

# FACILITANDO O APRENDIZADO DE HIDROLOGIA COM PLANILHA ELETRÔNICA: INTEGRAÇÃO DOCENTE-MONITOR-ALUNO NO ENSINO DA CONVOLUÇÃO DE HIDROGRAMAS

André Luiz de Lima Reda <sup>1</sup>; Jayme Pinto Ortiz <sup>2</sup>; Alexander Lyle Federolf <sup>3</sup>; Roberto Pacheco de Moraes Gois <sup>4</sup>

Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia

Praça Mauá 1

CEP: 09580-900, São Caetano do Sul, SP

<sup>1</sup> andrereda@maua.br

<sup>2</sup> ortiz@maua.br

<sup>3</sup> alexander.lfederolf@ceun.maua.br

<sup>4</sup> roberto.pmgois@ceun.maua.br

**Resumo:** Após o ciclo básico dos cursos de Engenharia brasileiros (dois anos), as disciplinas técnicas contam com os conhecimentos nele adquiridos – mas, eventualmente, podem precisar introduzir, ainda, teoria adicional para seu próprio suporte. Aqui se demonstra a eficiência de apresentar novos conceitos enquanto se soluciona o problema técnico proposto, contando com a capacidade de indução do educando contemporâneo – habituado a empregar informática e absorver conceitos pelo uso. Com planilha de cálculo inteligente incluindo operações matemáticas programadas, pode-se atingir esses dois objetivos economizando tempo. Isto é relevante, sobretudo, para estudantes que preferem tecnologia aplicada a ciências básicas: o novo conceito teórico encontra maior receptividade se absorvido bem quando sua utilidade é demonstrada. Considerando a atual política de reduzir durações de cursos (seguindo tendência européia: graduação em três ou quatro anos), o aproveitamento múltiplo de horas-aulas para ensinar conceitos e práticas de Engenharia (empregadas em estudos e projetos) é crucial para se equilibrar a conta entre conteúdos necessários e carga horária disponível. Ademais, permite ao aluno concentrar mais tempo em entender aspectos físicos do problema – fornecendo, ainda, uma ferramenta para que crie variantes próprias do exercício proposto (depois, pode fixar conceitos solucionando-as sem planilha). O problema hidrológico proposto é definir um hidrograma de enchente por convolução do hidrograma unitário da bacia hidrográfica com uma tormenta de projeto, considerando características locais de infiltração no solo local. A planilha, criada com apoio de monitor e aluno, reduz de três aulas para duas o tempo em classe; apoia, ainda, o preparo de novos exercícios.

**Palavras-chave:** Planilha didática, Agilização do ensino de Engenharia, Hidrograma, Enchentes, Chuva efetiva

## 1. INTRODUÇÃO

As disciplinas básicas dos dois primeiros anos dos cursos de Engenharia no Brasil propõem-se a preparar a infra-estrutura fundamental para o ensino que segue nos outros três. Assim, seu aprendizado é condição para o sucesso do educando no decorrer da formação profissional – inicialmente, no curso de graduação; depois, no estudo continuado ao longo da carreira. No entanto, não raro o estudante mais inclinado à aplicação da tecnologia para fins práticos (a propósito, material humano ideal para a formação de bons engenheiros) – ao

contrário dos que buscam mais a Ciência pura – acha dificuldade em suportar dois anos de necessário ensino de ciências (Matemática, Física, Química, Biologia, etc.) até poder começar a experimentar, mais intensamente, sua aplicação prática desta na Engenharia – o que tende a começar, tradicionalmente, do meio do curso em diante.

Com a crescente dificuldade de manutenção financeira enfrentada por estudantes universitários nos países em desenvolvimento, o problema da falta de motivação prática vem contribuindo mais ainda para afastar acadêmicos do curso. A crescente necessidade da indústria em expansão, demandando mais contingentes de engenheiros de boa formação, alia-se a este problema para causar mais lacunas de pessoal especializado na área. Existe consciência geral nos meios profissionais e de ensino de Engenharia no Brasil de que, neste momento, mais grave do que a falta de energia, matéria prima ou recursos financeiros para o desenvolvimento é carência de pessoal capacitado para profissões técnicas – o “apagão tecnológico” – desde o nível secundário até o universitário.

Com o objetivo de fixar atenção e interesse desse tipo de aluno no curso, “quebrando o gelo” do ensino da ciência pura, é tentativa natural distribuir ao longo dele, em todos os anos do currículo, exercícios de aplicação prática dos tópicos teóricos recém-aprendidos – nos quais é proposto o desafio de empregar o conhecimento da ciência na resolução de problemas práticos realistas, de imediata aplicação no exercício da Engenharia. Estes, porém, podem consumir tempo relevante de aula. Por outro lado, com a tendência internacional de reduzir a duração dos cursos de Engenharia (seguindo corrente atualmente liderada pela Europa, na tentativa de padronizar cursos de graduação em Engenharia em durações entre três e quatro anos), isto se torna ainda mais problemático, pois torna mais difícil alocar tempo em aula para exemplos práticos de aplicação da teoria e das técnicas aprendidas. Em tal conjuntura, são preocupações constantes: a) continuar a garantir ao estudante prática suficiente das teorias e métodos aprendidos e b) fixar o aprendizado recém adquirido, demonstrando sua utilidade, antes que se apague da memória recuperável e do interesse do aluno – apesar do reduzido tempo disponível em classe. Em qual momento, porém, desenvolver exercícios práticos incentivando exatamente os alunos com maior aptidão e vocação para a Engenharia à aplicação da teoria e resolução de problemas? Fixar o educando ao curso e reduzir a evasão dependem em grande parte destes aspectos.

Aqui se procura fornecer uma das respostas possíveis a tais preocupações, provendo um mecanismo para que o educando: a) enfrente a inércia inicial que tende a ocorrer no momento em que retoma o estudo de um assunto, após a aula; b) disponha de um mecanismo prático que pré-estruture o enunciado do problema e deixe bem à mão as ferramentas de solução necessárias (fórmulas, ábacos, rotinas e tabelas de cálculo), economizando tempo, a ser empregado na própria idealização da solução; c) trabalhe partindo de um início preestabelecido pelo docente em aula, num exemplo básico de aplicação, resgatando rapidamente o conhecimento já sedimentado e instrumentalizando, daí, o enfrentamento de problemas mais complexo sobre o mesmo assunto; d) que atraia a atenção do educando para dedicar suas horas extra-aula à prática das técnicas aprendidas – fixando, assim, a teoria.

O ensino da Engenharia por três décadas tem permitido aos autores docentes (primeiro e segundo autores), mais recentemente, com o advento de software comercial específico, preparar e utilizar em aula planilhas de cálculo eletrônicas que também servem ao estudo extra-aula (ver, por exemplo, REDA, 2004; REDA, 2005; REDA, 2006), aplicáveis a cursos de graduação, pós-graduação e especialização.

Neste trabalho, descreve-se e se exemplifica o uso de uma planilha eletrônica que se demonstrou eficiente no apoio à Disciplina Hidráulica e Hidrologia, na introdução a um aspecto de um problema hidrológico que envolve conhecimento de operação matemática ainda não conhecida: estimar um hidrograma de enchente com base no hidrograma unitário (HU) da bacia hidrográfica e numa tormenta de projeto, considerando as características de

infiltração do solo local e empregando o método da convolução matricial do HU com a tormenta – representados, cada um, por um vetor numérico.

A planilha, criada com apoio de monitor e aluno, reduz de três aulas para duas o tempo em classe. Além disto, serve como apoio para o preparo de novos exercícios de cálculo para o estudo dos alunos fora da aula e de novos exercícios a serem propostos para prática e avaliação – provendo um padrão de resposta prontamente calculado por computador.

Esclarece-se então, na seção ‘Aspectos Teóricos’ (a seguir), definições e pontos conceituais necessários para introduzir o assunto e mostrar a utilidade prática da planilha. A seção subsequente, ‘Metodologia’, mostra os procedimentos realizados na planilha para produzir o hidrograma de enchente num projeto de Engenharia de Recursos Hídricos. A seção ‘Exemplo de Aplicação’, por sua vez, demonstra de forma pictórica resultados produzidos do uso-piloto da planilha proposta, em imagens de tela do software Excel acompanhadas de explicações sucintas – já que, em grande parte, as imagens de tela são auto-explicativas. Em ‘Considerações Finais’, são apresentadas conclusões e comentários tecidos em função dos resultados práticos de cálculo e didático-pedagógicos obtidos.

Além de demonstrar a utilidade de planilhas de cálculo no ensino da Engenharia e de exemplificar esta prática com a presente planilha, este artigo tem também o objetivo de fornecer um texto introdutório, conciso mas suficiente, para o estudante de graduação que pretenda iniciar-se no assunto – alternativa prática à literatura pertinente disponível, que tende a ser ou incompleta nos aspectos didático, prático e operacional; ou, talvez, extremamente complexa para o nível requerido pelos cursos de graduação. Complementarmente, esta planilha pode ainda ajudar o engenheiro que necessita recordar o mecanismo deste tipo de operação matemática na Engenharia e, em casos de estudo hidrológico tradicional de enchente, servir como ferramenta de trabalho.

## **2. ASPECTOS TEÓRICOS E METODOLÓGICOS**

As subseções a seguir abordam sucintamente diversos aspectos da Hidrologia necessários para o entendimento dos cálculos e procedimentos empregados no exercício desenvolvido.

Referências básicas para uma leitura complementar no assunto são Pinto (2000), Reda (1985) e Shaw (1988).

Ao mesmo tempo em que os aspectos teóricos vão sendo introduzidos, vai-se construindo o método de cálculo empregado na planilha, culminando na operação matricial de convolução de dois vetores numéricos: o hidrograma unitário da bacia hidrográfica em análise e a tormenta escolhida para representar as condições de projeto.

### **2.1 Enchentes e hidrogramas de enchente**

Enchentes fluviais são um fenômeno definido como o crescimento das vazões volumétricas que cruzam determinada seção transversal de um rio (período de ascensão), passando por um valor máximo (vazão de pico,  $Q_p$ ) e decrescendo, novamente (período de recessão), até um valor característico de tempo seco. A Figura 1 ilustra o registro hipotético de uma enchente fluvial simples, na forma de um “hidrograma de enchente” – gráfico da variação da vazão fluvial,  $Q_{rio}$ , em função do tempo  $t$  – com suas partes componentes. Enchentes ocorrem após a precipitação de considerável tormenta sobre a bacia hidrográfica que contribui com a seção do rio onde se mede essa vazão.

As vazões que passam pelo canal do rio a ele aportam por duas fontes: a contribuição (ou escoamento) superficial,  $Q_{sup}$ , oriunda da enxurrada (escoamento da parte não infiltrada da chuva), e a contribuição subterrânea,  $Q_{sub}$  – ou básica,  $Q_{bás}$  – que aporta via aquífero freático

ao longo das margens, por todo o curso do rio. Em cada instante, o valor da vazão do rio é a soma dessas duas componentes.

Antes do início do período de ascensão, tendo decorrido um tempo considerável desde o último evento de chuva sobre a bacia, a vazão do rio vai decrescendo lentamente, sustentada apenas pela água reservada no aquífero freático – uma reserva constantemente deplecionada pela ausência da recarga, que só haveria se houvesse chovido e infiltrado – existe somente a vazão básica. Este decréscimo paulatino na vazão fluvial é descrito como trecho de “depleção pré-enchente”, e vai até o ponto ‘A’, no gráfico da Figura 1. Daí em diante, passa a haver também a contribuição superficial para a corrente do rio, até o final do período de recessão (ponto ‘C’, no gráfico) – quando termina o escoamento superficial, persistindo então apenas a vazão básica, novamente. Tal trecho do hidrograma é definido como a curva de “depleção pós-enchente”. Como o subsolo da bacia muda muito lentamente no tempo (de forma quase imperceptível na escala de tempo humana), o formato dessa curva corresponde ao da curva de depleção pré-enchente – porém, defasado, pois o valor da vazão em que se inicia é maior (devido à recarga que o subsolo recebeu pela infiltração de parte da chuva causadora desta enchente). Pinto (2000) explica a forma de decaimento exponencial, ao longo do tempo, tipicamente seguida por tal curva.

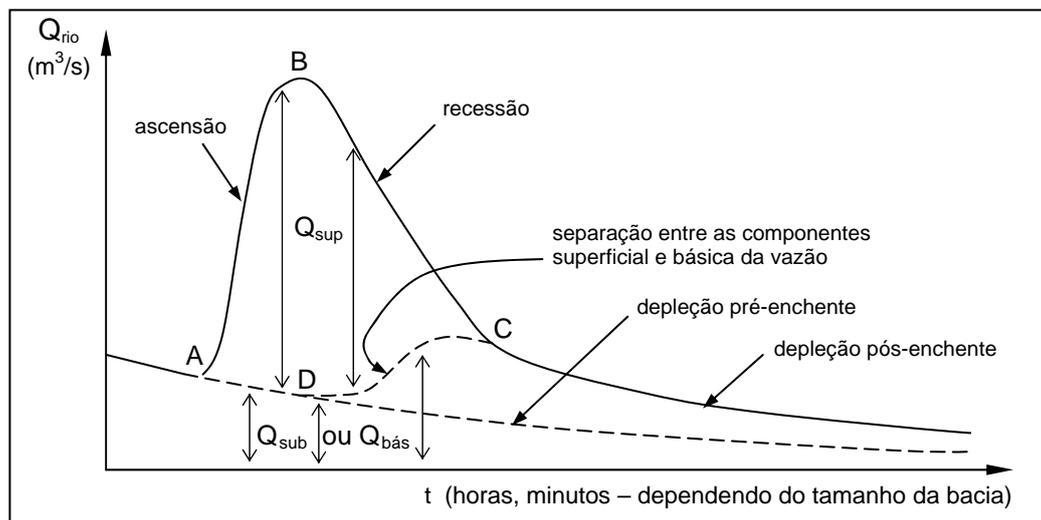


Figura 1 – Hidrograma de uma enchente típica causada por tormenta sobre bacia hidrográfica contribuinte de porte médio e separação entre os escoamentos superficial e básico

O gráfico que representa esse conjunto de transformações no valor da vazão fluvial é denominado “hidrograma de enchente” e é exemplificado na Figura 1. A técnica gráfica de separação entre as vazões superficial e básica é introduzida em Reda (1985) e Pinto (2000). O ponto ‘C’, início da depleção pós-enchente, é identificável como aquele onde se inicia um comportamento exponencial decrescente.

O pico da enchente é denominado ‘B’ e o ponto onde o escoamento básico começa a aumentar se denomina, tradicionalmente, ponto ‘D’ – tido como sendo onde o prolongamento da curva de depleção pré-enchente passa pelo mesmo instante que o pico da enchente.

Uma curva composta surge unindo a linha de separação entre o escoamento superficial e o básico à curva de depleção pós-enchente. Entre ela e a curva de depleção pré-enchente prolongada para o futuro, por outro lado, fica definida uma área que representa o volume (já que volume é a integral da vazão no tempo) da contribuição subterrânea fornecida ao rio pelo reafloramento da água da tormenta infiltrada durante este evento de enchente. O reencontro entre essas duas curvas, envoltórias dessa área, ocorre teoricamente só no infinito. Porém, à

medida que o tempo  $t$  tende a infinito, essa área, por razões físicas, deverá obviamente tender a um valor finito. A soma dessa área com a integral das vazões superficiais,  $Q_{\text{sup}}$ , da enchente (ou volume do escoamento superficial) deve coincidir com todo o volume da chuva precipitada no evento. A primeira destas áreas corresponde ao “volume infiltrado” dessa particular enchente, enquanto a segunda corresponde ao seu “volume superficial”.

Um gráfico no tempo poderia ser então desenhado, ponto a ponto, a partir de valores de  $Q_{\text{sup}}$  medidos no gráfico da Figura 1. É denominado “hidrograma superficial” da enchente, aqui definido para ser mencionado na subseção subsequente (ver também REDA, 1985).

## 2.2 O hidrograma unitário – conceituação e obtenção

A parcela da altura pluviométrica total ( $P_{\text{tot}}$ , medida em nosso meio técnico em mm) de uma tormenta precipitada sobre uma bacia hidrográfica e não infiltrada no subsolo, escoando então superficialmente e assim contribuindo para a vazão do talvegue principal dessa bacia na sua seção transversal de saída (ou “exutório”), se denomina “chuva efetiva” – representada por  $P_{\text{ef}}$ . Trecho amarelo mais abaixo modificado por Reda após corr's do Roberto

Uma vez escolhido um pequeno intervalo de tempo,  $\Delta t$ , apropriado para se discretizar sem perda relevante de precisão os gráficos contínuos de vazão e precipitação que descrevem um evento de tormenta e enchente em estudo, pode-se imaginar que uma chuva efetiva de duração igual a somente um  $\Delta t$  e altura pluviométrica de somente 1mm iria, teoricamente, causar uma enchente superficial que pode ser representada por um “hidrograma superficial” específico. Este se denomina o “hidrograma unitário” – ou HU – daquela bacia para “chuva efetiva unitária” (de altura pluviométrica igual a 1mm) e duração  $\Delta t$ . Reda (1985) descreve detalhadamente a “Teoria Linear do Hidrograma Unitário” (enunciada por SHERMAN, 1932), em texto que pode fornecer ao leitor interessado maior esclarecimento no assunto tratado doravante. Aqui, define-se hidrograma unitário sucintamente, para permitir o entendimento do exercício prático desenvolvido na planilha de cálculo didática.

A Figura 2 representa um hidrograma unitário e a chuva unitária teórica que o causaria, do tipo chuva efetiva. Esta é representada através de um “ietograma” – um gráfico “quântico” mostrando, para cada  $\Delta t$ , o incremento de altura pluviométrica (representando um “pacote” de chuva) que aporta naquele  $\Delta t$ . No caso deste particular ietograma tem-se, obviamente, apenas um  $\Delta t$  com chuva efetiva. A duração do  $\Delta t$  deve ser pequena comparada à duração do HU, conforme esclarece e especifica Reda (1986), numa revisão das recomendações dos autores mais importantes na aplicação da “Teoria Linear do Hidrograma Unitário”.

As unidades do HU são, no Sistema Internacional,  $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$  e a forma deste muda ligeiramente se  $\Delta t$  for modificado de um valor pequeno para outro. Portanto, em tese, existe um HU para cada bacia hidrográfica e para cada duração de precipitação efetiva causadora (ou “chuva unitária”). Na Figura 2, a cada  $\Delta t$  se representa um valor discreto da ordenada do HU, como será feito no exemplo de cálculo pela planilha eletrônica.

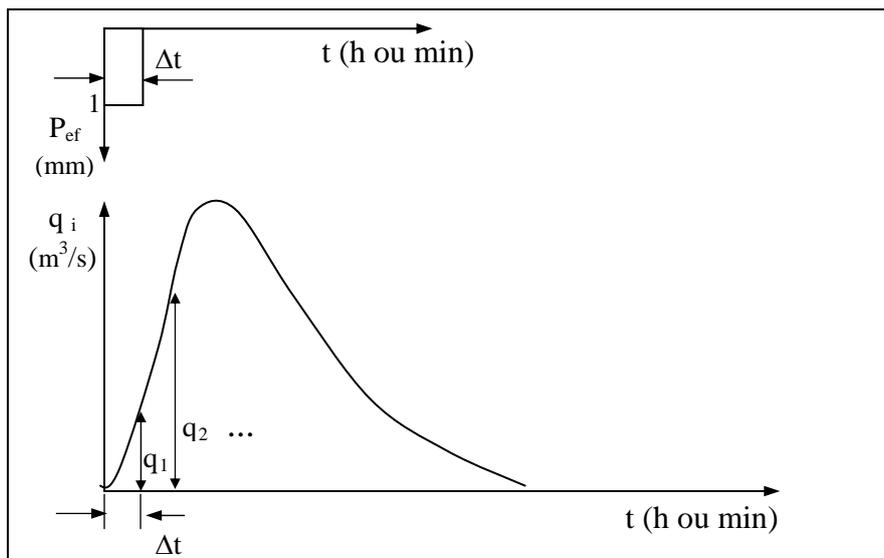


Figura 2 – Hidrograma unitário (HU) de uma bacia hidrográfica, enfatizando-se o intervalo de cálculo ( $\Delta t$ ) adotado e as coordenadas do HU a cada  $\Delta t$ ,  $q_i$  – que são empregadas para a estimativa do hidrograma superficial de projeto pela planilha

A forma do HU de uma bacia pode, por um lado, ser obtida a partir de um hidrograma de enchente medido no campo, da vazão no exutório em determinado evento nessa bacia, e do correspondente ietograma médio espacial sobre sua área (ver metodologia em REDA, 1985).

Por outro lado, caso não se disponha de dados de campo para tanto, existem métodos empíricos que podem permitir a estimativa do “HU sintético”, baseado em características físicas e morfológicas de cada bacia (ver PINTO, 2000). Tais métodos são desenvolvidos a partir de inúmeros dados de campo como os mencionados no parágrafo acima. Exemplo disto é o trabalho de Reda (1986), que desenvolveu um método para estimar o “HU sintético” para bacias rurais no Estado de São Paulo (com áreas entre 30 e 400km<sup>2</sup>).

A próxima subseção demonstra o uso prático de um HU (obtido por qualquer das duas formas acima) para definir enchentes de projeto numa bacia hidrográfica de porte médio – ou seja, com área entre cerca de 5 e 500 km<sup>2</sup>, conforme a prática em nosso meio técnico e científico.

### 2.3 Tormentas, infiltração e separação da precipitação efetiva

Considera-se tormenta uma precipitação atmosférica de alta intensidade e curta duração. Uma tormenta de projeto é um episódio deste tipo, relacionado a determinada probabilidade de ocorrência (ou probabilidade de projeto – associada a determinado nível de “segurança hidrológica” requerido para o obra projetada), que possibilita a estimativa de uma enchente de projeto para o dimensionamento de estrutura hidráulica que sofreria colapso, ruptura, inundação ou fracasso, de maneira geral, se a enchente de projeto fosse ultrapassada de fato.

Para representá-la, utiliza-se um ietogramas de projeto. O eixo do tempo é dividido em vários  $\Delta t$ ; em cada um, é desenhado um retângulo em escala vertical, com altura correspondente ao incremento de altura pluviométrica que aporta à bacia naquele intervalo de duração  $\Delta t$  (ou seja, o retângulo da Figura 2 seria reproduzido para cada  $\Delta t$  com chuva).

A infiltração da chuva também é fator importante para se determinar uma enchente superficial de projeto. Sabe-se que cada solo tem maneira própria de ir-se aproximando da situação saturação ao longo do tempo durante um episódio de chuva. À medida que se

aproxima de tal situação, sua capacidade de infiltração ( $f$ , em mm/h no SI) vai caindo a partir de um valor inicial  $f_o$  (função do tipo de solo e do histórico de chuvas antecedente àquela tormenta) em direção, assintoticamente, de um valor final  $f_c$  (capacidade residual de infiltração do solo saturado – característica de cada bacia). O gradiente com que a capacidade de infiltração  $f$  é reduzida ao longo do tempo chuvoso, variável no tempo, também varia de solo para solo. Na equação (1) – fórmula empírica devida a Horton, amplamente aceita para estimar a depleção da capacidade de infiltração do solo – esse gradiente é influenciado pelo fator  $k$ . Nela, são empregados também os valores de  $f_o$  e  $f_c$  para representar o solo local.

$$f(t) = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

Com o valor de  $f$  calculado para o instante central (ou médio) de cada  $\Delta t$ , pode-se obter uma boa estimativa da altura pluviométrica infiltrada durante este  $\Delta t$  (basta multiplicar  $f$  pela duração de um  $\Delta t$ ) e subtraí-la da correspondente altura pluviométrica precipitada,  $P$ , para obter a altura pluviométrica efetiva,  $P_{ef}$ . Os valores deste último tipo podem, então, ser organizados num ietograma efetivo da tormenta de projeto, cada um no seu  $\Delta t$  de ocorrência. Deve-se ter cuidado especial com intervalos  $\Delta t$  em que não chova o suficiente para que se infiltre tudo que o solo suporta: a subtração acima, simplesmente, resultaria altura efetiva negativa (o que não faz sentido). Em tal caso, sugere-se uma adaptação plausível do método, como segue. Considerar  $P_{ef}$  nula no intervalo e, no  $\Delta t$  seguinte, acrescentar ao valor de  $P_{inf}$  que seria para ele calculado pela fórmula de Horton o seguinte produto:

$$\left\{ \frac{\text{quociente da diferença entre os valores } P_{inf} \text{ real e máximo possível no } \Delta t \text{ anterior pelo segundo deles}}{\text{diferença entre os valores de } P_{inf} \text{ calculados pela fórmula de Horton para estes dois intervalos}} \right\} \times$$

O ietograma obtido desenhando-se em cada  $\Delta t$  a  $P_{ef}$  resultante é denominado “ietograma efetivo”. A seguir, explica-se como aliá-lo ao conhecimento do HU da bacia, também discretizado para um  $\Delta t$  apropriado à dimensão desta (ver REDA, 1986), para gerar um hidrograma estimado de vazões superficiais da enchente – imaginariamente causado por tal tormenta efetiva precipitando-se sobre a bacia – através da operação matricial de convolução.

## 2.4 A convolução da tormenta efetiva com o hidrograma unitário

A Teoria Linear do Hidrograma Unitário, enunciada por Sherman (1932) e discutida em Pinto (2000), Ramos et al. (1989) e Reda (1986), propõe que cada altura efetiva  $P_{ef}$  resultante da operação acima descrita iria gerar um hidrograma superficial, no exutório da bacia, de ordenadas proporcionais às do HU e múltiplas da correspondente  $P_{ef}$  causadora. Para a seqüência de valores  $P_{ef}$  componentes do ietograma efetivo admitido, cada hidrograma superficial resultante seria posicionado no tempo a partir do instante inicial do respectivo  $\Delta t$  causador e, para cada instante no gráfico-resultado, seriam somadas as ordenadas de vazão calculadas para cada um dos múltiplos do HU obtidos. Isto nada mais é do que a convolução de repetidas ocorrências de “excitações  $P_{ef}$ ” (cada uma com intensidade própria) aplicadas ao “sistema de fluxo amortecido bacia hidrográfica”, cada uma resultando um “transitório de vazão” como resposta, no exutório. Portanto, esses transitórios se combinam linearmente,

somando-se a cada instante final de  $\Delta t$  – sem que os valores de vazão no exutório para cada um deles afetem os outros.

Tal operação é demonstrada claramente na seção seguinte, com cálculos realizados num exemplo prático, com a planilha de cálculo para isto desenvolvida.

### 3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Neste exemplo de aplicação, as imagens de tela da planilha de cálculo terão papel fundamental, visto que são auto-explicativas, complementando, e considerada, a introdução teórica e metodológica acima.

A primeira imagem, mostrada na Figura 3, representa o hidrograma unitário, considerado para cada bacia, aqui fornecido (a cada intervalo de cálculo) na forma de um vetor numérico. Tais dados podem ser vistos na Figura 4, na respectiva a tabela constante da planilha.

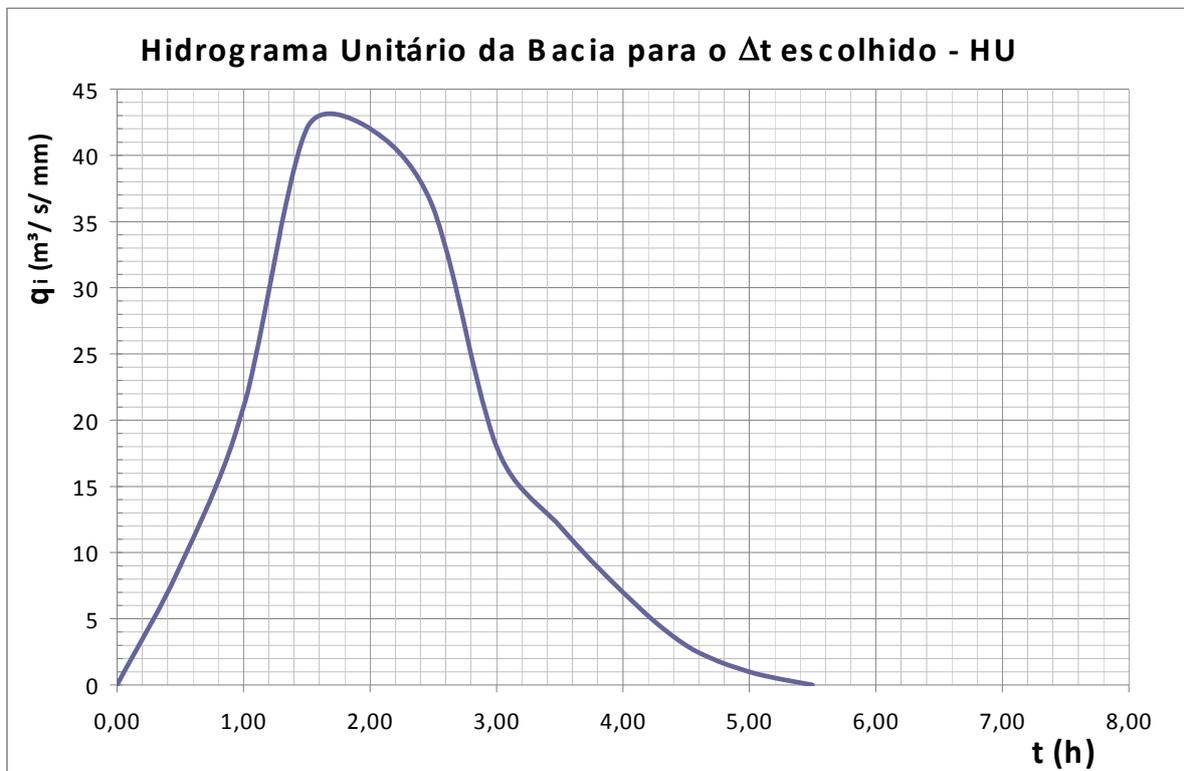


Figura 3 – Hidrograma unitário (HU) da bacia hidrográfica do exemplo, desenhado pela planilha mediante o fornecimento da sua ordenada,  $q_i$ , a cada  $\Delta t$ .

Na Figura 4, na tabela denominada “dados de entrada”, o usuário digita os valores desejados de altura pluviométrica em cada  $\Delta t$  em que choveu (valores  $P_1, P_2$ , etc., logo acima da tabela de cálculo maior).

Na tabela ‘características do solo’, são digitados os valores da constante  $k$  e das capacidades de infiltração inicial ( $f_0$ ) e final ( $f_c$ ) deste. Com tais informações, a planilha já calcula os valores de altura pluviométrica efetiva em cada intervalo (primeira linha de resultados numéricos no canto superior direito da Figura 4).

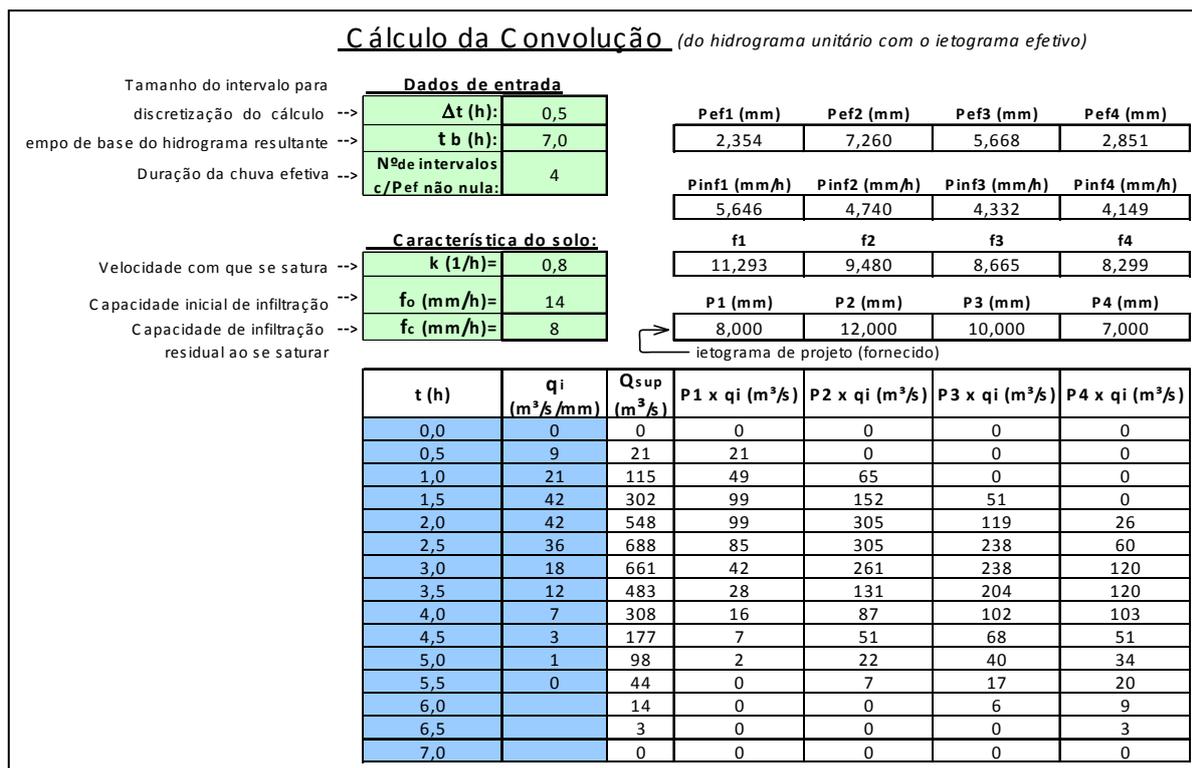


Figura 4 – Imagem do setor da planilha de cálculo que concentra, de forma simples e didática, os dados fornecidos e os cálculos executados

Na tabela ‘dados de entrada’, então, digita-se o tamanho do  $\Delta t$ , a duração do HU e o número de  $\Delta t$  com altura pluviométrica efetiva não nula no ietograma – para definir este último, faz-se uma análise dos valores de  $P_{ef}$  não nulos resultantes da separação da chuva infiltrada.

As ordenadas do HU são fornecidas, a cada intervalo, através de digitação na respectiva coluna dos valores  $q_i$ .

Como resultado, a planilha multiplica as ordenadas do HU, a cada intervalo de cálculo, por cada altura efetiva, gerando os vetores resultantes numa coluna da tabela maior – o cálculo da convolução – de tal forma que cada nova coluna tem início e fim uma linha abaixo da correspondente posição na coluna à sua esquerda. Daí, a planilha soma todos os produtos não nulos  $P_{ef} \times q_i$ , linha a linha, resultando as ordenadas do hidrograma de enchente,  $Q_{sup}$ . Estas são então representadas na Figura 5, onde também estão desenhados os produtos do HU por cada altura efetiva – auxiliando a visualizar a operação de convolução graficamente (de fato, esta pode ser efetuada desenhando-se os vários hidrogramas e somando graficamente). o início e do final da seqüência de valores não nulos da coluna anterior.

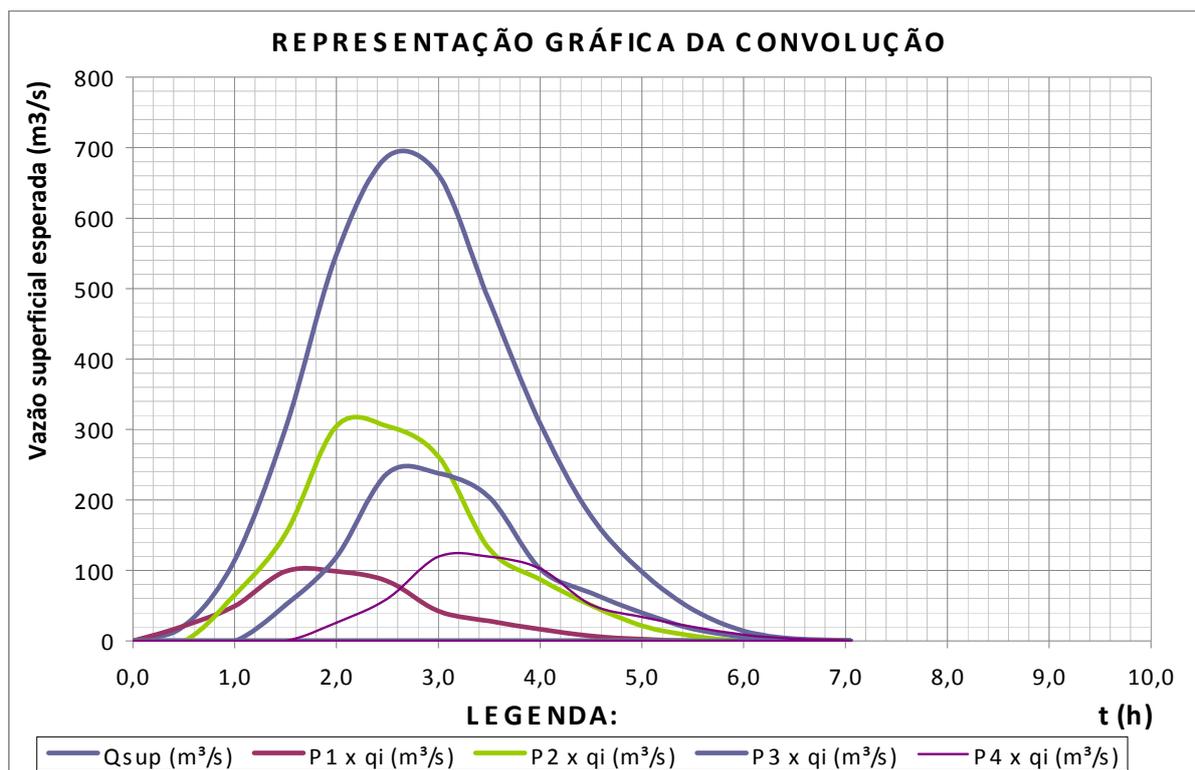


Figura 5 – Representação gráfica da convolução no exemplo de cálculo: produtos do HU por cada um dos valores de precipitação efetiva do ietograma efetivo de projeto e hidrograma total de projeto

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Algumas considerações cabem a seguir sobre os resultados pedagógicos obtidos a partir do uso da planilha mostrada acima, de suas variações e de outras planilhas didáticas.

- O emprego de planilhas didáticas tem sido bem sucedido, recentemente, em diversas disciplinas da área das Ciências Hidráulicas, Sanitárias e Ambientais. Neste caso específico, na disciplina Hidráulica e Hidrologia, apresentou-se a presente proposta para uso prático e também foi bem sucedida.
- Seu emprego varia desde a sala de aula, em ambientes especiais em que os alunos têm acesso a computador durante a aula, até o atendimento por monitor em ambiente semelhante, nos horários fora de aula.
- No ensino de graduação, planilhas congêneres desta têm auxiliado na preparação de exercícios similares com dados diferentes, de forma a fornecer diversos casos para a prática da teoria e para o treinamento preparatório para avaliação de alunos (quando são utilizados, então, somente calculadora – sem o computador com planilha).
- Durante o estudo de aplicação por parte do educando, a planilha fornece um padrão de resposta para que verifique os cálculos, aumentando assim sua segurança durante o estudo extra-aula.
- Da mesma forma, problemas podem ser preparados para arguição em prova e solução com calculadora, ficando a demonstração da solução já pronta, em linguagem cursiva, na própria planilha.

- A economia de tempo obtida com a utilização desta planilha de cálculo permitiu concentrar em duas aulas o trabalho didático que se fazia, anteriormente, em três. Conceitos importantes, tais como o da infiltração da chuva em cada intervalo de ocorrência,  $\Delta t$ , ou o da convolução de matrizes, foram primeiro apresentados na forma de simples cálculo numérico, de maneira que o aluno foi facilmente induzido a perceber a conceituação do método e fixar o aprendizado por repetição de vários casos variantes do original.

Em suma, o emprego didático desta planilha de cálculo foi bem sucedido, incentivando a preparação de planilhas para o ensino de novas partes da disciplina no futuro. Com o tempo ganho pela maior eficiência didática, foi possível introduzir outros tópicos à disciplina e realizar mais exercícios práticos.

### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem a contribuição da Escola de Engenharia Mauá e a confiança de sua Diretoria, com o fornecimento, neste ano letivo, dos computadores necessários ao ensino da Hidráulica e da Hidrologia aplicadas por métodos computacionais – permitindo, então, a liberação de tempo para a introdução de novos aspectos práticos no curso, tais como novos experimentos de laboratório hidráulico físico e exercícios computacionais de Hidráulica e Hidrologia.

Agradecem, ainda, a contribuição dos alunos da quarta série de graduação em Engenharia Civil, que têm participado ativamente do movimento de informatização da disciplina Hidráulica e Hidrologia, oferecendo amplo retorno de informação de interesse didático-pedagógico.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2.ed. 2000, 278p.

RAMOS, F.G.; OCCHIPINTI, A.G.; VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P.C.; CLEARY, R.W. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH, Editora da UFRJ, 1989. 422p.

REDA, A. L. L. **Regionalização do hidrograma unitário para bacias rurais no Estado de São Paulo**. 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 296p.

REDA, A. L. L. Agilização no ensino de Engenharia costeira: análise de maregrama como série temporal aplicando média móvel e planilha de cálculo. In: COBENGE2004, Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 32, ABENGE (Associação Brasileira de Ensino de Engenharia), Brasília, 14-17 de setembro, 2004. **Anais**. Brasília: UNB, 2004. pp.1-7. <http://www.cobenge2004.nmi.unb.br.2004>.

REDA, A. L. L. Software didático de hidráulica para docentes e alunos: o problema dos três reservatórios. In: COBENGE2005, Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 33, ABENGE (Associação Brasileira de Ensino de Engenharia), Campina Grande, PB, 12-15 de setembro, 2005. **Anais**. Campina Grande: UFCG, 2005. pp.1-10. <http://www.cobenge2005.cct.ufcg.edu.br>.

REDA, A. L. L. Uso criterioso de planilha eletrônica no ensino de Hidráulica: dimensionamento de redes de abastecimento de água pelo método de Hardy-Cross. In: COBENGE2006, Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 34, ABENGE (Associação Brasileira de Ensino de Engenharia), Passo Fundo, RS, 12-15 de setembro, 2006. **Anais:** Passo Fundo: UPF, 2006, pp.1-10. <http://www.upf.br/cobenge2006>.

SHERMAN, L.K. Streamflow from rainfall by the unit graph method. **Engineering News**, n.108, p. 501-505, 1932.

SHAW, E.M. **Hydrology in practice**. Londres: Chapman and Hall, 2.ed., 1998. 553p.

## **FACILITATED LEARNING OF HYDROLOGY USING COMPUTER SPREADSHEET: TEACHER, STUDENT AND ASSISTANT STUDENT INTEGRATED TO TEACH THE CONVOLUTION OF HYDROGRAPHS**

**Abstract:** *After the ‘basic cycle’ of Engineering courses (the two first years, in Brazil), the technical subjects follow on, relying on the previously built knowledge base. However, new concepts must still be acquired, along with the technical subjects. The paper shows the effectiveness of introducing such new theoretical contents through practice while developing problem solution techniques, counting on the induction skills of contemporary students – used to information technology, quickly absorbing concepts through use. This becomes still more relevant for students who prefer applied technology to basic sciences: new, theoretical concepts fix better if presented through an application example. Considering the world policy of shortening courses (given the current European trend of three- to four-year Engineering syllabuses), the advantage of simultaneously introducing concepts and Engineering practices, through the use of a didactical spreadsheet, is obvious. Moreover, such a learning tool allows students to concentrate time onto understanding physical aspects, rather than on the computation itself. It also helps creating variants of the problem, including a solution pattern. Later on, the student may practice the theory just learnt by trying to solve it without computers or spreadsheets – only on a regular calculator. The problem proposed here is to derive a flood hydrograph through convolution of a catchment unit hydrograph and a design storm – considering local soil infiltration characteristics. This spreadsheet, jointly designed with an assistant and a regular student, reduced classroom teaching time from three to two hours. It also provides strong support for preparing new exercises.*

**Key-words:** *Learning with computer spreadsheets, Accelerated teaching in Engineering, Hydrographs, Floods, Effective rainfall*