dos volumes ótimos à taxa de desconto

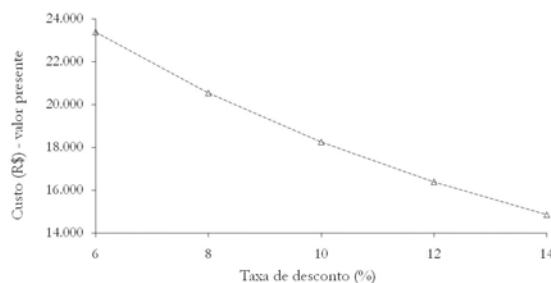


Figura 9 - Análise da sensibilidade dos custos mínimos à taxa de desconto

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método proposto para o dimensionamento de reservatórios de armazenamento de águas pluviais é conceitualmente embasado no princípio de conservação de massa e é de fácil uso. Apresenta como característica exigir informações de obtenção relativamente simples, como: precipitação diária, custos de implantação, manutenção e operação do sistema e o custo da água tratada. Destaca-se ainda

que o método é suficientemente genérico para permitir mudanças nas suas diferentes etapas sem que haja uma alteração significativa na sua essência. Por exemplo, diferentes abordagens para a estimativa da demanda de água e dos custos unitários de implantação, manutenção e operação do sistema, bem como, para a análise financeira podem ser usadas sem alterar sua estrutura. Variações da demanda de água no tempo também podem ser incorporadas sem alterações do método.

Do ponto de vista de implantação do método, as várias fases do estudo de caso foram desenvolvidas através de planilhas do programa computacional EXCEL, inclusive sem a necessidade da definição de macros, o que confirma a simplicidade da sua aplicação. O desenvolvimento de modelos computacionais específicos pode inclusive permitir o uso de técnicas mais sofisticadas, como, por exemplo, a geração sintética de precipitação. O fundamental nesse aspecto é encontrar um equilíbrio entre a sofisticação teórica e a necessidade prática.

Os resultados obtidos mostraram que o consumo de água tratada diminui com o aumento do volume do reservatório. Embora, esta conclusão pareça óbvia, a análise da relação entre o volume do reservatório e o consumo de água tratada mostrou que esta relação apresenta um comportamento assintótico em relação ao consumo de água tratada. Em outras palavras, à medida que o volume do reservatório aumenta, o consumo de água tratada tende a um valor mínimo diferente de zero. A disponibilidade hídrica (regime de chuvas) do local em estudo é um dos fatores que definem o valor mínimo para o consumo de água tratada, independentemente do tamanho do reservatório. O volume do reservatório pode até ser aumentado, mas não existe chuva disponível para encher o reservatório. Este comportamento assintótico, inclusive, poderia ser melhor explorado ao serem estudados locais que apresentassem regimes de chuvas distintos, tanto em termos de quantidade, quanto de sazonalidade (distribuição ao longo do ano).

A comparação entre as duas alternativas representadas pela utilização ou não do sistema de captação, armazenamento e uso da água pluvial permite a definição de um intervalo de volumes de reservatório no qual a alternativa *com* o sistema é mais vantajosa em relação à alternativa *sem* o sistema, o que confere flexibilidade ao projeto do sistema.

A análise de sensibilidade procurou avaliar a sensibilidade dos resultados dos volumes ótimos e custos mínimos (em valores presentes) em razão de variações na demanda de água, na disponibilidade

hídrica e na taxa de desconto, considerando-se a alternativa *com* a existência do sistema. Os resultados obtidos mostraram que os custos mínimos são mais sensíveis do que os volumes ótimos em relação a variações na demanda e na taxa de desconto. Já em relação a variações na disponibilidade hídrica, os volumes ótimos mostraram-se mais sensíveis.

É importante destacar que os resultados obtidos devem ser analisados, de modo relativo, a partir do estudo de caso utilizado para a verificação do uso do método proposto e para a sua análise de sensibilidade. Novamente, sugere-se a aplicação do método para locais com diferentes regimes de precipitação.

REFERÊNCIAS

- ANA. *HidroWeb: Sistemas de Informações Hidrológicas: Séries Históricas*. Brasília: ANA, 2007. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 01/05/2007
- BRASIL. *Plano Nacional de Recursos Hídricos: panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente: Secretaria de Recursos Hídricos, 2006a. Vol. I.
- BRASIL. *Programas nacionais e metas*. Brasília: MMA: Secretaria de Recursos Hídricos, 2006b. Volume IV.
- FENDRICH, R. *Dimensionamento de reservatórios de detenção e utilização das águas pluviais*. Curitiba, 2004. 28p.
- GROUP RAINDROPS. *Aproveitamento da água da chuva*. Curitiba: Organic Trading, 2002a. Tradução de Masato Kobiyama, Cláudio Tsuyoshi Ushiwata e Manoela dos Anjos Afonso. Tradução do original japonês "Yatte Miyo Amamizu Riyo".
- GROUP RAINDROPS. *Manual de utilização das águas pluviais (100 maneiras práticas)*. Curitiba: Livraria Chain, 2002b. 167p. Tradução de Roberto Fendrich e Rogério Oliynik. Tradução da versão inglesa de Nichibei Kaiwa Gakuin do original japonês "Yatte Miyo Amamizu Riyo".
- KOBIYAMA, M.; HANSEN, S. Vantagens da utilização do sistema de coleta da água da chuva sob o ponto de vista dos aspectos hidrológico e econômico: estudo de caso em Florianópolis – SC. In: GROUP RAINDROPS. *Aproveitamento da água da chuva*. Curitiba: Organic Trading, 2002a. Tradução de Masato Kobiyama, Cláudio Tsuyoshi Ushiwata e Manoela dos Anjos Afonso. Tradução do original japonês "Yatte Miyo Amamizu Riyo".
- MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. *Reuso de água*. São Paulo: Manole, 2003. 579 p.

- MAY, S. *Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações*. São Paulo: EPUSP, 2004. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- PINI. *Manual técnico de instalações hidráulicas e sanitárias*. 2. ed. São Paulo: PINI, 1991. 96 p.
- PINI. *TCPO: tabelas de composições de preços para orçamentos*. 12.ed. São Paulo: PINI, 2003. 441p.
- SANEPAR. *Tabelas de tarifas de saneamento*. Curitiba: SANEPAR, 2005. Disponível em www.sanepar.com.br. Acesso em 10/04/2007.
- SILVA, A. R. V.; TASSI, R. *Dimensionamento e simulação do comportamento de um reservatório para aproveitamento de água de chuva: Resultados preliminares*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2005. Anais em CD.
- TOMAZ, P. *Previsão de consumo de água: interface das instalações prediais de água e esgoto com os serviços públicos*. São Paulo: Navegar, 2000. 250 p.
- TOMAZ, P. *Economia de água para empresas e residências: um estudo atualizado sobre o uso racional da água*. São Paulo: Navegar, 2001. 112 p.
- TOMAZ, P. *Aproveitamento de água da chuva: aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis*. São Paulo: Navegar, 2003. 182 p.
- VIANA, A. N. C.; CERQUEIRA, R. J. *Captação de água de chuva para aproveitamento não potável: uma proposta de modelo em residências na cidade de Itajubá – MG*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2005. Anais em CD.
- ZORTEA, M.; et al. *Simulação numérica do comportamento de sistema coletor de água de chuva residencial: estudo de caso*. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2003. Anais em CD.

reducing the consumption of treated water. The financial analysis is performed considering only the private investor's point of view. The use of the proposed method is illustrated by a case study which presents a reservoir design for a hypothetical gas station located in the city of Curitiba. It also presents a sensitivity analysis of the optimal volumes and costs, considering variations in water demand, water availability and discount rate.

Keywords: *rainwater use, reservoir design, rainwater*

Reservoir Design for Rainwater use Based on a Financial Criterion

ABSTRACT

The present paper aims to propose a reservoir design method for rainwater use based on hydrological and financial criteria. The hydrological criterion is related to the local rainfall pattern and the financial criterion is related to system implementation costs and benefits from