

Metodologia de Otimização para o Dimensionamento de Reservatórios de Águas Pluviais

Mayara Condé Rocha Murça¹, Marcelo De Julio¹, Rodrigo Braga Moruzzi²
mayara@ita.br; dejulio@ita.br; rmoruzzi@rc.unesp.br

Recebido: 08/07/11 - revisado: 21/03/13 - aceito: 22/01/14

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia de otimização para o dimensionamento de reservatório de acumulação em sistemas de aproveitamento de águas pluviais, com o objetivo de aumentar a viabilidade econômica de projetos nessa área. Para isso, foram utilizados conceitos da Pesquisa Operacional para a elaboração de problemas de programação matemática relacionados à minimização do custo no ciclo de vida e à maximização da eficiência de atendimento. A partir de um estudo de caso, foram apresentados os resultados obtidos para diferentes métodos de dimensionamento e, assim, foi possível ressaltar a importância da utilização de ferramentas capazes de proporcionar análises mais acuradas e que tendem a aumentar significativamente a viabilidade econômica de sistemas de aproveitamento de águas pluviais.

Palavras-chave: dimensionamento; reservatório; aproveitamento; águas pluviais; Pesquisa Operacional

INTRODUÇÃO

Em um cenário de demanda crescente por água potável e alteração da disponibilidade hídrica, como mostra o ATLAS Brasil de Abastecimento Urbano de Água da Agência Nacional de Águas – ANA - (2010), o estudo e o desenvolvimento de conceitos de uso racional dos recursos hídricos tornam-se essenciais para que um modelo de desenvolvimento sustentável possa ser efetivamente empregado. Nesse sentido, o aproveitamento da água pluvial surge como fonte alternativa de potencial relevante no que diz respeito à gestão da oferta. No entanto, ainda são necessários incentivos governamentais para a implantação de projetos nessa área e para o desenvolvimento de estudos que permitam o aprimoramento de técnicas, a fim de que o aspecto financeiro se torne tão atraente quanto o aspecto ambiental.

O dimensionamento do reservatório é uma das etapas mais relevantes no projeto de um sistema de aproveitamento de águas pluviais, uma vez que é um item de alto custo unitário e, consequentemente, determinante na obtenção da viabilidade econômica. De acordo com o item 4.3.5 da NBR 15527 da ABNT (2007), o volume do reservatório deve ser

dimensionado de acordo com critérios técnicos, econômicos e ambientais, podendo-se usar métodos já normatizados ou outros, desde que devidamente justificado.

Os métodos citados na NBR 15527 da ABNT (2007) são, em sua maior parte, empíricos, baseados em experiências internacionais. Dentre os métodos mais utilizados para o dimensionamento de reservatórios de água pluvial, destacam-se: Método Azevedo Neto, Método de Rippl e Método da Simulação. São citados ainda três outros métodos: Método Prático Alemão, Método Prático Inglês e Método Prático Australiano. A descrição de tais métodos podem ser encontrados em Tomaz (2003); Carvalho, Oliveira e Moruzzi (2007) e Amorim e Pereira (2008).

Analisando-se a literatura da área, especificamente Tomaz (2003), verifica-se que há outros métodos comumente utilizados para o dimensionamento de reservatórios, como é o caso do método de Monte Carlo, essencialmente estatístico. Ainda, há trabalhos que desenvolveram metodologia baseada em análise de cenários para a escolha do volume do reservatório, semelhante ao que ocorre no método da Simulação, como será visto na seção de revisão da literatura a seguir. No entanto, verifica-se que não há um método que aborde o problema de dimensionamento do reservatório como um problema de otimização, que visa a obter uma solução ótima de acordo com critérios pré-estabelecidos. Assim, este trabalho teve o objetivo de desenvolver uma metodologia para o dimensionamento de reservató-

¹ Divisão de Engenharia Civil/ITA

² Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP

rios de águas pluviais que, a partir de um conjunto de parâmetros de entrada, gere como resultado de saída o volume ótimo do reservatório de acordo com um critério econômico. Mais especificamente, foi desenvolvido um modelo de programação matemática não linear que acopla o modelo hidráulico de balanço de massa a uma análise econômica de custo no ciclo de vida, visando à minimização de uma função objetivo caracterizada pelo valor presente da opção de aproveitamento de água pluvial. Logo, a metodologia garante a obtenção de solução ótima para os parâmetros e critérios especificados.

REVISÃO DA LITERATURA

Conforme citado anteriormente, a NBR 15527 da ABNT (2007) descreve um conjunto de métodos para o dimensionamento de reservatórios de águas pluviais. O Método Azevedo Neto é um método empírico que leva em consideração a precipitação média anual e o número de meses de seca. Já o Método de Rippl baseia-se em séries históricas e fornece o volume de reservatório para garantir o atendimento completo da demanda a partir da regularização da vazão, sendo, na maioria dos casos, antieconômico, pelo fato de pressupor o atendimento pleno da demanda. O Método da Simulação, por sua vez, baseia-se na equação da continuidade para um reservatório finito e é utilizado para verificar o comportamento do nível d'água em reservatórios de volumes arbitrados. Dessa forma, a aplicação deste método não gera como resultado direto o volume do reservatório. A simulação apenas auxilia no processo de escolha de volume a partir da análise dos resultados de diferentes cenários, os quais são aferidos por meio de conceitos como garantia de atendimento à demanda, falhas e suas eficiências correspondentes. Somente com base nesses critérios, os resultados sempre convergem para maiores volumes de reservatórios, de forma a minimizar as falhas e a incrementar a eficiência de atendimento. Por fim, os Métodos Práticos Alemão e Inglês são também empíricos e levam em consideração a precipitação média anual, ao passo que o Método Prático Australiano faz uso do balanço de massa e introduz um critério de confiança, sugerindo valores de 90 a 99%.

Apesar de não ser citado na NBR 15527 da ABNT (2007), outro método bastante conhecido e que pode ser empregado para o dimensionamento de reservatórios de águas pluviais é o Método de Monte Carlo, o qual se baseia na geração e simula-

ção de variáveis aleatórias para a obtenção de uma solução numérica, a partir de séries sintéticas com diferentes probabilidades de ocorrência (Tomaz, 2003). Novamente, o conceito da equalização é aplicado para determinação do volume do reservatório.

Deve-se ressaltar que a escolha do método apropriado pressupõe a qualificação da demanda a ser atendida, entre outros aspectos específicos de cada projeto. Por exemplo, no caso de a água pluvial ser a única fonte de abastecimento para fins de manutenção das condições mínimas de sobrevivência humana, deve-se considerar a equalização da vazão com elevado índice de atendimento (altas eficiências). Ao contrário, quando a demanda já é plenamente atendida pelo sistema público e a água pluvial é utilizada como recurso complementar para atender usos menos nobres, pode-se pressupor o aumento das falhas pela maximização do uso da água pluvial.

Assim como existem diversos métodos para dimensionamento do reservatório, também existe uma variedade de métodos para realizar a análise econômica de uma solução. Segundo Tomaz (2003), os três métodos básicos geralmente utilizados para a avaliação econômica de um sistema de aproveitamento de águas pluviais são: *payback*, análise do benefício-custo e análise do custo no ciclo de vida.

O método do *payback* simples baseia-se na obtenção do tempo de retorno do investimento. Para isso, faz-se necessário calcular o quociente entre o custo de implantação do reservatório e o custo do volume de água que a concessionária deveria prover, caso não fosse feito o aproveitamento. É um método simples, porém bastante utilizado para pré-estudos. A principal crítica a este método está relacionada ao fato de que o mesmo não considera o suprimento de água potável que a concessionária deve prover quando a demanda supera o volume de água pluvial aproveitável. Outra crítica está associada ao fato de o *payback* simples não considerar o valor do dinheiro no tempo. Nesse último caso, uma alternativa é utilizar o método do *payback* descontado.

O método da análise do benefício-custo consiste em determinar o benefício anual e o custo anual do sistema de aproveitamento e verificar se o quociente entre os dois é maior ou igual que 1. O benefício anual é obtido levando-se em consideração a economia de água potável, ao passo que o custo anual envolve a amortização anual do custo do reservatório e o custo de operação (tratamento, limpeza e análises). Do exposto, nota-se que o método de benefício-custo é mais aprimorado que o *payback*, já que considera custos de operação, além

de tratar o benefício e o custo, em valores monetários, na mesma dimensão temporal. Ainda assim, pode-se manter a mesma crítica realizada para o método do *payback* no que diz respeito à consideração do suprimento de água potável.

A avaliação da amortização anual de capital pode ser obtida por meio da Equação 1.

$$\text{Amortização anual} = \text{Capital} \times \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1}, \quad (1)$$

Onde n é o número de anos e d é a taxa de juros anual real, considerando a taxa inflação no período.

Por sua vez, a taxa de juros real é dada pela Equação 2.

$$d = \frac{1+D}{1+I} - 1, \quad (2)$$

Onde D é a taxa de juros nominal e I é a taxa de inflação.

Por fim, o método da análise do custo no ciclo de vida baseia-se na comparação do valor presente (VPR) de duas alternativas mutuamente exclusivas. São elas: aproveitar ou não a água pluvial. Segundo Tomaz (2003), por possibilitar uma análise em longo prazo e no ciclo de vida do sistema como um todo, este método traz maior confiabilidade que os demais citados. Para a avaliação econômica de todo o sistema de aproveitamento de águas pluviais, deveriam ser analisados os seguintes parâmetros: troca de bombas após determinado tempo, energia elétrica, tratamento, limpeza, análises físico-químicas e microbiológicas, projeto, dentre outros. No entanto, em se tratando apenas do dimensionamento do reservatório, faz-se necessário analisar somente: custo de implantação, custo contingencial, custo de operação e manutenção e custo do suprimento de água potável por parte da concessionária quando o sistema de aproveitamento não é capaz de atender completamente à demanda. Para obter o valor presente das alternativas, são utilizadas as Equações 3 e 4.

1) Valor presente simples (VPR)

$$\text{VPR} = F_t \times \frac{1}{(1+d)^t}, \quad (3)$$

Onde F_t representa o investimento pontual no tempo t e d representa a taxa de juros anual real.

2) Valor presente uniforme (VPRU)

$$\text{VPRU} = A_o \times \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^n}, \quad (4)$$

Onde A_o é o investimento anual no período de n anos e d representa a taxa de juros anual real.

Na tentativa de estabelecer soluções mais embasadas técnica e economicamente, alguns estudos têm sido realizados para aprimorar os métodos de dimensionamento de reservatório de acumulação de águas pluviais. Moruzzi *et al.* (2012) estabeleceram uma análise racional para o dimensionamento baseada em eficiências de atendimento e de aproveitamento, demanda de água pluvial e tempo de retorno do investimento (*payback* descontado) para diferentes cenários. A hipótese central do método é que a demanda já é totalmente suprida pelo sistema público de abastecimento na condição inicial e, assim, o sistema de água pluvial pode apresentar falhas de fornecimento. Dessa forma, a maximização da demanda implica na redução do período de amortecimento do investimento. Esse caso constitui um exemplo típico de uma edificação em área urbana que deseja incorporar o aproveitamento de água pluvial, visando atender usos menos nobres. O balanço de massa foi aplicado para o cômputo das parcelas referentes aos volumes armazenados, disponibilizados e utilizados diariamente, aplicado ao período total de um ano, tempo no qual foi considerado o esvaziamento do tanque para manutenção. Além disso, foram utilizadas duas variáveis para a análise dos resultados de cada cenário simulado:

- Eficiência de atendimento (E_a): Quociente entre o volume total de chuva consumido e a demanda total;
- Eficiência de aproveitamento (E_h): Quociente entre o volume total de chuva consumido e o volume total de chuva aproveitável.

Analisando-se o funcionamento de reservatórios de volumes previamente fixados por meio das variáveis definidas no método em diferentes cenários, Moruzzi *et al.* (2012) verificaram que os parâmetros E_a e E_h convergem para um mesmo valor quando a demanda atendida por água pluvial é máxima, ponto tal em que o valor do *payback* descontado é mínimo. Por outro lado, aumentando-se o volume do reservatório e considerando um valor fixo de demanda de água pluvial, os parâmetros E_a e E_h tendem a um valor máximo, limitado pelo volume

aproveitável. Assim, a análise do comportamento desses parâmetros conduz a uma escolha mais racional do volume do reservatório para o atendimento parcial da demanda em áreas urbanas plenamente abastecidas pelo sistema público.

Internacionalmente, a verificação do comportamento de um reservatório de volume pré-fixado com relação a características da edificação também é utilizada como forma de racionalizar o dimensionamento do sistema de captação de água pluvial, como mostram Coombes e Kuczera (2003) e Rahman *et al.* (2007) em suas análises de performance.

Outras técnicas de dimensionamento também já foram estudadas e desenvolvidas. Dornelles *et al.* (2010) introduziram coeficientes de redução de precipitação média anual de forma a evitar o comportamento deficitário do reservatório e aumentar a confiabilidade do sistema, enquanto Mierzwa *et al.* (2007) propuseram a priorização do máximo aproveitamento de água pluvial no período mais chuvoso em detrimento da regularização de vazão, o que permite ampliar o potencial de redução de demanda de água tratada da concessionária e obter menores volumes de reservatório. Gomes *et al.* (2010) utilizaram um critério financeiro baseado no valor presente para o dimensionamento do reservatório de águas pluviais. Variando o volume do reservatório manualmente, os custos das alternativas de atendimento parcial da demanda por aproveitamento de água pluvial e de atendimento completo da demanda por água tratada da concessionária foram obtidos e comparados, sendo o volume ótimo definido pelo menor custo observado da alternativa de aproveitamento. No entanto, a variação manual do volume do reservatório para a obtenção dos custos associados torna-se exaustiva na prática, principalmente quando se deseja aumentar a precisão dos resultados. Por fim, Liaw e Tsai (2004) propuseram a otimização do dimensionamento do reservatório a partir da análise do balanço de massa para cada combinação entre área de cobertura e capacidade de acumulação, a fim de atingir um valor de confiabilidade pré-definido. Para isso, foi proposta a determinação das curvas *isoquanta* de confiabilidade do sistema e *isocusto*, sendo o ponto de tangência entre as mesmas indicativo da combinação ótima de variáveis, ou seja, aquela que fornece o menor custo para atender um determinado valor de confiabilidade.

Apesar de existirem análises mais completas no que diz respeito ao dimensionamento que levam em consideração parâmetros econômicos, de eficiência e de confiabilidade, percebe-se a inexistência de um método que possibilite ao projetista obter o

volume ótimo do reservatório de forma automática a partir de alguns parâmetros de entrada, contemplando as variáveis intervenientes acima mencionadas. Em geral, devem ser simulados vários cenários para, em seguida, escolher o melhor de acordo com critérios pré-estabelecidos. No entanto, isto não garante que o resultado seja ótimo, visto que não foi analisado todo o espectro de alternativas.

METODOLOGIA

Conforme citado anteriormente, este artigo aborda o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento de reservatório de águas pluviais que gere, para um determinado conjunto de parâmetros de entrada, o volume ótimo de reservatório de acordo com uma função objetivo previamente especificada. Assim, desenvolveu-se um problema de programação matemática não linear que congregou o aspecto econômico e o aspecto hidráulico de funcionamento do reservatório de águas pluviais.

A metodologia proposta foi aplicada a um estudo de caso em uma instalação aeroportuária militar no Rio de Janeiro. Os resultados foram comparados com outros métodos de dimensionamento e com outros trabalhos existentes na literatura.

Modelagem matemática

O método proposto para a obtenção do volume ótimo de reservatório foi a minimização do custo no ciclo de vida da opção de aproveitamento de água pluvial. A premissa do método é de que existe uma demanda fixa conhecida de água potável em uma edificação que pode ser abastecida por água pluvial e, portanto, deseja-se projetar um sistema de aproveitamento de água pluvial que seja o mais econômico possível para atender a esta demanda em um período de projeto especificado (ciclo de vida). Para realizar a análise econômica, decidiu-se optar pelo método da análise do custo no ciclo de vida em detrimento de outros métodos, visto que o mesmo viabiliza uma análise mais completa, englobando os principais fatores intervenientes durante todo o ciclo de vida do projeto. De acordo com Roebuck e Ashley (2006) e Ward *et al.* (2010), o detalhamento do modelo hidráulico e a utilização de uma análise de custo durante o ciclo de vida do sistema são essenciais na obtenção de resultados mais realistas, uma vez que a utilização de modelos simplificados tendem a superestimar a eficiência hidráulica e a subestimar os custos associ-

ados ao sistema. É importante observar que, ao internalizar o custo do suprimento de água potável, não é necessário analisar os parâmetros de eficiência de atendimento e aproveitamento, já que os mesmos estão embutidos no valor presente da opção de aproveitamento de água pluvial.

Foi empregado o balanço diário de massa líquida no reservatório ao longo de um ano, conforme Equação 5:

$$S_t = Vp_t + S_{t-1} - D_t, t = 1, \dots, 365, \quad (5)$$

Onde t representa um dia do ano, S_t representa o volume de água no reservatório no tempo t em m^3 , S_{t-1} representa o volume de água no reservatório no tempo $t-1$ em m^3 , Vp_t é o volume de chuva aproveitável em m^3 e D_t é a demanda diária em m^3 .

Por sua vez, o volume de chuva aproveitável (Vp_t) foi obtido através da Equação 6:

$$Vp_t = C \times (P_t \times 10^{-3}) \times A - ff, t = 1, \dots, 365, \quad (6)$$

Em que P_t é a precipitação diária em mm, A é a área de coleta de água pluvial em m^2 , C é o coeficiente de escoamento superficial (*runoff*) e ff é o descarte da precipitação inicial (*first flush*) em m^3 .

O equacionamento do método proposto é apresentado nas Equações 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16, as quais determinam o balanceamento de massa no sistema, relacionando-o com o aspecto econômico. Observa-se, através da Equação 8, que a condição inicial do balanço de massa é de reservatório vazio.

$$S_{t-1} = \begin{cases} 0, & \text{se } t = 1 \\ \begin{cases} 0, & \text{se } S_{t-2} < 0 \\ S_{t-2}, & \text{caso contrário} \end{cases}, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (7)$$

$$S_t = \begin{cases} V_R, & \text{se } Vp_t + S_{t-1} - D_t > V_R \\ (Vp_t + S_{t-1} - D_t), & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (8)$$

$$Ov_t = \begin{cases} (Vp_t + S_{t-1} - D_t - V_R), & \text{se } Vp_t + S_{t-1} - D_t > V_R \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (9)$$

Onde Ov_t é a quantidade de chuva extravasada no tempo t e V_R é o volume do reservatório.

$$V_{c_t} = \begin{cases} M, & \text{se } M \leq V_R \\ V_R, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (10)$$

Onde V_{c_t} é a quantidade de chuva consumida no tempo t e M é dado pela Equação 11. É válido observar que M é um parâmetro matemático, sem significado físico, criado apenas para facilitar a visualização e o entendimento da Equação 10.

$$M = \begin{cases} D_t, & \text{se } Vp_t + S_{t-1} \geq D_t \\ (Vp_t + S_{t-1}), & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (11)$$

$$Supr_t = X_t + Y_t, \quad (12)$$

Onde $Supr_t$ é o suprimento de água fornecido pela concessionária no tempo t e X_t e Y_t são dados, respectivamente, pelas Equações 13 e 14. Da mesma forma que M , X_t e Y_t são parâmetros matemáticos, sem significado físico, criados apenas para facilitar a visualização e o entendimento da Equação 12.

$$X_t = \begin{cases} -(Vp_t + S_{t-1} - D_t), & \text{se } Vp_t + S_{t-1} - D_t < 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (13)$$

$$Y_t = \begin{cases} (D_t - V_{c_t} - X_t), & \text{se } V_{c_t} + X_t \leq D_t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (14)$$

$$VPR_{chuva} = C_i + \left(C_{om} + C_{ap} \cdot \sum_{t=1}^{365} Supr_t \right) \cdot \frac{(1+d)^{T_u} - 1}{d(1+d)^{T_u}}, \quad (15)$$

Onde VPR_{chuva} é o valor presente da opção de aproveitamento de água pluvial em reais (R\$), C_i é o custo de implantação do reservatório em R\$, o qual já engloba o custo contingencial, C_{om} é o custo de operação e manutenção do sistema de aproveitamento de águas pluviais em R\$, C_{ap} é o custo do m^3 de água potável fornecida pela concessionária em R\$ e T_u é a vida útil do sistema de aproveitamento de águas pluviais em anos.

$$VPR_{concessionária} = \left(C_{ap} \cdot \sum_{t=1}^{365} (Supr_t + V_{c_t}) \right) \cdot \frac{(1+d)^{T_u} - 1}{d(1+d)^{T_u}}, \quad (16)$$

Onde $VPR_{concessionária}$ é o valor presente da opção de não aproveitar a água pluvial em R\$.

A sequência de equações que determinam o balanço de massa é explicada a seguir. Considere um evento de precipitação e uma demanda fixa de água pluvial em um determinado dia. O volume de chuva precipitado soma-se ao volume de água já existente no reservatório para atender à demanda (Equações 7 e 8). Se o volume de chuva precipitado é tal que excede a capacidade do reservatório, tem-se um excedente de água pluvial que deve ser descartado (Equação 9). Por outro lado, o volume de chuva precipitado que foi para o reservatório de águas pluviais constitui o volume de chuva consumido (Equações 10 e 11). Se o volume de chuva precipitado é tal que, juntamente com o volume de água já existente no reservatório, não é suficiente para atender à demanda, é necessário um suprimento de água potável por parte da concessionária para que a demanda seja atendida (Equações 12, 13 e 14). Finalmente, as Equações 15 e 16 relacionam os resultados do balanço de massa com o aspecto econômico do custo no ciclo de vida.

Apesar de a motivação inicial do trabalho estar relacionada à inexistência de um método que otimize o dimensionamento do reservatório de acumulação, há duas situações de interesse quando se deseja projetar um sistema de aproveitamento de águas pluviais. Na situação mais comum (primeiro caso), tem-se a demanda de água de chuva, obtida através do levantamento do perfil de consumo na edificação, e deseja-se obter o volume do reservatório necessário para atender a essa demanda de forma eficiente. No segundo caso, dado um reservatório de volume fixado, deseja-se projetar uma demanda para determinada atividade de tal forma que o custo com o abastecimento para tal atividade seja o menor possível.

Para a modelagem do primeiro caso, foram utilizadas ferramentas da Pesquisa Operacional, conforme Taha (2008), a fim de otimizar o dimensionamento do reservatório. Dessa forma, com a predefinição da demanda de água de chuva e do tempo de vida útil do sistema de aproveitamento de águas pluviais, foi estabelecido o seguinte problema de programação matemática:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } VPR_{\text{chuva}} \\ &\text{Sujeito a } \begin{cases} V_R \geq 0 \\ \sum_{t=1}^{365} D_t \leq \sum_{t=1}^{365} VP_t \end{cases} \quad (I) \end{aligned}$$

Observa-se nesse ponto a contribuição do método proposto para o dimensionamento de reservatório de águas pluviais, uma vez que possui como princi-

pal característica distinta dos métodos existentes a garantia da obtenção da solução mais econômica que atende aos requisitos de demanda em uma análise de ciclo de vida: a partir de alguns parâmetros entrada, o método gera o volume de reservatório ótimo, ou seja, aquele que minimiza a função objetivo caracterizada pelo valor presente da opção de aproveitamento de água pluvial sujeito à restrição matemática de que a demanda total de água pluvial anual deve ser menor que o volume anual de chuva aproveitável (Problema de Programação Matemática I). Em suma, não são analisados apenas alguns cenários para a escolha, e sim todo o espectro de alternativas que compõem a região viável do problema de programação matemática. A Figura 1 sintetiza a metodologia proposta através de um fluxograma.

Para o segundo caso, a minimização do custo no ciclo de vida não pode ser feita, uma vez que isso conduziria a uma demanda nula. Assim, foi necessário estabelecer um novo problema, de forma a obter a demanda que otimize a eficiência do sistema. Para isso, foi analisado o comportamento de variáveis como volume de chuva consumido, suprimento de água por parte da concessionária, eficiência de atendimento e eficiência de aproveitamento e notou-se que, em um sistema eficiente, o volume de chuva consumido deve ser máximo e o suprimento deve ser mínimo. Em consequência, foi estabelecido o problema de maximização da diferença entre o volume anual de chuva consumido e o suprimento anual de água por parte da concessionária (Problema de Programação Matemática II). Logo, para a segunda situação, tem-se o seguinte problema:

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar } \sum_{t=1}^{365} VC_t - \sum_{t=1}^{365} \text{Supr}_t \\ &\text{Sujeito a } \begin{cases} D_t \geq 0 \\ \sum_{t=1}^{365} D_t \leq \sum_{t=1}^{365} VP_t \end{cases} \quad (II) \end{aligned}$$

Para a discussão da metodologia, foi desenvolvida uma rotina utilizando *Visual Basic for Applications* (VBA), a fim de analisar um conjunto de situações diferenciadas. Nessa etapa, foram calculadas as variáveis de eficiência concebidas por Moruzzi et al. (2012), a fim de permitir uma contraposição entre a metodologia em questão e aquela apresentada em Moruzzi et al. (2012), considerando as hipóteses estabelecidas em ambos os casos. Para isso, foram utilizados os mesmos parâmetros de entrada referentes ao estudo de caso. Assim, por exemplo, o

volume total de chuva aproveitável, utilizado para determinar a eficiência de aproveitamento, já leva em consideração o descarte de 2 mm da precipitação inicial.

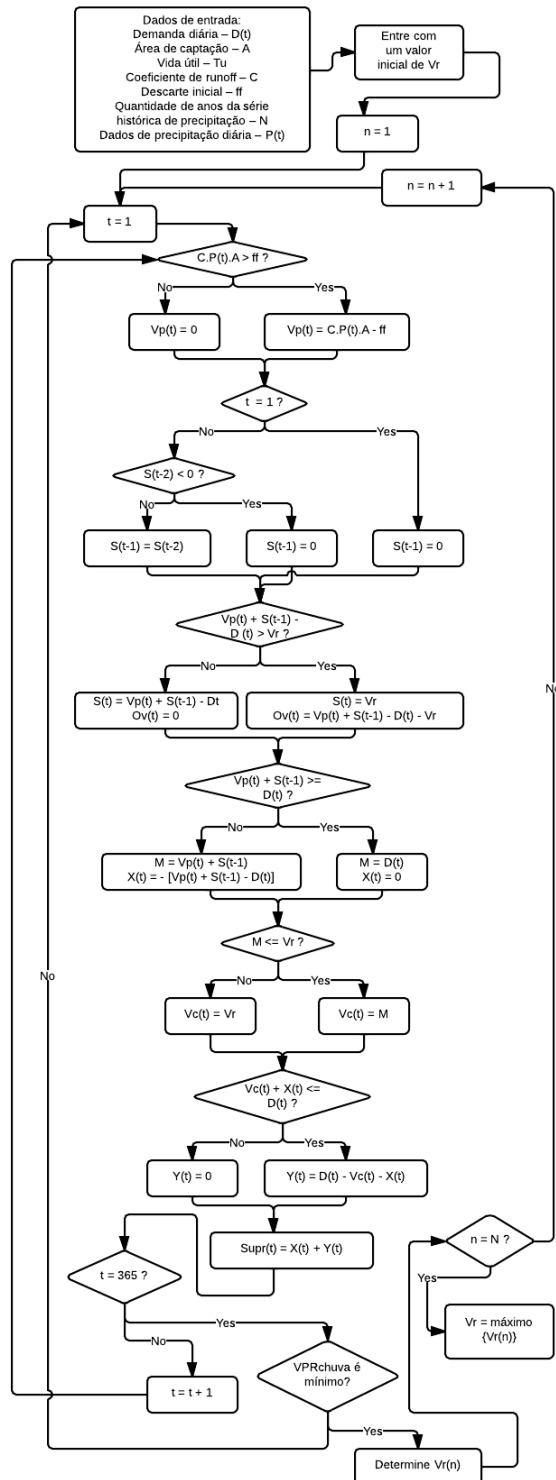


Figura 1 – Fluxograma simplificado do método proposto

Estudo de caso

Para analisar a aplicação da metodologia em uma situação real, utilizou-se como estudo de caso o Parque de Material Aeronáutico do Galeão (PAMA-GL), no Rio de Janeiro, o qual contém hangares de manutenção de aeronaves com áreas de cobertura significativas, revelando, portanto, um potencial favorável para o aproveitamento de águas pluviais. Utilizou-se como dados diários de precipitação no local a série histórica disponibilizada pelo Instituto de Controle do Espaço Aéreo – ICEA – (2011) através do seu Banco de Dados Climatológicos, no período de 2004 a 2010. A Figura 2 apresenta os dados de precipitação acumulada mensal para cada ano da série histórica.

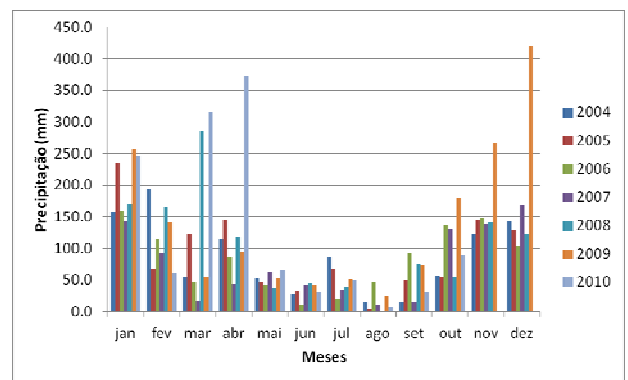


Figura 2 – Dados de precipitação da Estação Meteorológica de Superfície do Galeão no período de 2004 a 2010

Considerando o máximo potencial de aproveitamento dos dois maiores hangares desta organização militar, obteve-se como parâmetros de entrada uma área total de cobertura de 28361,7 m² e uma demanda diária de 40 m³ (demanda máxima definida pela disponibilidade de chuva). Segundo um levantamento do perfil de consumo de água potável realizado no PAMA-GL, pode-se atingir uma demanda de água pluvial desta grandeza se a mesma for utilizada para atividades como: lavagem de aeronaves e de peças de aeronaves, lavagem de pistas e de pátios, lavagem de viaturas e descargas em bacias sanitárias.

Foram considerados tempo de vida útil do sistema de aproveitamento de águas pluviais de 20 anos, descarte (*first flush*) igual a 2 mm e coeficiente de escoamento superficial (*runoff*) igual a 0,8. É válido observar que as coberturas dos hangares são metálicas e que um estudo de qualidade da água pluvial (antes e após o descarte) realizado para esta organização revelou que, se adotado um descarte de

2 mm, faz-se necessário especificar um pós-tratamento que reduza a cor aparente e a turbidez em 52% e 53%, respectivamente, e que promova desinfecção e correção de pH.

Para determinar o custo do reservatório de água pluvial, consultou-se o Informativo SBC (2011), a fim de obter preços diferenciados de reservatórios de concreto armado de acordo com a capacidade. Com isso, foi possível construir uma função de custo, sendo o volume a variável independente, por meio de regressão linear. A utilização do material concreto armado se mostrou mais apropriada para o caso, uma vez que a especificidade da metodologia de gerar como saída o volume ótimo do reservatório está intimamente ligada à possibilidade de usar reservatórios pré-moldados ou moldados *in loco* para o caso de volumes não disponíveis comercialmente. A Equação 17 representa a função de custo utilizada, com R^2 igual a 0,93.

$$\text{Custo (R\$)} = 421,72 \times \text{Volume (m}^3\text{)} + 3099,06, \quad (17)$$

É válido observar que o custo de implantação do reservatório engloba o custo do reservatório em si e o custo contingencial (projeto, instalação, dentre outros), o qual foi considerado como 30% do custo do reservatório, valor que Tomaz (2003) recomenda, de acordo com análises empíricas. Da mesma forma, o custo de operação e manutenção foi considerado como 6% do custo do reservatório, valor também recomendado por Tomaz (2003).

Por fim, os valores utilizados para taxa de inflação, taxa de juros e preço do m³ de água potável foram aqueles disponibilizados, respectivamente, pelo Banco Central do Brasil – BCB – (2011) e pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos – CEDAE – (2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando-se o método proposto ao caso do PAMA-GL para a situação de demanda fixa (40 m³/dia) e utilizando a ferramenta *Solver* do *Excel* para resolver o problema de programação matemática (I), obteve-se que o volume ótimo do reservatório é de 280 m³. É válido ressaltar que, para cada ano da série histórica de precipitação diária, o método foi aplicado (o problema de programação matemática foi resolvido para cada ano da série histórica independentemente, conforme Figura 1), sendo o volume ótimo global do reservatório definido como o máximo entre as soluções ótimas obtidas para cada ano. Assim, evitou-se a utilização de valores médios

de precipitação diária, o que poderia reduzir drasticamente a confiabilidade. Além disso, de acordo com o item 5.1 da NBR 15527 (ABNT, 2007), devem ser realizadas limpeza e desinfecção anualmente no reservatório, sendo razoável, portanto, realizar o balanço de massa para cada ano da série individualmente.

As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam o comportamento de algumas variáveis com a variação do volume do reservatório. É interessante notar que o valor ótimo obtido (Figura 3) não corresponde ao momento em que as eficiências de atendimento e de aproveitamento passam a ter menores alterações com o incremento do volume (Figuras 4 e 5). Isso se deve ao fato de que o aumento da parcela do custo do reservatório no valor presente final ainda é compensado pela redução da parcela de suprimento (Figura 6). O ponto ótimo, correspondente ao valor presente mínimo, caracteriza-se pela situação em que a redução da parcela composta pelo suprimento não mais sustenta o aumento da parcela relacionada ao custo do reservatório. Além disso, analisando as Figuras 3, 4 e 5, verifica-se que o ponto ótimo não corresponde às máximas eficiências de atendimento e de aproveitamento. Conforme já mencionado, o suprimento foi computado como fator agregador de custo, justamente por ter sido feita uma análise de ciclo de vida, diferentemente de Moruzzi et al (2012), em que o suprimento não foi considerado na análise econômica pelo fato de o objetivo ser a maximização do potencial de atendimento por água pluvial da demanda total de uma edificação plenamente suprida pelo abastecimento público de água potável na condição inicial. Assim, tanto a demanda quanto o volume do reservatório são variáveis de projeto, ou seja, as hipóteses adotadas naquele método não se aplicam integralmente ao presente caso.

Tabela 1 – Volume de reservatório, em m³, para cada método analisado

Ano	PROP	RI	AN	PA	PI
2004	266	1477	2476	878	1474
2005	266	2142	2623	878	1561
2006	235	2577	2395	878	1426
2007	191	1309	2134	878	1270
2008	200	1360	3268	878	1945
2009	280	1040	3941	878	2346
2010	149	2771	3629	878	2160
Máximo	280	2771	3941	878	2346

Legenda: Prop – método proposto; RI – Método de Rippl; AN – Método Azevedo Neto; PA – Método Prático Alemão; PI – Método Prático Inglês

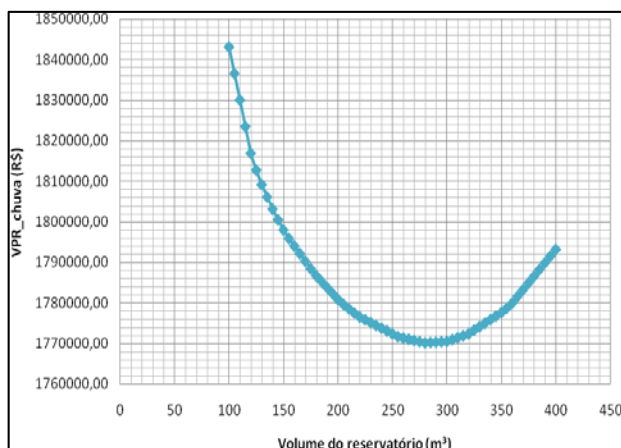


Figura 3 – Gráfico do valor presente da opção de aproveitamento de água pluvial pelo volume

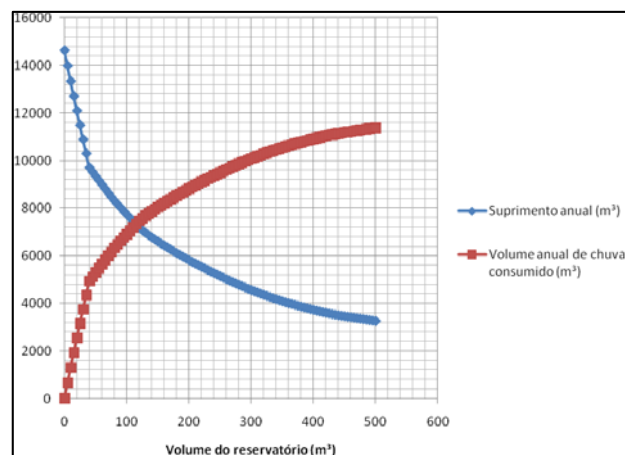


Figura 6 – Gráfico do suprimento e do volume de chuva consumido em um ano pelo volume

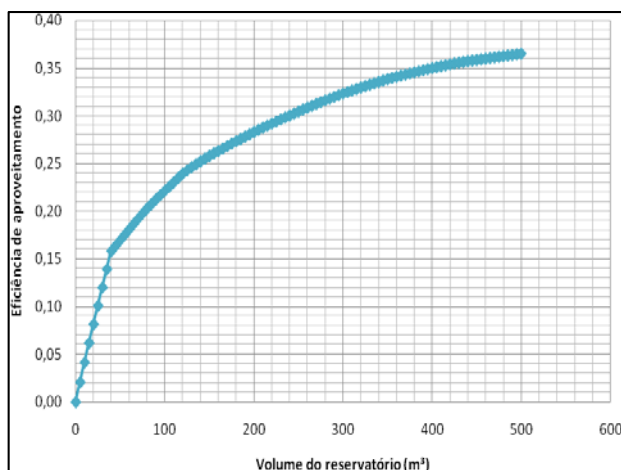


Figura 4 – Gráfico da eficiência de aproveitamento pelo volume

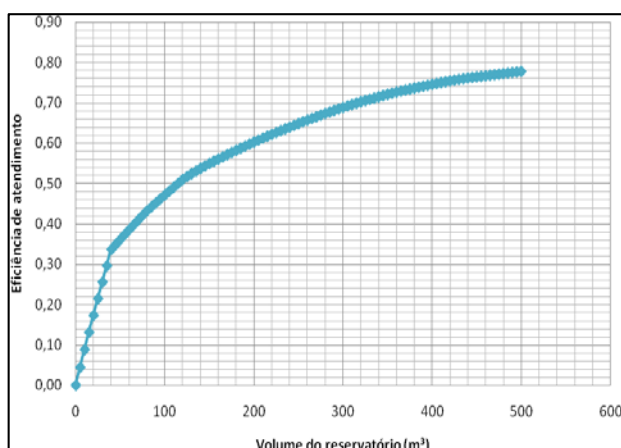


Figura 5 – Gráfico da eficiência de atendimento pelo volume

Tabela 2 – Valor presente da opção de aproveitamento de água pluvial, em R\$, para cada método analisado

	VPR_{chuva} (R\$)	Redução percentual
PROP	1770129,50	-
RI	3610291,54	51%
NA	4610003,09	62%
PA	2110274,09	16%
PI	3270436,55	46%

Legenda: Prop – método proposto; RI – Método de Rippl; NA – Método Azevedo Neto; PA – Método Prático Alemão; PI – Método Prático Inglês

Para fins de comparação, o reservatório também foi dimensionado segundo os métodos descritos na NBR 15527 da ABNT (2007) para os mesmos parâmetros de entrada. Os resultados são apresentados na Tabela 1. É possível notar que o método proposto realmente conduz a valores bem menores de volume, enfatizando que a utilização de ferramentas de dimensionamento que viabilizam análises mais completas e otimizadas pode aumentar significativamente a viabilidade econômica de sistemas de aproveitamento de águas pluviais. Foram obtidas reduções de 51%, 62%, 16% e 46% no valor presente da opção de aproveitamento de água pluvial quando o método em questão é comparado ao Método de Rippl, ao Método Azevedo Neto, ao Método Prático Alemão e ao Método Prático Inglês, respectivamente, como mostra a Tabela 2.

Aplicando-se o método desenvolvido ao caso do PAMA-GL para a situação de demanda variável e volume do reservatório fixado em 280 m³, ou seja,

utilizando a ferramenta *Solver* do *Excel* para resolver o problema de programação matemática (II), obteve-se que a demanda ótima é de 25,5 m³/dia. Assim, se fosse necessário projetar uma atividade que fosse abastecida pelo reservatório de volume pré-fixado, esta deveria consumir 25,5 m³/dia para que o sistema de abastecimento fosse o mais econômico possível.

Segundo Moruzzi *et al.* (2012), a convergência das eficiências implica em *payback* descontado mínimo. Isso ocorre por causa da limitação da demanda pela disponibilidade de chuva, como mostra a Figura 7, em que a convergência das eficiências ocorre para uma demanda de 84 m³/dia, ou seja, a máxima suportável pelo sistema. No entanto, como a hipótese inicial pressupunha atendimento parcial em área urbana já abastecida pelo sistema público, não foi considerado o suprimento de água por parte da concessionária como fator agregador de custo. Assim, para as hipóteses lançadas nessa proposta, a metodologia de Moruzzi *et al.* (2012) não conduz à situação mais econômica, nesse caso específico. Além disso, variando-se o volume do reservatório, a convergência das eficiências sempre conduziria à demanda máxima suportável pelo sistema, uma vez que a eficiência de atendimento é sempre decrescente e a eficiência de aproveitamento é sempre crescente, limitada apenas pela disponibilidade de chuva. Tais fatos podem ser observados com a análise do valor de demanda obtido quando da aplicação do novo método, uma vez que ele é menor que a demanda máxima suportável pelo sistema.

A Figura 8 apresenta o comportamento do volume de chuva consumido e do suprimento em um ano (2009) para o caso em questão e a Figura 9 apresenta o comportamento da função objetivo para vários valores de demanda. Como já foi observado, o ponto ótimo (máxima diferença entre volume de chuva consumido e suprimento) não corresponde à demanda máxima definida pela disponibilidade de chuva.

É importante observar que há casos, nos quais estão baseados a análise racional de Moruzzi *et al.* (2012), em que se deseja estabelecer o potencial de atendimento à demanda total de uma edificação a partir de um reservatório de volume pré-fixado para uma condição de suprimento pré-existente pela rede pública de abastecimento, caso esse típico para edificações em áreas urbanas. Para essas situações, a maximização do volume de chuva consumido anualmente é condição suficiente, o que conduz à demanda máxima suportável pelo sistema definida pela disponibilidade de chuva. Assim, o suprimento não precisa ser levado em consideração, uma vez

que a demanda total da edificação já é atendida pelo fornecimento da concessionária no momento inicial.

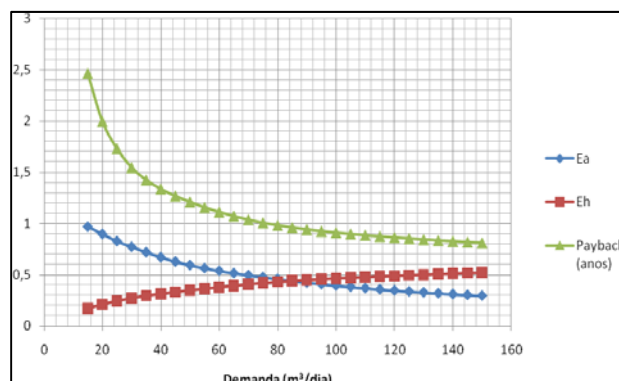


Figura 7 – Gráfico das eficiências e do *payback* descontado pela demanda

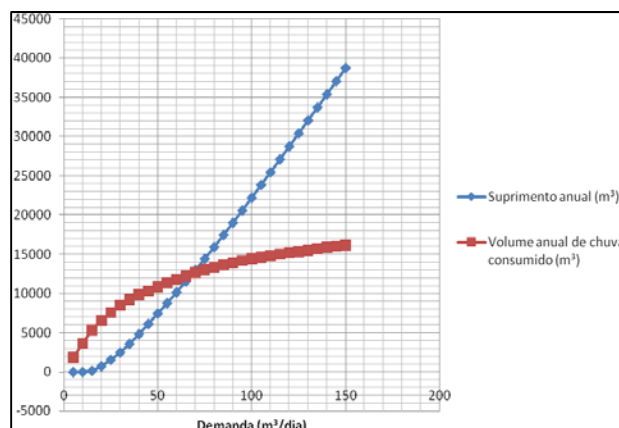


Figura 8 – Gráfico do suprimento e do volume de chuva consumido em um ano pela demanda

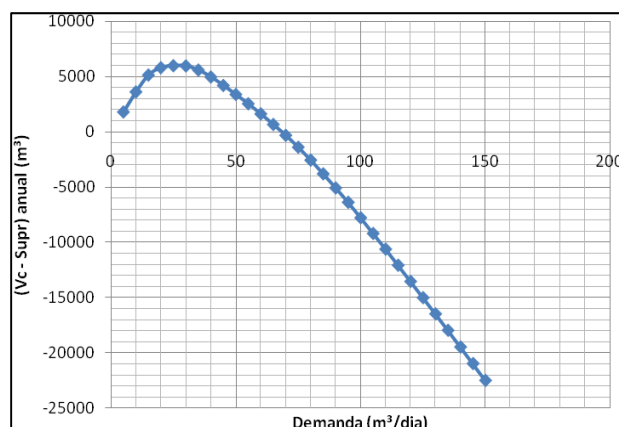


Figura 9 – Gráfico da diferença entre o volume de chuva consumido e o suprimento em um ano pela demanda

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia de otimização para o dimensionamento de reservatórios de águas pluviais. Para isso, foi elaborado um modelo de programação matemática que acopla o modelo hidráulico de balanço de massa a uma análise de custo no ciclo de vida, a fim de determinar o volume ótimo do reservatório, ou seja, aquele que minimiza o valor presente da opção de aproveitamento de águas pluviais.

Após uma revisão da literatura abrangente, verificou-se que a maior parte dos métodos de dimensionamento de reservatórios de águas pluviais baseia-se em análises de comportamento de variáveis em função da variação da capacidade do reservatório, sendo a determinação prática e automática do volume para alguns parâmetros de entrada ainda incipiente. A aplicação da Pesquisa Operacional no dimensionamento de reservatórios em sistemas de aproveitamento de águas pluviais permitiu obter valores ótimos de volume e demanda no que diz respeito ao aspecto econômico do custo no ciclo de vida. No estudo de caso do PAMA-GL, para uma demanda diária (de 40 m³) uma área de cobertura de 28361,7 m², obteve-se o valor de 280 m³ na otimização do volume do reservatório.

Utilizando os mesmos dados de entrada, foi possível calcular o volume a partir dos métodos citados na NBR 15527 da ABNT (2007) e concluiu-se que a metodologia de dimensionamento proposta reduziu em 51%, 62%, 16% e 46% o valor presente da opção de aproveitamento de água pluvial, quando comparado ao Método de Rippl, ao Método Azevedo Neto, ao Método Prático Alemão e ao Método Prático Inglês, respectivamente. Assim, verificou-se que a utilização de ferramentas de dimensionamento que viabilizam análises mais completas amplia significativamente a viabilidade econômica de sistemas de aproveitamento de águas pluviais, o que, juntamente com o aspecto ambiental de gestão eficiente dos recursos hídricos e de redução de enchentes, contribui para a evolução de projetos nessa área.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 15527: Água de chuva: Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis*. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- AMORIM, S.; PEREIRA, D.J. de A. Estudo comparativo dos métodos de dimensionamento para reservatórios utilizados em aproveitamento de água pluvial. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 53-66, abr./jun. 2008.
- ANA, Agência Nacional de Águas. *ATLAS Brasil: Abastecimento Urbano de Água*. Brasília: ANA, 2010. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Download.aspx>>. Acesso em: 01 jul. 2011.
- BCB, Banco Central do Brasil. *Comitê de Política Monetária*. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?COPOM>>. Acesso em: 27 abr. 2011.
- CARVALHO, G. S.; OLIVEIRA, S. C.; MORUZZI, R. B. Cálculo do volume do reservatório de sistemas de aproveitamento de água de chuva. In: *Anais...SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS*, 10., 2007, São Carlos. São Carlos: UFSCar, ANTAC, 2007.
- CEDAE, Companhia Estadual de Águas e Esgotos. *Estrutura tarifária de agosto de 2010*. Rio de Janeiro: CEDAE, 2009. Disponível em: <http://www.cedae.com.br/div/ESTRUTURA_TARIFARIA_DE_AGOSTO_DE_2010.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.
- COOMBES, P. J.; KUCZERA, G. Analysis of the Performance of Rainwater Tanks in Australian Capital Cities. In: *International Hydrology and Water Resources Symposium*, 28., 2003, Wollongong. Proceedings... Australia: The Institution of Engineers, 2003.
- DORNELLES, F.; TASSI, R.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação das Técnicas de Dimensionamento de Reservatórios para Aproveitamento de Água de Chuva. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.15, n.2, p.59-68, maio 2010.
- GOMES, J.; WEBER, D. C.; DELONG, C. M. Dimensionamento de Reservatórios de Armazenamento de Águas Pluviais, usando um Critério Financeiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.15, n.1, p.89-100, mar. 2010.
- ICEA, Instituto de Controle do Espaço Aéreo. *Dados climáticos do aeroporto do Galeão*. São José dos Campos: ICEA, 2011.
- LIAW, C. H.; TSAI, Y. L. Optimum Storage Volume of Rooftop Rainwater Harvesting Systems for Domestic Use. *Journal of the American Water Resources Association*, v.40, n.4, p.901-912, ago. 2004.
- MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I.; DA SILVA, M. C. C.; RODRIGUES, L. D. B. Águas Pluviais: Método de Cálculo do Reservatório e Conceitos para um Aproveitamento Adequado.

Revista de Gestão de Água da América Latina, v.4, n.1, p.29-37, jun. 2007.

MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, S. C.; GARCIA, M. L. A proposal for reservoir volume calculation in rainwater harvesting systems. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, v.6, n.6, p.707-714, jun. 2012.

RAHMAN, A.; DBAIS, J.; RONALDSON, P.; SHRESTHA, S. Life Cycle Costing of Rainwater Tank as a Component of Water Sensitive Urban Design. In: *International Conference on Rainwater Catchment Systems*, 13., 2007, Sydney. Proceedings... Hilo: IRCSA, 2007.

ROEBUCK, R. M.; ASHLEY, R. M. Predicting the Hydraulic and Life-Cycle Cost Performance of Rainwater Harvesting Systems using a Computer Based Modelling Tool. In: *International Conference on Urban Drainage Modelling*, 7., 2006, Melbourne. Proceedings... London: IWA, 2006.

SBC. *Informativo SBC – março de 2011*. Rio de Janeiro: SBC, 2011.

TAHA, H. A. *Pesquisa Operacional*. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TOMAZ, P. *Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis*. 2. ed. São Paulo: Navegar Editora, 2003.

WARD, S.; MEMON, F. A.; BUTLER, D. Rainwater Harvesting: Model-Based Design Evaluation. *Water Science & Technology*, v.61, n.1, p.85-96, abr. 2010.

Optimization Methodology For Rainwater Reservoir Sizing

ABSTRACT

This work aimed to develop an optimization methodology for reservoir sizing in rainwater harvesting systems in order to increase the economic viability of projects in this area. For this, concepts of Operations Research were used so as to develop mathematical programming problems related to minimizing the life cycle cost and maximizing efficiency. The results obtained for different sizing methods were presented based on a case study, emphasizing the importance of tools that are able to provide a more accurate analysis and tend to significantly increase the economic viability of rainwater harvesting systems.

Key-words: *sizing; reservoir; harvesting; rainwater; Operations Research.*