

## PROGRAMA PARA DIMENSIONAR RESERVATÓRIO DE AMORTECIMENTO DE ENCHENTES EM ÁREA URBANA COM BASE EM PLANILHA EXCEL COM APLICAÇÃO A UM ESTUDO DE CASO.

Matheus Dreher Cicolani (IC) e Bruno Pecini (Orientador)

**Apoio: PIVIC Mackenzie**

### RESUMO

O rápido crescimento descontrolado dos aglomerados urbanos, principalmente em várzeas e vales, torna as enchentes mais frequentes, provocando grandes perdas materiais e imateriais. Para mitigar seus efeitos, têm-se proposto diversas intervenções – por exemplo, reservatórios de retenção.

Tais reservatórios são projetados pelo processo de cálculo estimativo denominado “routing numérico de reservatório”, com cálculos de “tentativa e erro”, conferidos verificando a conservação do volume de água e usando a relação nível d’água x vazão de descarga do reservatório. A versão mais utilizada dessa metodologia é conhecida como “Método de Puls”. Routing significa, em Inglês, “condução por um sistema”, mas se entende, em Hidrologia, como o conjunto de transformações de um hidrograma ao longo de um sistema condutor de água.

No entanto, tais processos de cálculo são iterativos e dispendiosos, consumindo muito tempo de cálculo. Assim, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um programa que efetue o processo de routing de reservatórios de maneira rápida, simples e acurada, na qual as iterações são realizadas de modo automático. Optou-se pelo “Método de Puls”, processo de routing do tipo *lumped* (routing hidrológico), que calcula a vazão de saída em função apenas do tempo.

O programa foi desenvolvido em *Visual Basic for Applications (VBA)* no ambiente da planilha de cálculo Excel-Microsoft®. Para demonstrar a funcionalidade do programa, foi aplicado a um estudo de caso de reservatório existente, o Reservatório do Pacaembu, localizado na cidade de São Paulo. Sua escolha justifica-se pelo seu sucesso e pioneirismo nessa metrópole, resolvendo problemas de drenagem e frequentes inundações.

**Palavras-chave:** Reservatório de retenção. Routing. Método de Puls.

## **ABSTRACT**

The fast and uncontrolled growth of urban centres, mainly in floodplains and valleys, increases the probability of flooding. These events can cause large losses, both material and immaterial. To mitigate the flooding effects, several interventions have been proposed, such as detention reservoirs.

Reservoir designs are performed by a process of estimate calculation known as “numerical reservoir routing”, based on “trial and error” computation steps verified by water volume conservation and applying the reservoir water level x discharge rate relationship. The most used version of this methodology is the “Puls Method”. Routing means “conduction through a system”, and this word can be understood, in Hydrology, as the combined transformations a hydrograph undergoes in a water conduction system.

However, these processes are interactive, laborious and computation time consuming. So, this research project proposes the development of a program that computes the reservoir routing process in a fast, simple and accurate fashion. The “Puls Method” was chosen – a lumped routing process (hydrologic routing) that computes reservoir discharge flow rate as a function of time.

The program was developed in the Visual Basic for Applications (VBA) computer language, on the Microsoft Excel spreadsheet environment. In order to demonstrate this program functionality, it was applied to the case study of an already existing reservoir, the Pacaembu Reservoir. The choice for this structure, located in São Paulo City West zone, is justified for being a case of success as an urban solution for drainage problems that used to cause frequent and severe inundation.

**Keywords:** Detention reservoir. Routing. Puls Method.

## 1. INTRODUÇÃO

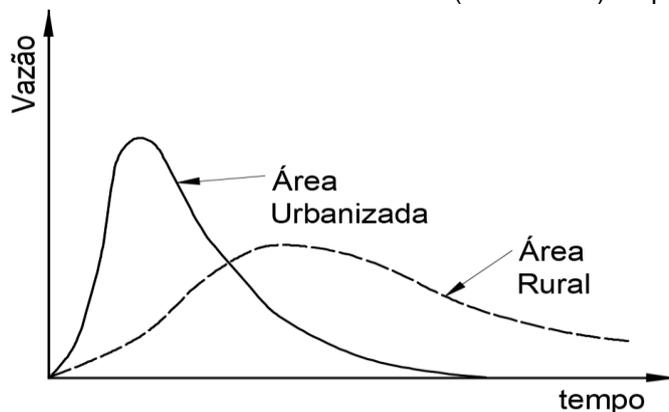
As inundações frequentes em áreas urbanas próximas a rios são um problema de extrema importância na atualidade. Ocorrem pelo aumento da intensidade das chuvas e do volume das cheias devido ao processo de expansão urbana na maior parte das grandes cidades e metrópoles, que se intensifica sem uma distribuição adequada da população e de suas atividades, acarretando aumento da impermeabilização do solo. Tais casos são mais comuns nas sociedades em rápida expansão urbana (países em desenvolvimento) (BRAGA, 1994, apud CANHOLI, 2014). Por causa da perda de qualidade de vida em grandes centros urbanos causadas pelas inundações, soluções vêm sendo propostas e experimentadas por órgãos municipais e estaduais para diminuir esses problemas que a causam.

Segundo Canholi (2014), a concepção “higienista” adotada anteriormente objetivava a aceleração do escoamento para jusante de uma área que estivesse sujeita a inundações, recorrendo para tanto ao aumento das velocidades e vazões nos canais e córregos receptores. Assim, aquela área ficaria “higienizada” com a supressão das inundações e aproveitável para diversos usos. Ocorria, na verdade, a transferência espacial do problema, pois aquelas medidas sempre tendem a levar as inundações para jusante do trecho em que houve a agilização do fluxo. Atualmente, a vertente “conservacionista” busca manter o escoamento pluvial por mais tempo próximo ao local da precipitação (também denominado “fonte” ou “origem” do escoamento superficial) – ideia oposta às políticas anteriormente adotadas de gestão de inundações.

Um desgovernado processo de urbanização acarreta mudanças importantes nas bacias hidrográficas e em processos hidrológicos locais. A retirada da vegetação ciliar de áreas de várzea e a impermeabilização dos solos urbanos, por exemplo, foram alguns fatores responsáveis por aquele fenômeno de aceleração do escoamento descrito acima (por CANHOLI, 2014), culminando em maiores picos de cheia. Outro problema das regiões densamente urbanizadas, conhecido como fenômeno das “ilhas de calor”, é a concentração do calor em regiões específicas onde se concentram fontes geradoras de calor (indústrias, usinas termoelétricas, veículos queimando combustível) e falta vegetação para aumentar a inércia térmica, formando, nos momentos mais quentes do dia, curvas de isotermas que mostram uma “topografia” que se assemelha a ilhas ou montanhas num mapa topográfico. Esse fenômeno é tão mais comum quanto maior a substituição de áreas verdes por superfícies construídas ou pavimentadas, causando, nos momentos de maior diferencial térmico entre uma parcela da superfície e outra (cujos coeficientes de albedo podem ser muito diferentes) chuvas convectivas, com a precipitação de grandes volumes de água em pouco tempo. Estes, após precipitados, são conduzidos majoritariamente por sobre a

superfície (escoamento superficial), dada a redução da infiltração causada pela impermeabilização do solo.

Figura 1 – Hidrogramas efluentes de uma bacia em estado rural (ou silvestre) e após sua urbanização



Fonte: Autor.

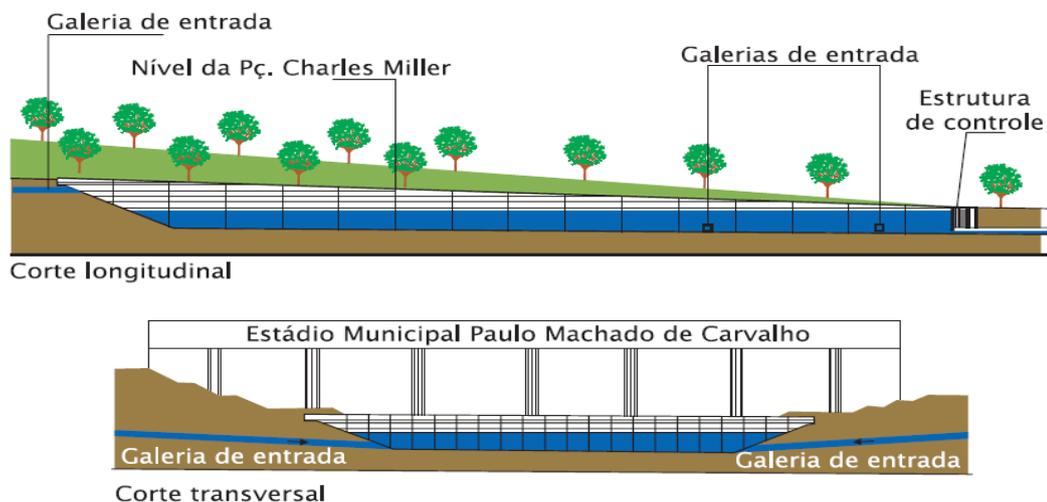
A gestão do problema de cheias fluviais é extremamente importante na atualidade; contudo, algumas civilizações antigas já realizavam o estudo e a aplicação de métodos para tratar desses transtornos. Segundo FENDRICH (2002, apud FRANCO, 2004), na Babilônia antiga já existiam medidas de controle de enchentes para desviar a água excedente da bacia do Rio Eufrates para depressões do deserto árabe. No século XV, na Alemanha, França e Rússia, a construção de reservatórios de retenção já era realizada para a prevenção de inundações. No Brasil, os primeiros reservatórios de cheia foram construídos em Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais, no ano de 1953 (NASCIMENTO E BAPTISTA, 1997, apud FRANCO, 2004). A cidade de São Paulo tem se destacado recentemente na implantação de diversas bacias de retenção. Um exemplo pioneiro na cidade de São Paulo é o reservatório do Pacaembu (CANHOLI, 1994, apud FRANCO, 2004).

Uma solução técnica para o controle de cheias urbanas, entre outras existentes, é a já convencional construção de um reservatório de retenção no exutório de alguma bacia hidrográfica visando amortecer picos de cheias dela efluentes. Tal medida estrutural pode ter custo elevado e deve ser avaliada conjuntamente a diversos fatores, tais como transtornos provocados no local de construção (perturbações do trânsito e de atividades comerciais e industriais); interferências com obras já realizadas (tais como pontes e travessias); impactos ambientais e viabilidade econômica – comparados com os de outras alternativas, que podem até ser não estruturais (CANHOLI, 2014).

As bacias de retenção possuem quatro funções principais (BAPTISTA, NASCIMENTO e BARRAUD, 2005, apud Herculino, 2008 e CANHOLI, 2005, apud HERCULINO, 2008), a saber:

- a) Controle de inundações pelo amortecimento de cheias;
- b) Eventual redução de volumes de escoamento superficial, nos casos de bacias de infiltração – que possuem fundo com retenção infiltrante;
- c) Redução da propagação da poluição difusa de origem pluvial em contexto urbano – promovendo a retenção e posterior remoção de sólidos que foram transportados pela cheia para destinação adequada;
- d) Mitigação dos efeitos da impermeabilização do solo – viabilizando, então, a implementação de certos empreendimentos.

Figura 2 – Concepção geral do reservatório do Pacaembu (CANHOLI, 2014).



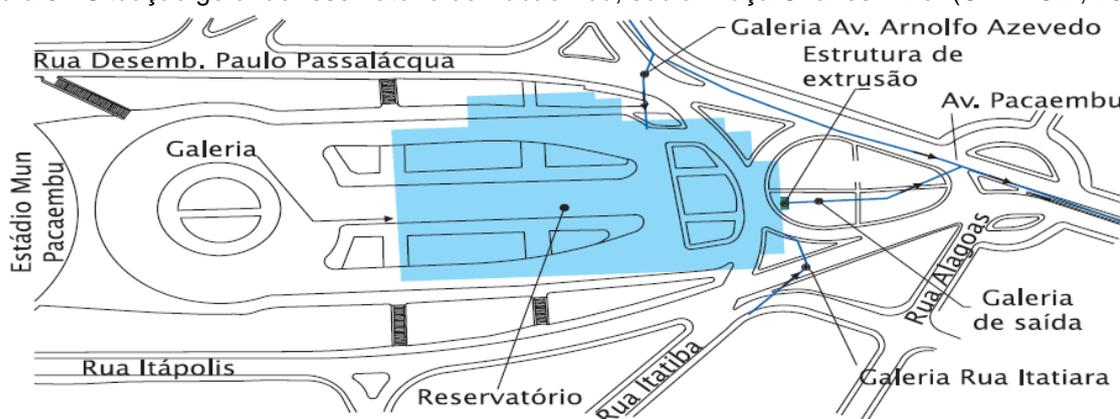
Fonte: Canholi (2014).

É fundamental ressaltar a importância de realizar um estudo urbanístico para cada reservatório que se pretenda construir, para compatibilizar suas características com o plano urbanístico da região onde estará inserido. Existem propostas adequadas para cada caso, de modo que o reservatório de detenção possa se adequar a situações específicas. Pode-se implantar áreas de lazer e proteção ambiental, equipamentos urbanos (praças para múltiplas finalidades, como no caso do reservatório do Pacaembu), melhoria na qualidade das águas coletadas e recarga de aquíferos. Todas estas medidas podem colaborar para reduzir, entre outras coisas, a perda de bens materiais e patrimônios públicos e privados, pois a construção de áreas de lazer ou de proteção ambiental também evita a construção de mais edifícios, estacionamento e vias para tráfego de veículos, além de “preservar as condições naturais ou originais das enchentes locais, como exigido por lei em diversos Estados nos EUA (impacto zero)” – e reabilitar sistemas pré-existent (CANHOLI, 2014).

Contudo, um mau planejamento do reservatório pode acarretar custos maiores de investimento, muitas vezes indiretos (indenizações por desapropriação e interrupção do tráfego local), custos maiores de manutenção (equipamentos, reparo, limpezas devidas ao

assoreamento) e desvalorização da região devido a os córregos afluentes serem utilizados como condutores de esgoto a céu aberto – provocando, assim, odores indesejáveis e proliferação de insetos ratos e outros vetores de doença.

Figura 3 - Situação geral do reservatório do Pacaembu, sob a Praça Charles Miller (CANHOLI, 2014).

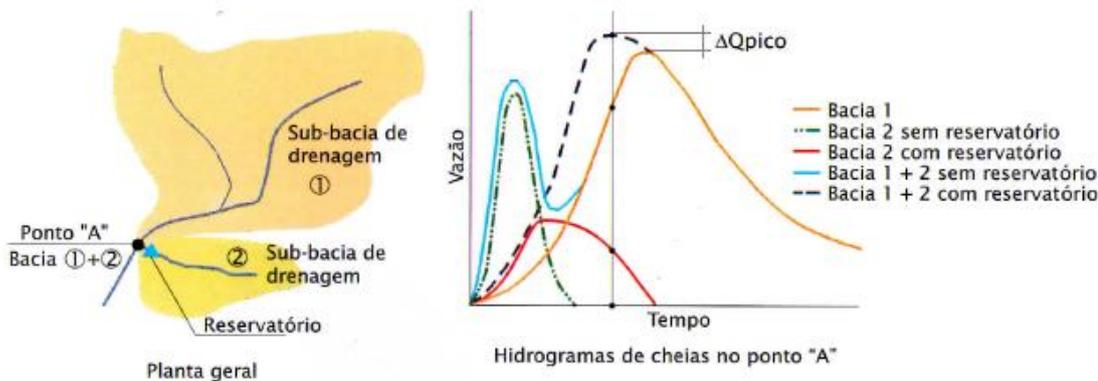


Fonte: Canholi (2014).

A adequação dos condutos existentes para o aumento de vazão provocado pela impermeabilização do solo apresenta maiores custos em relação à alternativa da utilização de reservatórios de retenção. Segundo Tucci (2003), "... a irracionalidade dos projetos leva a custos insustentáveis, podendo chegar a ser dez vezes maior do que o custo de amortecer o pico dos hidrogramas e diminuir a vazão máxima para jusante através de uma retenção" (TUCCI, 2003, apud HERCULINO, 2008).

Apesar de a implantação de um reservatório de retenção ser uma solução eficiente a curto prazo, deve-se atentar ao problema de sincronismo de picos de cheia em bacias próximas. Por exemplo, a redução da vazão de pico à saída de determinada sub-bacia gerada pela construção de um reservatório de retenção pode até causar o agravamento de picos de cheia a jusante na bacia hidrográfica em que a sub-bacia está inserida, como ilustra a Figura 4 (CANHOLI, 2014; FCTH, 1999, apud HERCULINO, 2008).

Figura 4 – Ampliação do pico de cheia no exutório de uma bacia causada por simultaneidade de picos devida à ação de um reservatório de retenção numa sub-bacia (adaptada de CANHOLI, 2014).



Fonte: Canholi (2014).

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

No dimensionamento de um reservatório de detenção, é imprescindível a estimativa preliminar do seu volume. Contudo, após essa estimativa – feita por tentativas – juntamente com a pesquisa por alternativas para a escolha das estruturas extravasoras, é necessário realizar o processo de routing para a conferência do funcionamento do reservatório. A palavra “routing”, de origem inglesa, não possui uma tradução técnica perfeita para o português e, nesta área de conhecimento, significa, ao pé da letra, “condução ao longo de um sistema”. Pode ser entendida como o processo numérico que determina espacialmente e no tempo as transformações no hidrograma de vazões à medida que se propaga ao longo de um sistema condutor de água (CHIN, 2000 apud TOMAZ, 2011).

Há diversos tipos de reservatórios de detenção, podendo ser on-line (ou seja, no percurso do talvegue) ou off-line (fora da calha do rio). Existem reservatórios abertos e fechados, sendo que a escolha do tipo a adotar deve ser feita de acordo com solicitações de projeto. As estruturas extravasoras (orifícios, vertedores, canalizações de saída, etc.) também são características determinantes do funcionamento do reservatório, pois orientam seu planejamento e seu desenvolvimento (inclusive no processo de avaliação numérica do routing da enchente), sendo que o completo conhecimento do seu funcionamento deve, ainda, servir para nortear o modo de operação durante o evento chuvoso. Para alguns reservatórios, é necessário o uso de bombas ou comportas para escoamento de água acumulada – quando seu volume fica total ou parcialmente abaixo da linha de topo da margem do rio. Existem, também, casos de reservatórios com variações na geometria da superfície de água em função do seu nível, geralmente causadas por características da topografia do local destinado à sua construção (ver CANHOLI, 2014).

Uma vez escolhido como solução do problema um reservatório de detenção, conhecido popularmente como piscinão, faz-se necessário o estudo detalhado do caso e um correto dimensionamento da obra para garantir sua funcionalidade. Existem processos de cálculo de reservatório de detenção que são populares – em geral, métodos iterativos, tais como o método de Muskingum e o método modificado de Puls, elaborado em 1928 (CHIN, 2000, apud TOMAZ, 2011).

Há dois tipos de modelos numéricos de routing em reservatórios em relação à distribuição espacial. No modelo denominado lumped routing (routing hidrológico), calcula-se a vazão de saída em função do tempo, em apenas uma seção transversal ao longo do curso d’água. Noutro modelo, distributed routing (routing hidráulico, mais usado para trecho de rio), calcula-se simultaneamente a vazão de saída em função do tempo em diversas seções transversais ao longo do curso d’água. Modelos numéricos de routing do tipo

lumped, tais como o método de Puls (inclusive o método modificado) e o método de Muskingum, são baseados no princípio da conservação de massa, que requer que a diferença entre as vazões de entrada e de saída sejam iguais à variação de volume de armazenamento do reservatório no tempo. Modelos numéricos de routing do tipo distributed, tais como o *kinematic wave model* e o método de Muskingum-Cunge, conseguem descrever precisamente o processo de routing em cursos d'água instáveis retratando as variações de vazão, velocidade e profundidade no espaço, expressando o evento como função de tempo e espaço (FREAD, 1992).

Segundo McCuen (1998), um método matemático (referindo-se a métodos de lumped routing, tais como o método de Puls ou *level-pool reservoir routing*) é geralmente utilizado para simular routing quando se está a verificar as características do reservatório de detenção ou os efeitos da bacia hidrográfica em que esse está inserido sobre ele mesmo. Em alguns desses casos, já existe o reservatório e deseja-se verificar as estruturas de saída para diferentes circunstâncias (períodos de retorno, características de cobertura e tipo de solo da bacia, etc.); em outros, usa-se tal estrutura de modelo para se estudar os dispositivos de saídas, tais como orifícios e vertedores. Para se dimensionar as estruturas de saída, inicialmente, são levantadas hipóteses de vazão-limite de saída que deve ser atendida e, posteriormente, é aplicado o processo de routing para diferentes formas e dimensões do dispositivo de saída até se atingir o valor de descarga desejado. No caso de estruturas de descarga com medidas superdimensionadas, os valores das vazões de saída excedem o da hipótese preliminar limitante e, no caso de estruturas de descarga subdimensionadas, resultam volumes de detenção maiores do que necessário.

### 3. METODOLOGIA

O método a ser utilizado como ferramenta hidráulico-hidrológica de cálculo neste trabalho é o método de Puls, elaborado em 1928 e proveniente da equação da continuidade (ou equação de routing de armazenamento). Conforme Akan (1993, apud TOMAZ, 2011), configura-se originalmente na forma da equação (1):

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

na qual:

I = vazão de entrada (*input flow*)

Q = vazão de saída (*output flow*)

S = volume armazenado (*storage*)

t = tempo

Para desenvolver um método que seja direto, inicialmente se transforma a equação (1) para um intervalo discreto de tempo, entre  $t_1$  e  $t_2$ , da forma mostrada na equação (4).

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}(I_1 + I_2) - \frac{1}{2}(Q_1 + Q_2) = \frac{(S_2 - S_1)}{\Delta t} \quad (2)$$

$$(I_1 + I_2) - (Q_1 + Q_2) = 2 \frac{(S_2)}{\Delta t} - 2 \frac{(S_1)}{\Delta t} \quad (3)$$

$$(I_1 + I_2) + \left(2 \frac{S_1}{\Delta t} - Q_1\right) = \left(2 \frac{S_2}{\Delta t} + Q_2\right) \quad (4)$$

sendo:

$I_1$  = vazão de entrada no início do intervalo de tempo

$I_2$  = vazão de entrada no fim do intervalo de tempo

$Q_1$  = vazão de saída no início do intervalo de tempo

$Q_2$  = vazão de saída no fim do intervalo de tempo

$I_1 + I_2$  = volume armazenado no início do intervalo de tempo

$S_2$  = volume armazenado no fim do intervalo de tempo

$\Delta t = t_2 - t_1$  = duração do intervalo de tempo

São conhecidos para qualquer intervalo os valores de  $I_1$  e  $I_2$ , provenientes da hidrógrafa de entrada, bem como  $Q_1$  e  $S_1$ , desde suas condições de contorno iniciais iguais a zero quando o reservatório ainda se encontra vazio, no início da chuva – portanto, sem se ter ainda uma vazão não nula na hidrógrafa de saída. Num caso possível, mais complexo, poderiam ocorrer duas chuvas consecutivas que impossibilitassem ao reservatório esvaziar-se completamente durante o tempo decorrido entre elas, alterando as condições iniciais de  $S_1$  e  $Q_1$  das acima descritas para as de uma enchente subsequente à primeira. Em tal caso, possível caso se esteja acompanhando um episódio para uma gestão de operação do reservatório, por exemplo, as condições iniciais poderiam ser adaptadas para dar início aos cálculos  $\Delta t$  a  $\Delta t$ . Porém, o mais comum ao se dimensionar um reservatório para projeto é supô-lo inicialmente vazio. Outro caso possível seria um reservatório num curso d'água (*on-line*); então, a vazão normal do rio não permitiria que ficasse vazio em qualquer instante. Assim, ao se iniciar a simulação para o segundo evento de enchente, poder-se-ia adotar por valores iniciais o armazenamento e a vazão que vêm ocorrendo na simulação após a

primeira ou, simplesmente, valores fornecidos como condições iniciais de projeto no curso d'água.

No início dos cálculos de dimensionamento, desconhece-se, no entanto, os valores das variáveis  $Q_2$  e  $S_2$  na equação (4). Portanto, necessita-se de outras equações para solucionar o problema. Pode-se escrever equações para  $S_2$  e  $Q_2$  em função do nível d'água ( $NA$ ) utilizando fórmulas já conhecidas de geometria de reservatórios, para o primeiro caso, e fórmulas de vazões em vertedores, orifícios, condutos, etc., para o segundo caso; assim, a equação inicial ficará dependente de apenas da incógnita  $NA$ , que poderá ser pesquisada a fim de encontrar os valores de  $S_2$  e  $Q_2$  que satisfaçam o valor encontrado para a parcela  $\left(2 \frac{S_2}{\Delta t} + Q_2\right)$  da equação (4).

Para realizar o procedimento proposto, pode-se seguir os seguintes passos da metodologia iterativa (tentativa e erro) aqui proposta, viabilizada pela ferramenta de cálculo a ser criada para estudo por adaptação da metodologia proposta por Akan (1993, apud TOMAZ, 2011) a partir do método de Puls original:

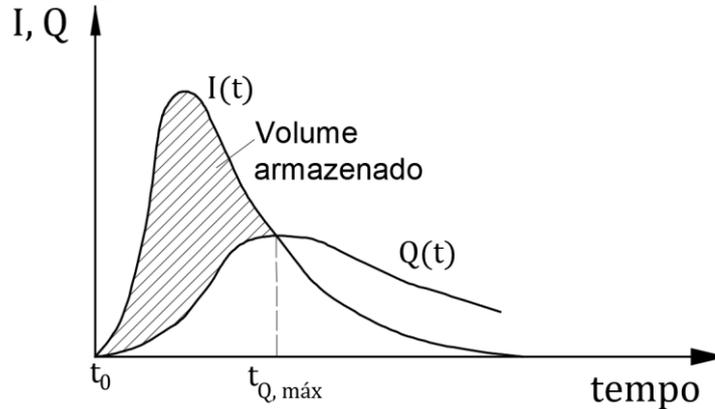
- a)** Calcula-se  $(I_1+I_2)$  a partir do conhecimento da hidrógrafa de entrada e  $\left[2 \left(\frac{S_1}{\Delta t}\right) + Q_1\right]$  com base na informação sobre a condição do reservatório no início de cada intervalo – para o primeiro intervalo de cálculo nas condição de contorno iniciais das variáveis  $Q$  e  $S$  (dados a serem fornecidos); para os outros intervalos, nos valores destas variáveis ao final do intervalo prévio (considerando intervalos de tempo de duração  $\Delta t$  constante, previamente selecionada);
- b)** Calcula-se  $\left[2 \left(\frac{S_2}{\Delta t}\right) + Q_2\right]$  com a equação (4);
- c)** Obtém-se  $Q_2$  e  $S_2$ , a partir de fórmulas que devem conhecidas (características geométricas do reservatório e das estruturas de descarga), pesquisando um valor de  $NA$  que satisfaça o valor de  $\left[2 \left(\frac{S_2}{\Delta t}\right) + Q_2\right]$  obtido no passo (2), acima;
- d)** Para o passo seguinte, calcula-se  $\left[2 \left(\frac{S_2}{\Delta t}\right) - Q_2\right]$  subtraindo  $2Q_2$  de  $\left[2 \left(\frac{S_2}{\Delta t}\right) + Q_2\right]$  e volta-se para a etapa (3). Enfatiza-se que o valor  $\left[2 \left(\frac{S_2}{\Delta t}\right) - Q_2\right]$  calculado para qualquer intervalo será  $\left[2 \left(\frac{S_1}{\Delta t}\right) + Q_1\right]$  para o próximo intervalo;
- e)** Repete-se o mesmo procedimento para cada intervalo até que este método de *routing* tenha atingido o final do hidrograma de saída ou, pelo menos, um intervalo ao longo do seu desenvolvimento que permita cobrir parte suficiente da duração da cheia para permitir fechar o dimensionamento para projeto.

A partir da tabela desenvolvida passo a passo pelo programa de *routing*, desenha-se o gráfico “hidrógrafas afluente e efluente”, sendo ele a resposta gráfica do problema

resolvido pela ferramenta de *routing* proposta. Na tabela, poderão ser encontradas as seguintes informações:

- a) Volume máximo atingido no reservatório durante o evento;
- b) Instante em que ocorrem tanto a vazão de saída máxima quanto o volume máximo ou, simplesmente,  $t_{Qmáx}$ ;
- c) Vazão máxima de saída;
- d) Nível d'água (NA) máximo.

Figura 5 – Exemplo de hidrógrafas afluente e efluente.



Fonte: Autor.

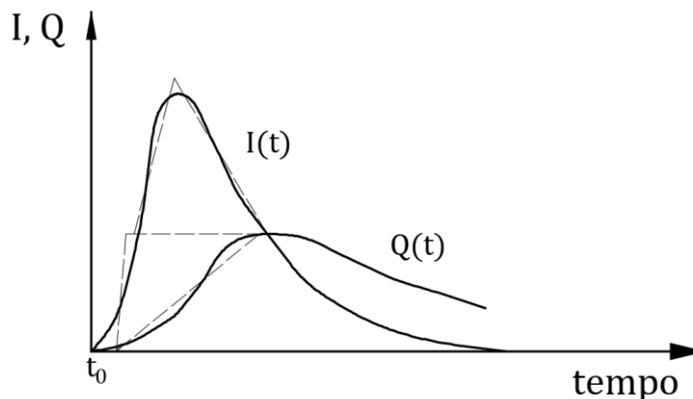
No gráfico das hidrógrafas afluente e efluente, pode-se identificar o volume máximo atingido pelo reservatório aplicando uma integração gráfica de vazões no tempo, por diferença entre a integral das vazões de entrada e a das vazões de saída. Esse volume pode então ser avaliado, com esse artifício gráfico, como assemelhado numericamente à área entre as curvas afluente e efluente entre  $t = t_0$  e  $t = t_{Qmáx}$  (lembrando que, neste último instante, as vazões das curvas devem coincidir). Portanto, pode-se mostrar (e até “planimetrar”) graficamente o que seria a integral, representada na equação (5), que deve ser o Volume de Projeto do reservatório para promover o amortecimento de onda de enchente visto na Figura 5.

$$Volume = \int_{t_0}^{t_{Q\ max}} Q(t)_{afluente} \cdot dt - \int_{t_0}^{t_{Q\ max}} Q(t)_{efluente} \cdot dt \quad (5)$$

Visando facilitar o processo de determinação desse volume, um método amplamente utilizado na prática, pela rapidez e a acurácia que pode atingir, é aproximar a diferença de áreas que representa tal volume (desejado para que o reservatório exerça o amortecimento requerido) pela soma das áreas de dois triângulos de bases horizontais à mesma altura, um com vértice para cima e outro com vértice para baixo (Figura 6). É importante, no entanto, que se consiga uma “compensação” entre ‘áreas para mais’ e ‘áreas para menos’ considerando, de um lado, a área somada dos dois triângulos e, do outro, a área da figura

de contorno curvo que representa o volume de projeto do reservatório. Mede-se, para cada triângulo, a base e altura, cada uma paralela, respectivamente, a um dos eixos (o das abscissas e o das ordenadas) no gráfico, para garantir a homogeneidade dimensional das variáveis e do resultado graficamente obtido para o volume de projeto – vide Figura 6:

Figura 6 – Obtenção do volume numérico do reservatório pelo método gráfico dos triângulos.



Fonte: Autor.

O instante em que ocorrem a vazão e o volume máximos é aquele em que as curvas de vazão afluente e efluente coincidem no gráfico, denominado  $t_{Qmáx}$ . Isto ocorre porque antes dele a vazão de entrada é maior que a de saída e, portanto, o volume do reservatório vai crescendo – e, após ele, a vazão de saída se torna maior que a vazão de entrada, fazendo o  $NA$  e, por conseguinte, o volume do reservatório decrescerem. Portanto, ocorre cruzamento das curvas no ponto de máximo local da variável  $Q(t)$  (MCCUEN, 1998). Formalizando isto matematicamente, pode-se fazer a seguinte pesquisa de máximos e mínimos para provar que o volume máximo ocorre em  $t_{Qmáx}$ :

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \int Q(t)_{afluente} \cdot dt - \int Q(t)_{efluente} \cdot dt \right) = 0 \quad (7)$$

$$Q(t)_{afluente} - Q(t)_{efluente} = 0 \quad (8)$$

$$Q(t)_{afluente} = Q(t)_{efluente} \quad (9)$$

Por fim, a vazão máxima efluente é o pico da hidrógrafa de saída encontrada no gráfico no instante  $t = t_{Q,máx}$ . A vazão máxima de saída acontece nesse momento porque ocorre em conjunto com o volume máximo, visto que quanto maior for o nível d'água maiores serão o volume do reservatório e a vazão de saída,  $Q$ . Com efeito, sabe-se que a

vazão das estruturas extravasoras é função da carga hidráulica sobre elas e que esta é função do nível d'água; portanto, os instantes em que ocorrem a vazão máxima efluente e o volume máximo devem coincidir. É importante ressaltar, aqui, que, ao final do processo numérico, pode-se averiguar se o pico da hidrógrafa de saída ocorre bem no ponto de cruzamento das hidrógrafas de entrada e de saída – verificando-se, assim, que o processo de cálculo foi realizado corretamente e está de acordo com as premissas hidráulicas e hidrológicas envolvidas. A ocorrência de eventuais erros numéricos tanto por discretização excessiva quanto, por outro lado, por discretização grosseira demais, pode também ser detectada se tal verificação não mostrar coincidência desses dois pontos.

Também se pode verificar a consistência do processo de *routing* numérico comparando a soma da série de valores de vazão de entrada às dos de saída. O volume total de entrada e o de saída devem ser, cada um, aproximadamente igual à soma das vazões do respectivo hidrograma,  $\Delta t$  a  $\Delta t$ , multiplicada pelo valor do incremento de tempo,  $\Delta t$ . O resultado dessa operação de integração numérica (soma de Riemann) de volume feito para as vazões de entrada e aquele feito para as de saída devem ser iguais entre si, por conta do princípio de conservação de massa. Para maior simplicidade ainda, já que o incremento de tempo é igual nos dois termos da igualdade, pode-se suprimi-lo de ambos os lados e comparar, simplesmente, somatórias de vazões. Quando o processo de cálculo de *routing* é interrompido antes de a vazão de saída se tornar zero, mas sendo já relativamente baixo, a somatória das vazões de saída poderá ser ligeiramente menor que a das vazões de entrada – apontando para a necessidade de se verificar a relações entre ambas com critério, sendo que uma interrupção precoce do processo de *routing* numérico pode criar uma desconfiança desnecessária na consistências do cálculo (MCCUEN, 1998).

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

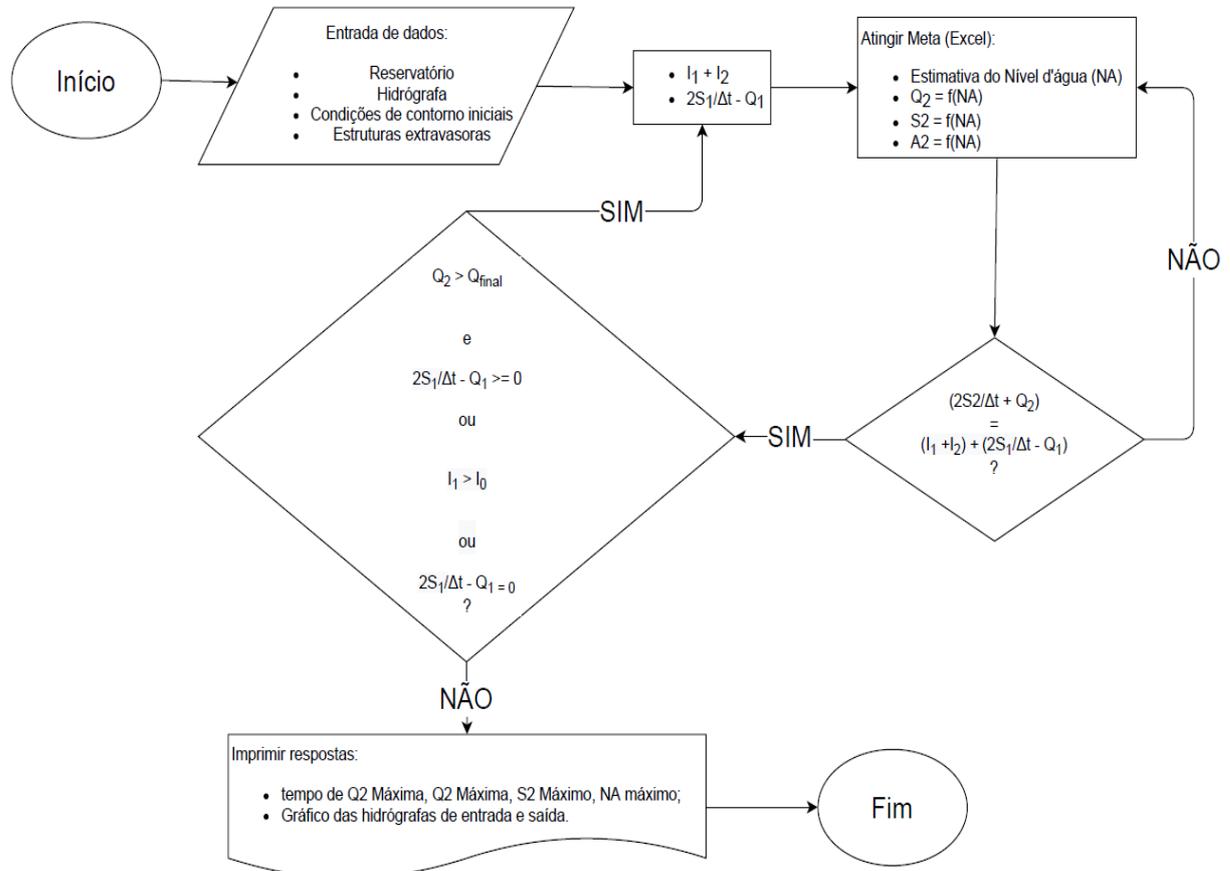
O programa de cálculo foi desenvolvido na linguagem de programação Visual Basic for Applications (VBA), em planilha Excel (*Workbook*) habilitada para macros. O programa é composto por três “Planilhas” (*Sheets*), a saber, Reservatório, Extravasores e Routing – onde se executam os cálculos – e um formulário (*Userform*) composto por cinco abas. Os dados são inseridos dentro do “Formulário” e as respostas são fornecidas também dentro dele. A seguir, fornecem-se os nomes, a descrição e as funções das cinco abas do formulário:

**a)** Aba Reservatório: Entrada de dados e escolha de modelos geométricos para reservatório analisado. É possível inserir valores limitantes de projeto para permitir verificar se o reservatório satisfaz requisitos exigidos de projeto para dada enchente ensaiada. A função cota x volume pode ser ajustada e disponibilizada para representar qualquer geometria de reservatório;

- b) Aba Hidrógrafa:** Nela é possível adicionar, deletar e editar a série temporal de vazões representando a hidrógrafa de entrada. Também é nela que se especifica o intervalo de tempo  $\Delta t$  e as condições iniciais da simulação (vazão inicial, volume inicial, etc.);
- c) Aba Extravadores:** Nesta aba, pode-se informar o tipo de dispositivo de descarga escolhendo-se algum modelo disponível e adicionar os respectivos parâmetros da fórmula representando sua função matemática “curva cota x descarga”;
- d) Aba Resultados:** Os valores críticos – respostas do processo de routing – são nela apresentados (vazão de pico, tempo crítico, volume máximo, etc.). Nessa aba do formulário, é possível conhecer outros valores além dos críticos, podendo-se também visualizar um gráfico com as hidrógrafas de entrada e saída e o resultado de aprovação do modelo simulado. Localiza-se aqui o botão "Routing", que inicia o processo de cálculo após a inserção dos dados;
- e) Aba Opções:** Nela estão as opções de alterar unidades das variáveis, resetar cálculos e dados, salvar a planilha, abrir outras planilhas e imprimir a tabela de cálculo e o gráfico.

As iterações realizadas pelo programa são demonstradas de forma simplificadas no diagrama de blocos da Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de blocos simplificado do processo de routing calculado pelo programa

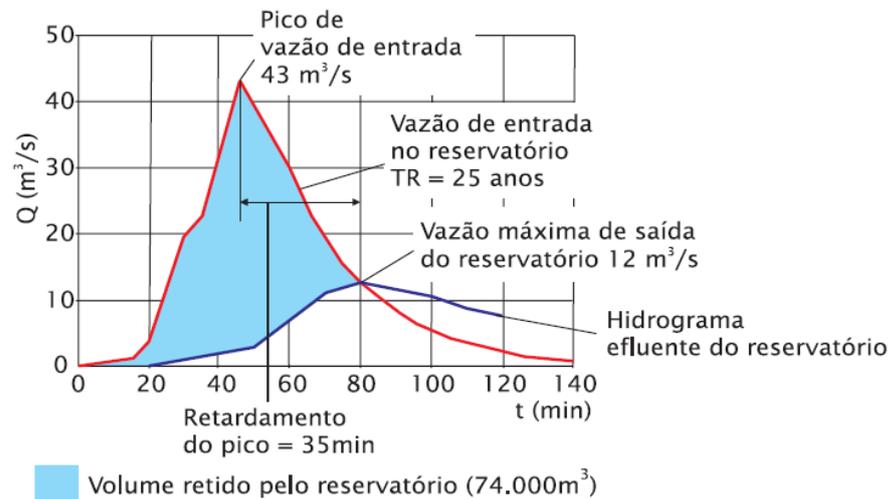


O estudo de caso é o reservatório do Pacaembu, na Praça Charles Müller, em frente ao Estádio Municipal Paulo Machado de Carvalho – conhecido popularmente como Estádio do Pacaembu (devido ao bairro em que está). O reservatório, construído entre 1992 e 1995, foi proposto pela Prefeitura de São Paulo e executado de acordo com o projeto de Aluísio Pardo Canholi, projetista da Themag Engenharia (PORTO; ZAHED FILHO; GARCIA, 2008).

O motivo da construção se deve à necessidade de amortecer as cheias na galeria do Ribeirão Pacaembu, canalizado abaixo da avenida homônima, considerando uma vazão máxima de  $13 \text{ m}^3/\text{s}$ , proveniente de uma área contribuinte de 2,2 ha. Porém, a praça contribui com vazões muito maiores. No reservatório confluem três grandes galerias, a saber, a galeria do estádio, a da Av. Arnolfo Azevedo (lado Sumaré) e a da Rua Itatiara (lado Higienópolis). O hidrograma utilizado no projeto tem período de retorno de 25 anos, pico de  $43 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 8) e foi calculado para a chuva crítica de 19 de fevereiro de 1993. O estudo de chuvas que originou o hidrograma unitário usado no cálculo foi realizado entre dezembro de 1992 e março de 1993 (PORTO, ZAHED FILHO, GARCIA, 2008; TOMAZ, 2006) .

O custo da obra foi de 8 milhões de dólares, sendo muito mais viável que a alternativa de escavar um túnel de aproximadamente 3 km entre a Praça Charles Müller e o canal de saneamento, orçado em 35 milhões de dólares (TOMAZ, 2006).

Figura 8 – Gráfico do processo de routing realizado no projeto do reservatório.

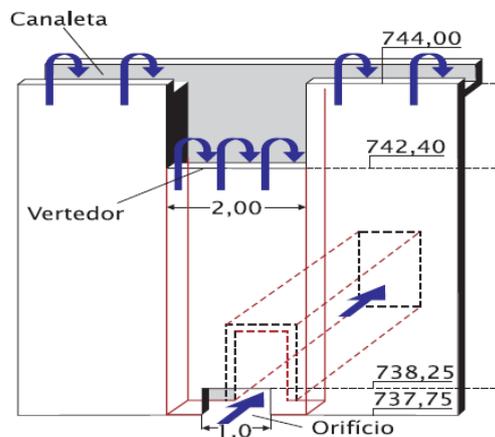


Fonte: Canholi (2014)

A escoamento do reservatório é realizado por orifício retangular no fundo (cota 737,75) com dimensões 1,0 m x 0,5 m. Em caso de extravasão, existe um vertedouro de 2 m de largura na cota 742,40 m (Figura 9). Os coeficientes de descargas considerados para o orifício e o vertedor foram, respectivamente,  $C_d = 0,62$  e  $C_w = 2,4$ . A altura útil do reservatório é de 5,6 m e corresponde a um volume de  $74.000 \text{ m}^3$ . O reservatório foi modelado com uma

curva cota x volume na simulação desta pesquisa. O hidrograma de entrada foi o mesmo utilizado por Canholi no dimensionamento do reservatório (Figura 8).

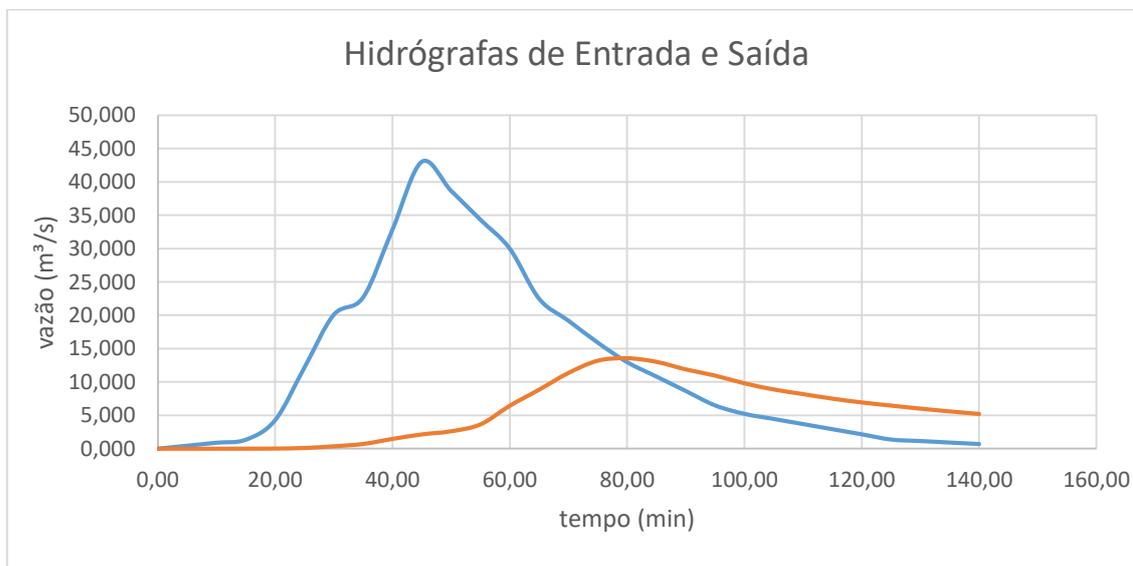
Figura 9 – Vista esquemática das estruturas extravasoras do Reservatório do Pacaembu.



Fonte: Canholi (2014).

A routing do reservatório resultou um hidrograma de saída amortecido de  $13,537 \text{ m}^3/\text{s}$  no tempo 80 minutos. Pode-se verificar na Figura 10 que o pico de hidrograma de saída ocorre no instante em que os hidrogramas se interceptam, comprovando que o modelo foi corretamente discretizado. Quando a simulação se estende até que a vazão de saída ( $Q_2$ ) seja  $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ , as integrais numéricas dos hidrogramas são aproximadamente iguais  $107929,61 \text{ m}^3$  (hidrograma de entrada) e  $107762,00 \text{ m}^3$  (hidrograma de saída), respeitando o princípio da conservação da massa. O volume calculado através do método dos triângulos resultou em  $73557 \text{ m}^3$ , sendo satisfatoriamente próximo ao volume calculado e possuindo erro relativo de 0,60%. A Tabela 1 apresenta o processo de cálculo realizado pelo programa.

Figura 10 – Resultado gráfico do processo de routing calculado pelo programa proposto.



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Simulação do amortecimento de cheia no reservatório do Pacaembu pelo programa.

Índice	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	NA	Q <sub>2</sub> (NA)	S <sub>2</sub> (NA)
-	min	min	m <sup>3</sup> /s	m	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup>
1	0,00	5,00	0,000	0,00	0,000	67,21
2	5,00	10,00	0,449	0,01	0,002	268,78
3	10,00	15,00	0,897	0,02	0,007	603,94
4	15,00	20,00	1,346	0,05	0,025	1443,24
5	20,00	25,00	4,281	0,13	0,112	3892,12
6	25,00	30,00	12,181	0,29	0,366	8659,86
7	30,00	35,00	20,081	0,44	0,709	14911,99
8	35,00	40,00	22,675	1,39	1,463	22913,09
9	40,00	45,00	32,838	2,67	2,136	33748,86
10	45,00	50,00	43,000	3,87	2,613	45285,07
11	50,00	55,00	38,657	4,87	3,643	55292,21
12	55,00	60,00	34,314	5,38	6,430	63424,07
13	60,00	65,00	29,970	5,71	8,832	69001,03
14	65,00	70,00	22,470	6,01	11,336	72223,90
15	70,00	75,00	19,184	6,21	13,166	73810,65
16	75,00	80,00	15,897	6,25	13,537	74000,00
17	80,00	85,00	12,971	6,19	12,996	73722,66
18	85,00	90,00	10,809	6,07	11,865	72911,99
19	90,00	95,00	8,647	5,97	10,940	71761,41
20	95,00	100,00	6,486	5,83	9,784	70409,81
21	100,00	105,00	5,227	5,72	8,866	69065,34
22	105,00	110,00	4,459	5,63	8,169	67732,57
23	110,00	115,00	3,691	5,53	7,490	66375,93
24	115,00	120,00	2,923	5,45	6,925	64975,57
25	120,00	125,00	2,155	5,39	6,453	63498,49
26	125,00	130,00	1,375	5,32	5,997	62009,86
27	130,00	135,00	1,151	5,25	5,580	60584,84
28	135,00	140,00	0,927	5,18	5,197	59212,67
29	140,00	145,00	0,702	5,09	4,645	57841,76

Fonte: Autor.

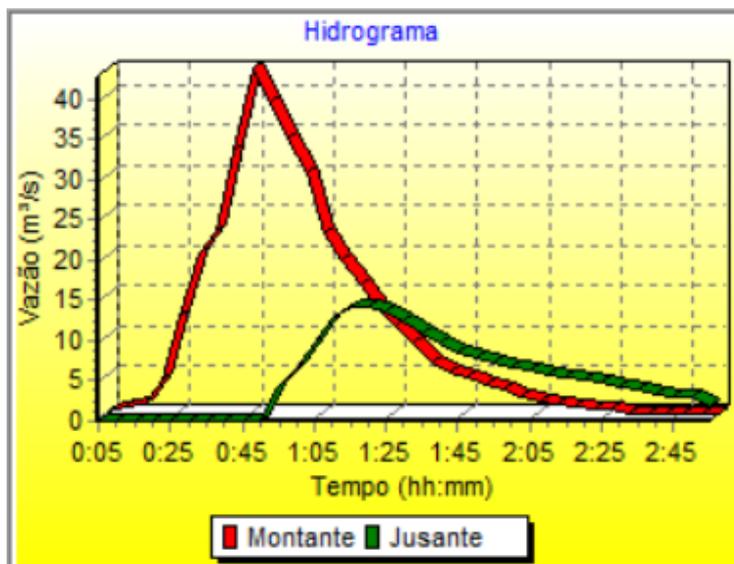
Compararam-se os resultados encontrados com os resultados obtidos em outro programa de simulação hidráulica-hidrológica, o ABC6, desenvolvido na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP). Os resultados e os erros relativos do programa proposto em relação ao projeto original e ao ABC6 são apresentados na Tabela 2. A Figura 11 apresenta os hidrogramas calculados pelo ABC6.

Tabela 2 – Resultado gráfico do processo de routing calculado pelo programa proposto.

	Programa proposto	Projeto (Themag)	Erro (%)	ABC6 (%)	Erro (%)
Q <sub>2</sub> máxima (m <sup>3</sup> /s)	13,537	13	4,13%	14,308	5,70%
t <sub>Q2</sub> (minutos)	80	80	0,00%	80	0,00%
Volume máximo (m <sup>3</sup> )	74000	74000	0,00%	75000	1,35%

Fonte: Canholi (2014), Tomaz (2006) e ABC6

Figura 11 – Resultado gráfico do processo de routing calculado pelo ABC6.



Fonte: Autor.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos fenômenos hidrológicos e a solução de problemas provenientes destes são de extrema importância para a sociedade, pois a expansão acelerada dos centros urbanos tem provocado maiores vazões em cursos d'água e inúmeras enchentes. Assim, o programa proposto se apresenta como mais uma ferramenta na solução de problemas desta natureza, apresentando como diferencial a facilidade de utilização, pois utiliza apenas dados de entrada básicos de projeto e oferece opções diversificadas de modelos hidráulicos para simulação de reservatórios e estruturas extravasoras.

O programa desenvolvido apresentou resultados coerentes, como foi mostrado aqui, tanto nas conferências realizadas, quanto nas comparações com o projeto original e com outro programa da área, o ABC6. A rapidez com que o programa realiza o cálculo justifica a sua utilização como ferramenta de projeto, auxiliando na tomada de decisões de engenheiros. Também é possível utilizá-lo como material didático, pois seu dinamismo possibilita a apresentação de diversos exemplos e estudos de casos em sala de aula.

Deve-se notar, no entanto, que se trata apenas de uma ferramenta de cálculo. Portanto, conhecimentos de Hidráulica e Hidrologia, utilização de dados corretos e avaliação crítica do projeto continuam sendo imprescindíveis para o uso adequado do programa.

Algumas sugestões para trabalhos futuros são as adições de novos modelos de estruturas extravasoras e reservatórios, que ampliarão as possibilidades de uso do programa, e a implantação de um algoritmo genético no programa, que poderá otimizar o projeto do reservatório e apresentar as melhores alternativas.

**Agradecimentos:** Prof. Dr. André Luiz de Lima Reda

## 6. REFERÊNCIAS

CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384 p.

FRANCO, Edu José. **Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional**. 2004. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia da UFPR, UFPR, Curitiba, 2004. Disponível em: <[https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/085-Edu\\_Jose\\_Franco.pdf](https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/085-Edu_Jose_Franco.pdf)>. Acesso em: 21 dez. 2016.

FREAD, D. L.. Flow Routing. In: MAIDMENT, David R.. **Handbook of Hydrology**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1992. Cap. 10.

HERCULINO, Felipe Paolucci. **Utilização de reservatórios de retenção em condomínios: Avaliação dos métodos atuais**. 2008. 142 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2008..

MCCUEN, Richard H.. Reservoir Routing. In: MCCUEN, Richard H.. **Hydrologic analysis and design**. 2. ed. New Jersey: Pearson Education, 1998. Cap. 11. p. 624-643.

PORTO, Rubem La Laina; ZAHED FILHO, Kamel; GARCIA, Luís Antonio Villaça de. **Medidas para o Controle de Inundações Urbanas: O caso do "Piscinão" do Pacaembu**. São Paulo, 2008. 61 slides, color. Disponível em: <[http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id\\_arq=6633](http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=6633)>. Acesso em: 15 maio 2019.

TOMAZ, Plínio. **Piscinão do Pacaembu**. 2006. Disponível em: <<https://www.aceguarulhos.com.br/blog/piscin%C3%A3o-do-pacaembu/>>. Acesso em: 15 maio 2019.

TOMAZ, Plínio. Routing de reservatórios. In: TOMAZ, Plínio. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais**. 2. ed. São Paulo: Navegar Editora, 2011. Cap. 16. p. 454-466.

**Contatos:** matheusdc17@hotmail.com e bruno.pecini@mackenzie.br